



PONTIFICIA UNIVERSIDAD
CATOLICA
DE VALPARAISO



Danny Stefan Angles Azúa

Obtención y verificación de modelos 3D CAD de cabezas y orejas para aplicaciones acústicas.

Informe Proyecto de Título de Ingeniero Electrónico



Escuela de Ingeniería Eléctrica



PONTIFICIA UNIVERSIDAD
CATOLICA
DE VALPARAISO

Obtención y verificación de modelos 3D CAD de cabeza y orejas para aplicaciones acústicas.

Danny Stefan Angles Azúa

Informe final para optar al título de Ingeniero Electrónico,
aprobada por la comisión de la
Escuela de Ingeniería Eléctrica de la
Pontificia Universidad Católica de Valparaíso
conformada por

Sr. Sebastián Fingerhuth Massmann
Profesor Guía

Sr. Gabriel Hermosilla Vigneau
Segundo Revisor

Sr. Jorge Mendoza Baeza
Director de escuela

Valparaíso, 05 de junio de 2017

Me enorgullezco en dedicárselos a ustedes, mis amados e incondicionales padres: Orlando Muñoz y Priscila Azúa.

Mamá... me siento muy orgulloso de ti, y quiero que sepas que esto es fruto de tu amor y protección, del valor y la fortaleza que me has dado durante estos años, con el esfuerzo de tu trabajo y perseverancia, y los numerosos sacrificios que has realizado toda tu vida, por mí.

Te amo mucho.

Papá "Chiquito" ... bondad, humildad, valores y amor, no se enseñan en la universidad... Estaré eternamente agradecido de ti por habérmelos transmitido durante tu vida, con significativos gestos de amor. Cierro mis ojos, con un abrazo y un beso puedo decirte que hoy cumplo tus sueños.

Te amo mucho.

Agradecimientos

En primera instancia doy gracias a Dios, por entregarme unos padres ejemplares, una hermosa familia y por rodearme de buenas personas en general. Gracias.

A mi madre, te agradezco toda tu muestra de apoyo, cariño, y confianza que has depositado en mí, dando la posibilidad de dedicación completa a estudiar, sacrificándote día a día en tu trabajo, preocupada por mi bienestar.

Chiquito, estés donde estés, siente la alegría de este termino de etapa, te agradezco por siempre el gran padre que fuiste conmigo, y todo tu esfuerzo que diste para entregarme lo mejor posible. Fuiste valiente en criarme y formarme como persona, hoy soy fruto de tu esfuerzo, y me convierto en un profesional

Agradezco a miembros de mi “gran y numerosa familia”, ya que, han sido parte importante en esta etapa. Agradezco a mi tía “Chabelita” y tío Mauri, quienes me han acogido, en numerosos y sabrosos almuerzos, con gratas conversaciones, consejos y recomendaciones. A mi tío padrino “Poly”, cuya ayuda constante y desinteresada, ha sido fundamental, en mi cómoda y amplia estadía en la región. Gracias tía “Tegua” por sus sabios y expertos consejos y muestras de cariño. A usted Lorena, por su apoyo que todo estudiante agradece. A mis primos con los cuales he vivido en mi periodo de estudiante universitario. También doy las gracias a todas aquellas personas que, sin ser familiar, me ha entregados innumerables muestras de cariño, apoyo y afecto.

Jorge Vergara, gracias por la oportunidad de ver en terreno como trabaja una gran persona, y un excelente profesional, gracias por sus determinantes consejos que he sabido tomar. Pauly, Chichi, Moni, Marco, y tía Ceci, en esta tesis están sus huellas.

A mis profesores Sebastián y Gabriel, quienes me han enseñado la rigurosidad de excelencia, me han formado en esta última etapa como futuro profesional.

A los “cabros” quienes me han soportado durante estos años, y he crecido junto a ellos.

Resumen

Este proyecto de título, constituye y fundamenta la primera etapa de investigación, y que ha contado con el financiamiento del Fondo Nacional de Desarrollo Científico y Tecnológico (Fondecyt n° 11150388). La investigación tiene como objetivo final, la medición acústica de HRTF (Head Related Transfer Functions) individualizada.

En este proyecto se exponen los antecedentes teóricos acústicos, argumentando y estableciendo la importancia del oído externo, producto de su morfología. Las pinnas son de vital importancia en las ondas sonoras, propagadas desde la fuente hasta el tímpano, y cuyos efectos logran establecer la localización espacial del sonido emitido.

La metodología híbrida, se basa por la utilización de dos diferentes técnicas en la obtención de los modelos 3D CAD de cabeza y orejas. La unión de estos CAD (de orejas y cabeza), hacen un modelo híbrido 3D CAD final.

El proceso de construcción de réplicas de orejas de yeso, se lleva a cabo mediante técnicas *plásticas manuales* (utilizando materiales odontológicos), que garantizan la conservación de tamaños y detalles de curvaturas.

En el caso de los modelos 3D CAD se utilizó la técnica de *fotogrametría*, junto con la utilización de un software *3D Zephyr*, que procesa las fotografías y genera los modelos 3D CAD. La fotogrametría fue utilizada en los modelos 3D CAD de cabeza, y en los modelos 3D CAD de réplicas de orejas. Se realizaron diversos estudios de mediciones en los diferentes resultados.

Otra técnica para modelos 3D CAD, es con el uso de un escáner 3D en las réplicas de orejas, posibilitando una comparación entre ambas técnicas trabajadas en las réplicas de *pinnas*. Lo que se menciona anteriormente, también es parte de un diseño híbrido, puesto que se puede dar el caso de unión CAD entre cabeza por fotogrametría y orejas (tomadas desde las réplicas) por escáner 3D.

Finalmente, en este proyecto de título, se exponen los resultados de las uniones de cabezas y orejas con los respectivos modelos CAD, proceso que conlleva lo denominado *modelo 3D CAD híbrido final*.

Palabras claves: HRTF, *pinnas*, híbrido, recovecos, Modelos 3D CAD.

Abstract

This project constitutes and supports the first stage of research, and that it has had the financing of Fondo Nacional de Desarrollo Científico y Tecnológico (Fondecyt n° 11150388). The research has as final objective, measurement of individualized Head Related Transfer Functions (HRTF).

In this report the acoustic theoretical antecedents are exposed, arguing and establishing the importance of the external ear, product of its morphology (concavities, convexities). The pinnas are of vital importance in sound waves, propagated from the source to the eardrum, and whose effects manage to establish the spatial location of the sound emitted.

The hybrid methodology is based on the use of two different techniques in obtaining of the 3D CAD models of head and ears. The union of these CAD (of ears and head), make a hybrid model 3D CAD final.

The process of constructing replicas of gypsum ears is carried out using techniques wich guarantee the conservation of sizes and details of curvatures.

In the case of the 3D CAD models, the photogrammetry technique was used, along with the use of 3D Zephyr software, wich processes the photograps and generates 3D CAD models. Photogrammetry was used in 3D CAD head models, and in 3D CAD models of ear replicas. Various measurement studies were performed on the different results.

Another technique for 3D CAD models is the use of a 3D scanner in the replica of the ears, allowing a comparison between both techniques worked on the replica of the pinna. Those mentioned above, is also part of a hybrid design, since it can be the case of CAD bond between head by photogrammetry and ears (taken from the replicas) by 3D scanner.

Finally in this title project, the results of the head and ear joints with the respective CAD models are presented, which involves the so-called 3D final hybrid CAD model.

Key words: HRTF, *pinnas*, hybrid, nooks and crannies, Models 3D CAD.

Índice general

Introducción.....	1
1 Presentación de proyecto	4
1.1 Descripción y motivación del proyecto	4
1.2 Objetivos generales.....	6
1.3 Objetivos específicos	6
2 Tópicos y técnicas del proyecto	7
2.1 Fundamentos teóricos acústicos	7
2.1.1 Factores de importancia	7
2.1.2 Medición de HRTF	9
2.1.3 Pruebas de materiales	10
2.1.4 Análisis de réplicas	13
2.2 Técnicas de reconstrucción 3D CAD.....	14
2.2.1 Fotogrametría	14
2.2.2 Escáner 3D	15
2.3 Conclusiones del capítulo	16
3 Metodología y desarrollo de trabajo	17
3.1 Configuración escénica para fotografías	17
3.2 Software 3D Zephyr	20
3.3 Procesamiento y construcción de modelos 3D CAD	21
3.3.1 Modelos 3D CAD de cabeza	22
3.3.2 Variaciones en la técnica	22
3.3.3 Modelos CAD defectuosos.....	24
3.4 Réplicas humanas y 3D CAD.....	26
3.4.1 Obtención de réplicas 3D humanas de pinnas.....	27
3.4.2 Modelo CAD de Réplicas orejas	28
3.5 Modelos 3D CAD híbridos.....	31
3.5.1 Sesión fotográfica	31
3.5.2 Modelo CAD.....	32
3.5.3 Réplicas de pinnas.....	32

3.5.4 Unión y modelo híbrido	33
3.6 Conclusiones del capítulo	35
4 Pruebas y resultados	36
4.1 Análisis de distorsión en tamaños de réplicas de orejas 3D.....	36
4.2 Prueba de repetitividad	39
4.2.1 Repetitividad individual.....	41
4.2.2 Repetitividad colectiva.....	44
4.3 Conclusiones del capítulo	49
5 Discusión y conclusiones.....	50
6 Proyección	53
Bibliografía	54

Introducción

La posibilidad de poder localizar, distinguir y diferenciar las ondas vibratorias proveniente de diversas fuentes sonoras, le brindan al ser humano, la posibilidad de entendimiento de diferentes fenómenos de la naturaleza, ampliando el conocimiento científico, y desarrollando abundantes aplicaciones tecnológicas [1] [2]. En relación a lo mencionado, existen en la actualidad abundantes estudios en diferentes ramas, las cuales pueden variar desde la investigación de los movimientos violentos del aire (aeroacústica), pasando por el entendimiento de bioacústica (la cual ha llegado a desarrollar tecnologías tan importantes como el radar), y llegando a temáticas más relacionadas a esta investigación, como lo son la Acústica Fisiológica (estudio del funcionamiento del aparato auditivo) y la Electroacústica (estudio del tratamiento electrónico del sonido).

La cabeza, el torso y el pabellón auricular, son relevantes para la recepción de las ondas sonoras y son de vital importancia en un sin número de aplicaciones. En relación a esto, la mayoría de los diferentes estudios y desarrollos tecnológicos se basan en diferentes modelos matemáticos para materializar diversos dispositivos, softwares y sistemas que brinden una mejor calidad de audio (principalmente) para los usuarios. Un ejemplo sencillo de comprender, es la utilización de audífonos, dirigidos a personas que tengan grandes dificultades para oír. Este dispositivo electrónico, amplifica y cambia el sonido, permitiendo una mejor comunicación del usuario, es una de las tantas aplicaciones que podría beneficiarse con el trabajo que se expone en este proyecto de título.

El sistema auditivo humano, tiene la capacidad de interpretar las señales por medio de las ondas sonoras, las cuales son afectadas por diferentes fenómenos como: reflexión, difracción, efectos de resonancia. Las ondas que logran ingresar al tímpano, son interpretadas por el cerebro gracias a varios factores propias del sistema auditivo. Estas señales se vinculan directamente con la HRTF (Head Related Transfer Function), la cual es una compleja función que se utiliza para mediciones, entregando importantes informaciones sobre ángulos azimut, de elevación y frecuencias, relacionadas con la señal emitida por alguna fuente emisora, que es detectada y medida – principalmente- en el tímpano.

En diferentes investigaciones [3] [4], publicaciones y estudios universitarios, la HRTF es medida en equipos artificiales, tales como los “dummy heads” (maniqués utilizados para estudios acústicos), y que, en su mayoría, contienen micrófonos incorporados para realizar estudios de

localización, determinando grados de error en la percepción de elevación e identificación de las fuentes sonoras (si están ubicadas en zonas frontales o traseras). Estas simulaciones efectuadas por medio de los maniqués acústicos, cuyos diseños y ajustes individuales para representar una HRTF de las personas son buenos, pero limitan las posibilidades de desarrollo de proyectos, sistemas, y dispositivos, pensados y diseñados de forma “perfecta” para un individuo. Esto es posible por medio de la obtención de una cabeza personalizada, un claro ejemplo de dispositivos beneficiados es el audífono. El audífono terapéutico, no es un elemento diseñado de manera personalizada (como tantos otros) sino que es de carácter estándar, que cumple con ciertos parámetros establecidos, en relación a la necesidad de la enfermedad o dificultad auditiva de las personas y en la mayoría de los pacientes, no se logra el objetivo de que vuelva a tener la capacidad de audición deseada, aunque en algunos casos, podrían desarrollarse soluciones por medio de investigaciones y estudios.

La necesidad de realizar este trabajo, con el objetivo -en primera etapa - de reconstruir la morfología de las personas con un alto grado de similitud, tanto en tamaños como en definición de detalles, con modelos que debiesen ser confiables y con mínimas irregularidades (tanto en torso, cabeza y orejas) con la proyección de poder determinar la HRTF individualizada, a través de diversas pruebas de carácter acústico.

Para realizarlo y dar inicio a su desarrollo, se investigaron antecedentes de diversas disciplinas que, al aplicarlas de forma conjunta, logran como resultado la construcción de modelos individualizados. La forma de generar estos modelos o copias de cabezas, torso y orejas, es posible por diferentes técnicas y tecnologías, las cuales posibilitan la digitalización en registros de información computacional, a través de los denominados archivos CAD (diseño asistido por computadora). En la actualidad, existen diversas formas y maneras de obtener y recrear estos archivos CAD, entre los que se destacan: tomografía computarizada, imágenes por resonancia magnética, fotogrametría, escáner 3D. Éstas últimas (fotogrametría y escáner 3D) fueron las utilizadas para este proyecto, porque: no son invasivas ni perjudiciales para los sujetos de pruebas, se pueden aplicar con recursos de fácil acceso y sin desmedro en la calidad de sus resultados [5] [6]. Además, surgió la necesidad de construir una metodología de carácter híbrido, individualizados, para generar réplicas de pabellón auricular por medio de la técnica de moldes de alginato-yeso, con el fin de evidenciar las curvaturas pertenecientes a las pinnas, que son extremadamente difíciles de obtener mediante la técnica de fotogrametría de cabeza.

En este trabajo, se complementaron técnicas usadas en investigaciones anteriores [7] [8], tal como la fotogrametría, que fue utilizada para la construcción de modelos de cabeza y réplicas de orejas 3D. Además, se implementó el uso del escáner 3D para la generación de modelos CAD de las réplicas tridimensionales de las pinnas. Tales técnicas fueron sometidas a estudios, mediante diferentes pruebas realizadas en laboratorio con diversos sujetos y parámetros técnicos. La selección de los participantes, involucró el apoyo de un profesional especializado en el área de la Otorrinolaringología, quien - a través de la examinación de los sujetos- determinaba si eran aptos como participantes en el proyecto, porque implicaba prepararlos en cuanto a las medidas de seguridad (en ambas orejas) para el vaciado del alginato (material odontológico acuoso) y obtener las réplicas de las orejas de ellos.

Otro de los trabajos desarrollados durante esta investigación, y cuyo rol es fundamental para la consolidación de la metodología que se estaba construyendo, fueron las pruebas de repetitividad, las cuales consistían en varias sesiones de fotografías con un mismo sujeto de prueba, a diferentes horas del día. Estas fueron ejecutadas tanto con las réplicas tridimensionales de orejas, como también con los modelos 3D CAD, las cuales garantizaron por medio de los resultados, que la metodología realizada cumplía con los objetivos propuestos en primera instancia. Si bien los primeros trabajos estuvieron realizados con una menor rigurosidad en cuanto al método, las pruebas finales fueron efectuadas con la metodología definitiva, concluyendo con el trabajo elaborado durante todo un año de este proyecto de título.

En relación a las uniones de modelos 3D CAD, es importante mencionar que, independiente de la técnica por la cual se obtuvieron los modelos de diseños asistidos por computadoras, fueron unidos a través de “*Blender*”, un software especializado (estudiado y analizado previamente, según la necesidad de este proyecto). Este programa logra la unión de los modelos, que posteriormente, permite la exportación en un solo archivo de formato STL, dando la posibilidad de utilizarlos en otros softwares especializados en simulaciones acústicas. De esta manera, se obtiene la HRTF individualizada. Otra ventaja del formato STL, es que al ser un archivo de carácter “universal” en cuanto a materia de modelos 3D, permite ser utilizado en software de impresoras 3D; temática que se propone como trabajo futuro, en cuanto a la impresión de los modelos a escala real.

En los siguientes capítulos de este informe se abordan con profundidad los contenidos tratados en este apartado con el propósito de permitir un cabal entendimiento y comprensión de los resultados, y metodología definida para la construcción de modelos 3D CAD híbridos, individualizados.

1 Presentación de proyecto

En este primer capítulo, se manifiesta un enfoque centrado principalmente en la descripción de los objetivos generales y objetivos específicos, con una breve descripción general que engloba la temática del proyecto.

Con respecto al contenido de este trabajo, se enfatiza la utilización de la palabra “*pinna*”, cuyo término se refiere a oreja o pabellón auricular. De igual modo y para fines prácticos, se define los siguientes acrónimos; PRTF (Pinna Related Transfer Function) o también (Función de Transferencia Referente a la Pinna), HRTF (Head Related Transfer Function) o también (Función de Transferencia Referente a la Cabeza).

1.1 Descripción y motivación del proyecto

Diferentes investigaciones concuerdan que la HRTF individual, son determinantes en materias de ajustes de audífonos individuales, en sistemas de grabaciones y reproducción de sonido 3D, en los sistemas de teleconferencias, y en diseños acústico arquitectónico [9] [10] [11]. Hoy en día, en la mayoría de los centros de investigación se utilizan cabezas y orejas ficticias, con diseños similares a los humanos, y manteniendo cierto estándar en los valores de tamaños.

La puesta en marcha de este proyecto involucra la necesidad de interiorizarse en materia de estudios de teoría acústica, técnica de fotogrametría y el entendimiento de las diferentes tecnologías de escaneos 3D. Se contempla la utilización de cabezas y orejas reales para la construcción de modelos 3D CAD, solicitando la participación de sujetos como modelos de estudios. En relación a lo que es la obtención de modelos 3D CAD de cabeza, éstas pueden modelarse con mayor facilidad por medios de técnicas fotogramétricas, o la utilización de escáner laser, aunque en ambos casos, la representación del pabellón auricular, no tienen la capacidad de representar las concavidades que presentan las orejas, y es donde se trabaja con mayor énfasis en la búsqueda de solución a esa problemática.

A lo mencionado anteriormente y en relación a la complejidad de este trabajo, se basa en la creación de los modelos 3D CAD de orejas, ya que por las características físicas de la pinna, la cual posee convexidades y concavidades (en la Figura 1-1 se aprecia lo indicado), y que dificultan las generaciones de los modelos. Las curvaturas son sumamente importante de representar en los modelos CAD puesto que influyen en el cambio de las ondas acústicas, producto de reflexión,

difracción, resonancia, y en consecuencia son parte importante de la HRTF (*Head Related Transfer Function*), generando errores y valores no reales (en caso de no representar correctamente), los cuales dificultan en la localización de la fuente que emite las ondas sonoras [8] [12] [13].



Figura 1-1: Descripción anatómica del pabellón auricular [14].

Con la información recopilada tanto en proyectos de títulos, publicaciones e investigaciones anteriores, se logró definir la técnica de obtención de moldes de pinnas de yeso, a través del negativo de alginato, donde se ha utilizado la réplica de oreja GRAS; misma técnica es la usada para la obtención de los moldes de yeso en orejas de personas [8] [4]. Esta metodología será utilizada como base de este proyecto, sin perjuicio del mejoramiento y/o utilización de nuevas técnicas de esta forma comparar si se obtienen réplicas con un grado de exactitud mayor.

Otros de los desafíos importantes, es el particular trabajo de obtención de modelos CAD híbridos (en cuanto a las técnicas utilizadas):

- Torso y cabeza: aplicando técnica de fotogrametría.
- Réplicas de yeso de Pinnas: aplicando técnica de fotogrametría, y utilización de escáner 3D.

La finalización de este trabajo, vincula la metodología a utilizar en el proceso unión de ambos modelos terminados. De esta manera, se da termino a la creación de los modelos 3D CAD individualizados, y cuyo trabajo permite poblar la base de datos del proyecto paralelo denominado “*Generación de una base de datos de modelos 3D CAD de cabezas y orejas*”.

Con este desarrollo, es posible realizar impresiones 3D de los modelos individualizados, lo cual permitiría, hacer pruebas acústicas para la obtención de la HRTF individualizado, no obstante, también es posible recopilar esa información de la HRTF, a través de diferentes softwares que tengan la compatibilidad con el formato de archivo STL de los modelos 3D CAD.

1.2 Objetivos generales

El principal objetivo es la determinación de la metodología de trabajo en base a diferentes técnicas de construcción de modelos 3D CAD, dando énfasis a los modelos resultantes de las réplicas de las pinnas.

Esto es posible con la ejecución de las técnicas, y se corrobora midiendo los porcentajes de error presentado en cada uno de los procesos. De esta manera, se logra determinar el nivel de precisión de la metodología aplicada durante este estudio, por medio de diversas pruebas vinculadas a repeticiones de procesos, y a las abundantes mediciones tomadas en el laboratorio con la instrumentación y softwares aptos para este tipo de trabajo. Finalmente, establecer y estandarizar la metodología para la reconstrucción de los modelos 3D CAD híbridos individualizados.

1.3 Objetivos específicos

- Estudiar y comprender en profundidad los trabajos realizados por los alumnos, José Luis Bravo y Rodrigo Codoceo [7] [8], quienes lideraron las primeras metodologías. Enfocando la utilización de técnicas plásticas manuales, y de simulación computacional, para la obtención de réplicas de orejas 3D, y de igual forma la generación de modelos CAD de cabezas y réplicas de orejas.
- Generar diversas pruebas en base a réplicas de yeso, tomando como referencia las orejas de siliconas (orejas GRAS de dunny head) existentes en el laboratorio. Establecer materiales de uso, tiempo de trabajo, ángulos de cortes en réplicas de yeso, utilización de equipos electrónicos y/o eléctricos mecánicos.
- Desarrollar un alto nivel de conocimiento como usuario del software a utilizar “*3D Zephyr*”. Determinar las capacidades técnicas, investigar sobre algoritmos asociados para la reconstrucción tridimensional propias del software, y las potenciales ventajas por sobre otros softwares.
- Instruirse de contenidos teóricos y prácticos sobre la técnica de fotogrametría, cantidad de información requeridas por las imágenes, ventajas y desventajas en la elaboración tridimensional de los elementos que se le aplican esta técnica.
- Elegir el tipo de escáner 3D para la reconstrucción de modelos 3D CAD, realizando un análisis de mercado entre el tipo de tecnología que utilizan para llevar cabo la digitalización de las pinnas, considerando capacidades técnicas del escáner seleccionado.
- Describir y entregar el desarrollo de la metodología elaborada a lo largo de toda esta investigación, otorgando los resultados que garanticen la efectividad y confiabilidad de los modelos 3D CAD híbridos individualizados, en comparación a los modelos reales los cuales fueron requeridos para este estudio (sujetos de pruebas).

2 Tópicos y técnicas del proyecto

El tema central de este capítulo, se basa en contenidos teóricos acústicos, exponiendo una brevemente explicación sobre la importancia de las *pinnas* y la influencia de éstas en la medición de HRTF, así como también en la localización del sonido.

Luego se hace referencia a la técnica empleada para construcción de los modelos de réplicas de pinnas 3D en yeso, exhibiendo diferentes imágenes del trabajo llevado a cabo, ventajas y desventajas por sobre otros tipos de materiales.

Finalmente, en este capítulo se expone de forma resumida, antecedentes sobre la teoría de fotogrametría. Del mismo modo, se describe algunos de los tipos de escáneres 3D en el mercado, indicando el más apropiado para efectos de esta investigación.

2.1 Fundamentos teóricos acústicos

La acústica, se puede definir como una parte de la física interdisciplinaria, cuya ocupación es el estudio del sonido, infrasonido, ultrasonido, es decir, ondas sonoras que se propagan a través de la materia a diferentes frecuencias de oscilación [4] [15]. De igual forma, la acústica también puede referirse a las características de un recinto en función de la calidad de la recepción de los sonidos dentro de estos.

La capacidad que posee el ser humano para detectar en el espacio una fuente sonora, se basa principalmente a la configuración anatómica y al conjunto del procesamiento cerebral propia del oyente, complementado con factores como; HRTF, diferencia interaural de intensidad y diferencia interaural de tiempo, las cuales destacan esta capacidad [8] [16].

2.1.1 Factores de importancia

Las funciones de transferencias referidas a la cabeza (HRTF) contienen información de la interacción efectuada entre el sonido con: la cabeza, torso, y pabellón auricular de una persona, y cuya interpretación cerebral logra el entendimiento de las ubicaciones de las fuentes de sonidos alrededor [13]. La existencia de tres factores, son los que destacan esta capacidad.

- Diferencia interaurales de intensidad (ILD).
- Diferencia interaurales de tiempo (ITD).

- Función de transferencia referente a la cabeza (HRTF)

Se establece que la localización de un individuo con respecto a una fuente sonora en el espacio, es posible a partir de la audición binaural, ya que estudios demuestran que un porcentaje muy menor de la población logra determinar la localización de una fuente emisora de sonido con tan solo un oído [1]. Para el sistema auditivo humano, se establece tres planos característicos de localización, estos son: plano frontal, plano medio, plano horizontal, tal como se muestra en la Figura 2-1.

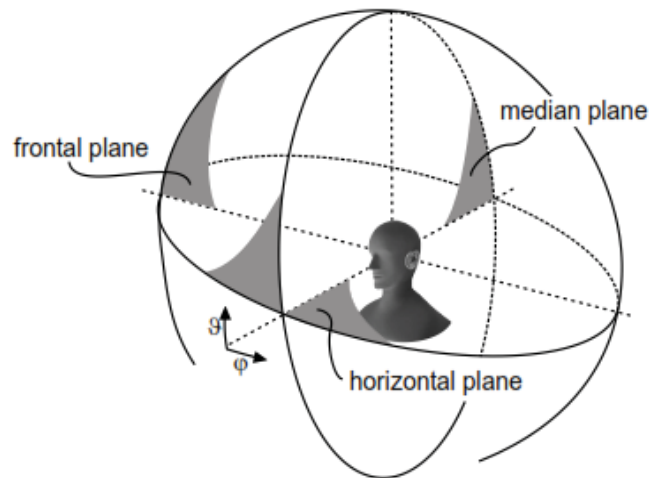


Figura 2-1: Planos referente al oyente y ángulos de posicionamiento de la fuente [17].

Las características de una señal acústica suelen dividirse en los indicios de dos grupos: Primero temporales, cuya representación en el dominio del tiempo resulta más pertinente para su análisis. Y segundo los espectrales, donde la representación más importante es en el dominio de la frecuencia [1] [17].

Diferencias interaurales de intensidad (ILD): Las diferencias de nivel que existen entre el oído derecho y el izquierdo se conocen como las ILD, donde principalmente se dan por las diferentes distancias que la onda debe recorrer para llegar a los oídos. Las ILD son prácticamente despreciables para frecuencias inferiores a los 500 [Hz], mientras que la intensidad es de hasta 20 [dB] para frecuencias mayores a 5 [kHz]. Esto se debe a que las bajas frecuencias producen difracción y poca sombra acústica, mientras que, para las altas frecuencias, la sombra acústica es importante [8] [17].

Diferencias interaurales de tiempo (ITD): Pueden calcularse a partir de las diferencias de tiempo de llegada de las ondas sonoras a cada oído, estudios demuestran [18] que van desde los 0 [s] para fuentes que se ubican a 0° de ángulo en el plano frontal (exactamente delante del sujeto), hasta cerca de 0,69 [ms] para fuentes sonoras cuyo ángulo frontal es de 90° (se aprecia la curva

característica de lo descrito en la Figura 2-2). Se concluye que para frecuencias audibles por debajo de los 1.500 [Hz] las ITD son eficaces.

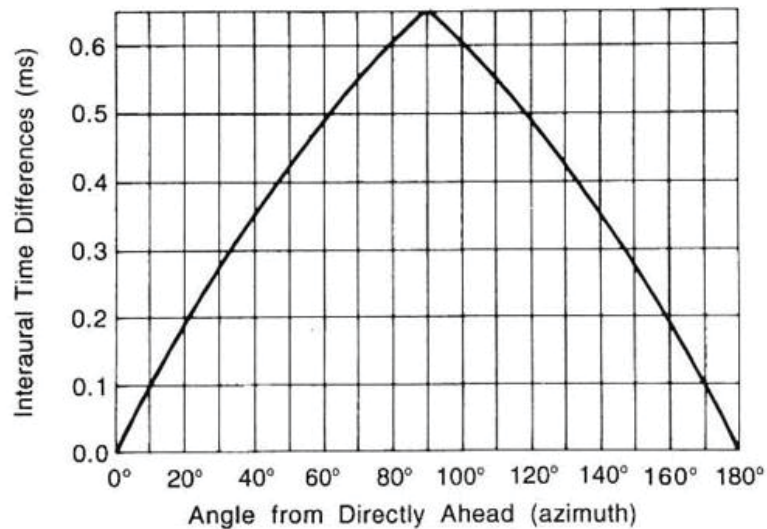


Figura 2-2: Gráfico de retraso temporal en función del ángulo de la fuente [19].

Lo mencionado con respecto a las ILD y ITD son conocidas como teoría del dúplex, si bien esta teoría es correcta para ondas sinusoidales, no logra dar un determinado cálculo para aquellos casos donde el sonido tiene características más complejas (no sinusoidal).

2.1.2 Medición de HRTF

La HRTF (Head Related Transfer Function) o también la función de transferencia referida a la cabeza, es una función que define el comportamiento acústico que tiene el conjunto formado por la cabeza, el oído externo y el tímpano. Esta función puede ser resumida en una forma de impulso o respuesta impulsiva para que pueda ser tratada en procesadores de señales digitales. Las HRTF, pueden ser referidas al oído izquierdo o al oído derecho de un individuo, medida desde un punto específico en el campo libre a un punto específico en el canal auditivo. [13] [4] [7].

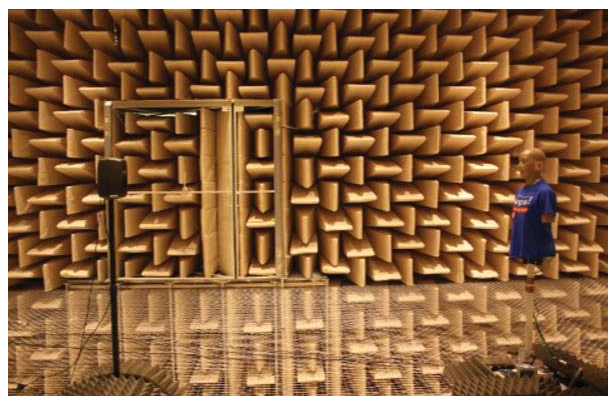


Figura 2-3: Maniquí dummy en sala anecoica [20].

El procedimiento para la medición de la HRTF (Head Related Transfer Function) en los sujetos sometidos a estudio, describe aplicar una serie de impulsos por medio de una señal de excitación haciendo un barrido en frecuencias audibles [17] [7]. Estas frecuencias audibles son denominados sweep, presentan una mayor inmunidad a distorsiones y varianza en el tiempo bajo condiciones adversas del medio [7] [21].

Estas señales son enviadas hacia la cabeza, torso y pabellón auricular, a esta información se le aplica el cálculo de la Transformada de Fourier de la HRIR. La función es obtenida a través de la medición en ambos canales de la respuesta a un impulso. Al obtener las señales de cada oído para cualquier posición de la fuente, se pueden sintetizar señales binaurales precisas de una fuente individual o serie de fuentes. Finalmente se realiza la desconvolución o transformada rápida de Fourier mediante la correlación de la señal medida [13] [21].

En relación al pabellón auricular, es sabido que las curvaturas que posee (producto de la anatomía) son considerado relevante para la HRTF [8] [17], al igual que el tamaño y la forma de las orejas de cada persona. Estas características, son totalmente únicas, debido a las existentes diferencias milimétricas de tamaños, entre una oreja y la otra de cada ser humano.

Con las réplicas de orejas (de yeso), es posible realizar diferentes cortes (en caso que sea necesario), los cuales permiten observar las curvaturas propias de las pinnas. Luego las réplicas (ya sea que estén cortadas o en una sola pieza), son trabajadas por medio de la técnica de fotogrametría o con la utilización de un escáner 3D, con el fin de obtener el modelo tridimensional asistido por computadora.

En investigaciones anteriores [7] [8], se determinaron algunos de los materiales de trabajo para la creación de la réplicas de orejas, principalmente; alginato, yeso y silicona. Este tipo de material, es de utilización odontológica, producto a su gran capacidad de adaptación con piel humana, y a la mínima deformación en proporciones físicas de tamaños de las impresiones.

Gran parte de las pruebas de réplicas de pinnas, fueron con la utilización de las orejas GRAS, las cuales son de silicona, y fueron adquiridas especialmente para este estudio. Los tamaños de las orejas GRAS, son estandarizados en relación al Dummy Head (que corresponde a un maniquí utilizado en estudios acústicos), y los resultados obtenidos en las pruebas, fueron analizadas en base a las mediciones de tamaños de las GRAS, como también en la calidad de detalles en recovecos.

2.1.3 Pruebas de materiales

Los que se busca con la utilización de materiales, es conservar y replicar tanto en tamaño como en detalle los recovecos de las orejas, mediante una técnica de copia en negativo, para luego aplicar un vaciado (puede ser del mismo u otro material), y generar el negativo el cual sería la réplica deseada.

Réplica de silicona: Existen presentaciones de los *elastómeros mercaptanos*, que se definen como liviana, regular, y pesada. La silicona a elección es la por condensación, debido a las

características técnicas de impresión estudiadas previamente [22]. Los resultados obtenidos en base a la oreja de prueba, no contribuyen a lo esperado para el desarrollo de este trabajo, como se aprecia en la Figura 2-4. Por otro lado, utilizar siliconas para el vaciado (es decir usarla como réplica de silicona), se descarta producto a su alto grado de deshidratación a las pocas horas, lo cual provoca deformaciones que alteran en varios milímetros las dimensiones de las orejas. La condición descrita, no permite la utilización de silicona odontológica para ninguno de los casos mencionados (ya sea para la muestra del negativo, como para el vaciado en positivo). Producto de la deformación, tampoco posibilita la obtención de los modelos 3D CAD (ni por fotogrametría, ni escáner 3D).



Figura 2-4: Resultado posterior a la utilización de la silicona en la oreja GRAS, se observa que se adhiere, por lo cual no cumple con lo requerido por pérdida de material.

Alginato y yeso: En las investigaciones desarrolladas anteriormente [7] [8] fueron estudiados diferentes tipos de materiales, y de forma explícita, ambos trabajos concluyeron que la utilización de alginato es la mejor elección para la impresión. Utilizando el alginato para el negativo de las orejas según sus diferentes pruebas de análisis. Una de las características del alginato, es que este hidrocolide irreversible es un material tipo elástico, basado en sales solubles [23], y la deformación es casi despreciable.

De las características generales del alginato se destaca lo siguiente:

Ventajas:

- Fácil manipulación.
- Bajo costo.
- Hidrofilico.
- No requiere equipamiento especial.

Desventajas:

- Escasa resistencia al desgarro.
- Baja reproducción de detalles.

- No acepta múltiples vaciados.

En cuanto a la preparación de este material, las referencias de cantidades, son las indicadas por el fabricante. En la Figura 2-5 se observa los elementos necesarios para la manipulación y preparación.



Figura 2-5: Proceso de manipulación, implementos típicos a utilizar, y resultado de la mezcla final.

El proceso de mezcla debe ser cuidadoso y rápido, para evitar la formación burbujas de aire en lugares puntuales de la *pinna*, especialmente *fosa triangular* [23].

En cuanto a la utilización del yeso, este tiene diferentes tipos de consistencia, de las cuales se destacan; yeso piedra, yeso ortopédico, y yeso extra duro. Las diferentes pruebas realizadas, y en base al estudio de los elementos de las consistencias, se decide trabajar con el yeso piedra. Este material, requiere menor tiempo de fraguado, tiene una dureza superficial que sí posibilita cortes (en caso de que sea necesario), y la expansión de los cristales es casi nula, por lo cual conserva las dimensiones a lo largo del tiempo.

Algunos de los primeros resultados se observan en la Figura 2-6, donde las réplicas de orejas fueron obtenidas por medio de alginato (como el negativo), y el yeso como positivo.



Figura 2-6: Réplicas de pinna del modelo original GRAS, yeso piedra y yeso ortopédico.

2.1.4 Análisis de réplicas

A modo de corroboración, se realizaron numerosas pruebas de generaciones de réplicas de orejas, en todos los casos, utilizando la oreja artificial GRAS, que son utilizadas en el maniquí dummy head para diferentes estudios acústicos (ver en Figura 2-7). El estudio contempla las mediciones de cinco segmentos identificados en las orejas, las cuales son indicadas en la Figura 2-8, las cuales posteriormente también se midieron en las réplicas de yeso construidas, con la técnica de alginato y yeso.



Figura 2-7: Dummy-head con orejas GRAS usadas para pruebas y estudios acústicos.

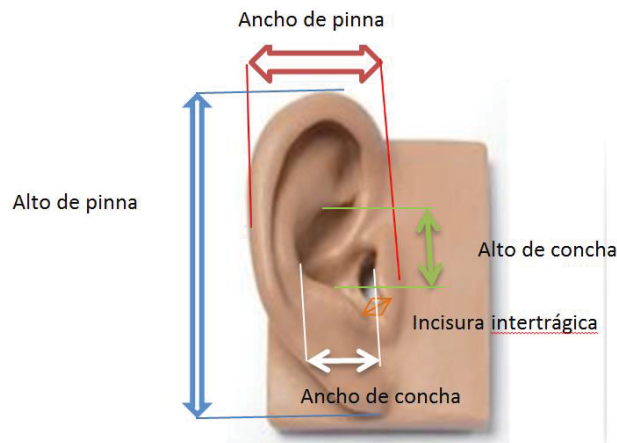


Figura 2-8: Orejas GRAS puestas en estudios de medición, usando cinco segmentos, los cuales fueron medidos en las réplicas de yeso.

Lo descrito anteriormente se presenta en la Tabla 2-1 son los resultados, de las primeras pruebas trabajadas durante esta investigación.

Los resultados son observados desde la perspectiva de calidad de copia (en cuanto a la similitud con la original), medidas físicas, formas y detalles en las curvaturas. Estos aspectos, son determinantes para la utilización de esta técnica con los materiales descrito anteriormente.

Tabla 2-1: Tabla comparativa, entre las orejas GRAS y las réplicas obtenidas de yeso, de cinco segmentos de referencia.

Tipo	Altura [mm]	Anchura [mm]	Altura en concha [mm]	Anchura en concha [mm]	Incisura Intertraguica [mm]
GRAS derecha	65,07	37,08	20,28	21,05	6,22
Réplica I	65,88	37,1	20,35	20,83	6,4
Réplica II	65,25	36,84	20,9	20,76	6,17
Réplica III	65,37	37,45	20,85	20,85	6,18
GRAS izquierda	65,13	37,05	20,25	21,3	6,28
Réplica I	65,85	36,99	20,47	20,26	6,17
Replica II	65,53	37,95	20,59	20,88	6,13
Réplica III	65,89	37,88	20,74	20,7	6,3
Valor medio	65,5	37,29	20,55	20,83	6,23
Valor máx.	65,89	37,95	20,9	21,3	6,4
Valor min.	65,07	36,84	20,25	20,26	6,13
Error % medio derecho	0,66 %	0,57 %	2,07 %	1,12 %	1,45 %
Error % medio izquierdo	0,96 %	1,61 %	1,73 %	1,64 %	1,49 %

2.2 Técnicas de reconstrucción 3D CAD

A continuación, se presentan de forma resumida, el enfoque teórico de las técnicas a utilizar para reconstrucción de modelos 3D CAD. Como se especificó anteriormente, la técnica de fotogrametría, será aplicada para los modelos 3D CAD de cabezas, y para las réplicas de orejas, al igual que los trabajos expuestos en [8] y para esto es necesario contar con un software computacional, el seleccionado para esta investigación es *3D Zephyr*.

Con respecto a la utilización de escáner 3D, solo será trabajado en las réplicas de *pinnas*, como una segunda técnica de reconstrucción tridimensional asistida por computadora.

2.2.1 Fotogrametría

La fotogrametría se define como el arte, la ciencia y tecnología de obtener información confiable de objetos y se basa en las posiciones de los puntos reconocibles o puntos de referencias en varias tomas de fotografías, de igual forma se realiza con sistemas de percepción remotas [24].

El principio en el que se fundamenta la fotogrametría, consiste en proyectar en forma ortogonal sobre un plano de referencia una imagen cualquiera (una fotografía), la cual ha sido proyectada sobre el negativo mediante la proyección central. El paso de la proyección central a la proyección ortogonal, se puede realizar ya sea por la fotogrametría gráfica (en desuso), o por la estereofotogrametría, la cual es la usada actualmente [24] [25].

La estereofotogrametría se basa en la visión estereoscópica para recrear un modelo estereoscópico a partir de un par de fotografías, tomadas cada una de ellas desde una posición diferente, para ser observadas en forma separada por el ojo respectivo. De esta manera, cada ojo transmite al cerebro una imagen ligeramente diferente del otro, tal como lo hacen al observar los objetos tridimensionales. El cerebro interpretará entonces esas diferencias como diferencias en la profundidad, y formará un modelo estereoscópico en la mente del observador [24].

La estereofotogrametría se ha llevado a cabo por las siguientes técnicas:

- La fotogrametría analógica.
- La fotogrametría analítica.
- La fotogrametría digital.

Esta última (la fotogrametría digital), ha sostenido un auge destacado por el gran desarrollo computacional existente en la actualidad y como consecuencia, crecen los niveles de explotación de las imágenes, permitiendo con ello la generación automática de modelos tridimensionales, elevaciones de terrenos, ortoimágenes, entre otras.

2.2.2 Escáner 3D

En la actualidad generar modelos tridimensionales de muestras geométricas, son inmensamente requerido tanto por laboratorios de investigaciones, y en la gran industria, debido a la amplia gama de aplicaciones [26].

El escáner en cuanto a al funcionamiento, analiza uno o varios objetos para reunir los datos y algunas características tales como: dimensiones, volúmenes y forma. El principal objetivo dentro de la funcionalidad de un escáner 3D, es generar una nube de puntos de las muestras geométricas de la superficie escaneada. Estos puntos son utilizados posteriormente para el proceso de reconstrucción, logrando entregar en el modelo CAD, la representación en el espacio tridimensional, cada uno de los puntos analizados del objeto sujeto al proceso de escaneo [26] [27].

Actualmente existen varios tipos de escáner 3D, los cuales entregan como resultado, modelos muy precisos, y cuya tecnología de trabajo permite capturar la información sobre el color, por lo que los modelos obtenidos son completamente realistas y proporcionados. Las grandes mayorías de los escáneres disponibles, necesitan un proceso previo de alineación, aquellos con plataforma, necesitan de la utilización de varias fotografías tomadas con anterioridad al inicio de la operación. Existen diversas técnicas de reconstrucción tridimensional, estas se dividen en:

Técnicas de contacto:

Son las que exploran la superficie de los objetos por medio del contacto físico, típicamente una punta de acero duro o de zafiro. Con este tipo de escáneres se obtienen modelos muy precisos, por eso es usado sobretodo en la fabricación, que con una maqueta se obtiene el modelo 3D. Su mayor desventaja es que requiere el contacto físico con el objeto para ser escaneado, por lo que es peligroso con piezas antiguas de alto valor, por posibles daños [26] [28]. En relación a esto

último, se ha descartada la posibilidad de utilización de este tipo de escáner, puesto que la fragilidad y diminuto tamaño de las réplicas de orejas, no permitirían llegar a aquellas concavidades de interés.

Técnicas de no contacto (técnica no invasiva):

Es las más utilizadas en la industria, dentro de esta categoría utilizan la proyección de luz (denominada técnica óptica), que son muy populares debido a su versatilidad, economía y precisión. Los escáneres 3D sin contacto se pueden dividir en dos categorías principalmente, *escáneres activos* y *escáneres pasivos*, donde cada una de estas categorías recae en una variedad de tecnología. Los *escáneres activos* emiten alguna clase de señal y analizan su retorno para capturar la geometría de un objeto o una escena. Se utilizan radiaciones electromagnéticas (desde ondas de radio hasta rayos X) o ultrasonidos [26] [27] [29].

Escáner con método de triangulación:

Como su nombre lo indica, utiliza el principio de triangulación activa, basado en la aplicación de unas de luz por medio de un emisor láser sobre la superficie del objeto a escanear, posteriormente la luz reflejada del láser es captada por un sistema óptico (cámara digital), el cual a través de un sensor denominado dispositivo de acoplamiento por carga (CCD), que se encuentra dentro de la cámara, ubica las medidas de profundidad de la superficie inspeccionada como deformaciones de la luz láser. Las medidas son representadas en una señal de imagen digital, que contiene información referente a las coordenadas X, Y, Z del conjunto de curvas de la superficie escaneada.

Es importante mencionar que debido a las formas irregulares de los objetos escaneados, es altamente probable que determinadas zonas la superficie del objeto se encuentren ocultas desde la posición del escaneo; haciéndolas invisibles para el recorrido del láser; por lo que dichas partes se denominan zonas oscuras [26] [29]. En base a esto último, es el tipo de escáner que más adecuado para el desarrollo de esta investigación, producto del objeto que se desea escanear (en este caso réplicas de orejas).

2.3 Conclusiones del capítulo

En relación a la información teórica entregada con respecto a ambas técnicas (fotogrametría y escaneo 3D), y con el apoyo de las investigaciones desarrolladas [7] [8], se define de forma general la metodología a seguir para la reconstrucción de los modelos 3D CAD.

En el caso de la fotogrametría, esta técnica debe ser apoyada por un potente software computacional cuyos algoritmos de reconstrucción en nube de puntos, malla y textura, logran la reconstrucción en detalle (tanto en forma como en dimensiones) que es parte de los objetivos de esta investigación, además de equipos técnicos (cámara fotográfica, iluminación, software, etc).

Con respecto al escáner, se identifica que la tecnología más semejante al requerimiento (escanear réplicas de pinnas), el cual es de técnica no invasiva y con tecnología de triangulación.

3 Metodología y desarrollo de trabajo

Como se ha mencionado anteriormente, el objetivo general de este trabajo es desarrollar la metodología para construcción de los modelos híbridos 3D CAD individualizado. Esto involucra la creación de los modelos tridimensionales asistido por computadora tanto de **cabeza** y de **réplicas de orejas** por separado, para posteriormente unir ambos CAD en un solo modelo 3D CAD híbrido.

Es importante explicar, que el desarrollo de la metodología, se realizó a lo largo de un año de trabajo, lo cual involucró cambios de parámetros en plena investigación (cantidad de fotografías procesadas, números de orbitas, puntos de control, actualización de software, etc). La determinación de los procedimientos, la preparación de la escenografía, modo de uso del software *3D Zephyr*, errores de modelos CAD en los primeros resultados, y la determinación de la metodología de trabajo de forma general, en el proceso de unión de los modelos tridimensionales son mostrados a continuación.

3.1 Configuración escénica para fotografías

La toma de fotografías tanto en los sujetos de pruebas, como en las réplicas de orejas de los mismos sujetos, son requerida para la utilización de la técnica de fotogrametría. Como se mencionó en el capítulo anterior, esta técnica requiere una gran número de imágenes (que en este caso serán fotografías del sujeto), donde el porcentaje de traslape entre cada fotografía debe al menos ser de 80%, desde diferentes ángulos [8]. Para este procedimiento se tiene en consideración lo siguiente:

- La cámara fotográfica estándar DSLR (*Digital Single Lens Reflex*), marca *Canon 500D*.
- Lente *Tokina 16-50 mm f/2.8 @ 50mm*.
- Flash Lumo Pro LP180
- Paraguas difusores de fotografía.
- Proyector de iluminación apuntando hacia la cabeza del sujeto a prueba.
- Silla giratoria.
- Modelo, que debe utilizar una gorra plástica, y debe mantener una postura recta al estar sentado durante toda la sesión.

En base a la recopilación de antecedentes y experiencias de trabajos anteriores [8], más el desarrollo de diferentes pruebas realizadas en el laboratorio, se determina la configuración utilizada en la cámara, la descripción se detalla en la Tabla 3-1.

Tabla 3-1: Configuración de cámara DSLR canon 500D.

Distancia objeto/cámara	Tiempo de exposición	Apertura diafragma	ISO	Tiempo de disparo
1 metro	1/60	F 14	400	2 segundos

El sujeto que se someterá a prueba utilizará una gorra plástica, que previamente es marcada con una gran cantidad de puntos. De esta forma, los puntos dibujados sobre la gorra disminuyen el tiempo de procesamiento, agilizando el algoritmo en la realización de *matching* de puntos de las fotografías a procesar.

Las sesiones son organizadas con tres diferentes orbitas de elevación dispuesta por la cámara, en relación al eje vertical. La cámara estará fija sobre un trípode, y el sujeto sentado sobre una silla giratoria (técnica que se utilizará para la obtención del modelo 3D CAD).

En cada disparo, el modelo debe girar en aproximadamente unos 18°, la muestra total de cada sesión tiene un total de 60 imágenes, idealmente 20 por cada posición o nivel de altura que cambia de la cámara con la ayuda del trípode. Esta configuración en particular fue utilizada para el desarrollo de trabajo denominado “*Repetitividad individual*”. Posteriormente se efectuaron modificaciones en la cantidad total de fotografías y en número de órbitas con las que fueron obtenidas, cambios que en definitiva son parte de la metodología final de esta investigación. Las diferencias de parámetros descritos, se observan en la siguiente Tabla 3-2.

Tabla 3-2: Configuración escénica para las fotografías, en primera instancia de estudio, y configuración definitiva para la metodología.

Técnica turntable	Primer set de configuración	Set de configuración definitiva
N° fotografía	60	120
Orbitas de disparos	3	4
Grados de giros	18°	12°

La Figura 3-1, muestra un esquema de predisposición del sujeto ante lo descrito anteriormente, y cuya configuración es idéntica (en esquema) a la que se somete las réplicas de orejas 3D.

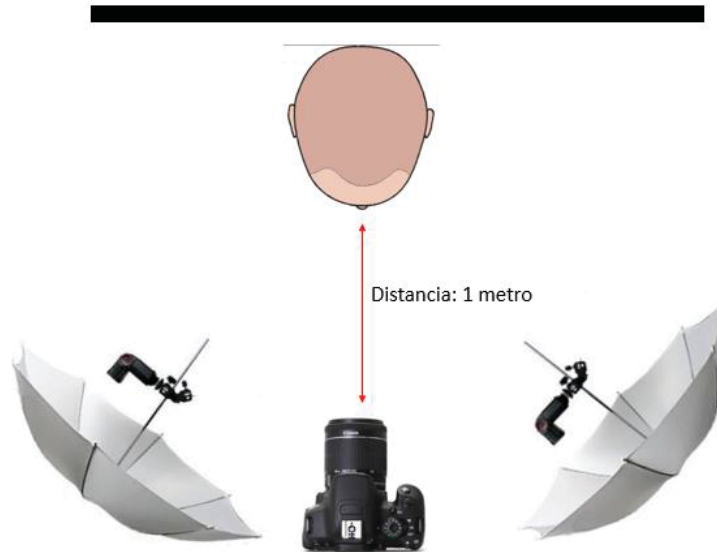


Figura 3-1: Representación de cámara, flash, fondo y sujeto sometido a prueba.

Con respecto a la preparación en el sujeto, este además de la gorra plástica, debe ser sometido a una serie de marcaciones en el rostro (puntos de control). Inicialmente se seleccionaron lunares de los sujetos, y las orejas eran introducidas dentro de la gorra. Posteriormente se estandarizaron puntos definidos para todos los sujetos, y la exposición de las orejas fuera de la gorra de plástico, tema que se describe más adelante durante este informe.

El objetivo de estos puntos dispuestos en el rostro del sujeto, es medir distancia entre ellos (uniones de puntos que forman segmentos), registrar esa medida en el "sujeto real", para luego medir los mismos segmentos, pero en el modelo 3D CAD y de esta forma calcular el error de deformación causada por la reconstrucción de los modelos tridimensionales en la computadora.

La Figura 3-2, muestra la disposición de la gorra plástica y los puntos seleccionados en el rostro del sujeto a prueba.



Figura 3-2: Preparación del modelo con puntos designados en el rostro, exposición de orejas y líneas en la gorra plástica.

3.2 Software 3D Zephyr

En cuanto al procesamiento de las imágenes por medio de la utilización de fotogrametría, se usó el software *3D Zephyr*. Con respecto a los algoritmos desarrollados por este programa, se han mostrados mejoras en las diversas versiones. Si bien cada actualización, detalla diferentes nuevas herramientas, el funcionamiento base sigue siendo el mismo [30]. La información sobre el uso y las especificaciones en profundidad de este software, serán expuesto en el apéndice de este trabajo.

El *3D Zephyr*, posee un conjunto de herramientas con diversas configuraciones preestablecidas, aunque en este estudio fue necesario estudiar y determinar configuraciones específicas. La reconstrucción tridimensional se enfoca principalmente en seis procedimientos, de los cuales las más significativas y configurables son las últimas cuatro. Las etapas que ejecutadas por el software, son las descritas en la Figura 3-3.

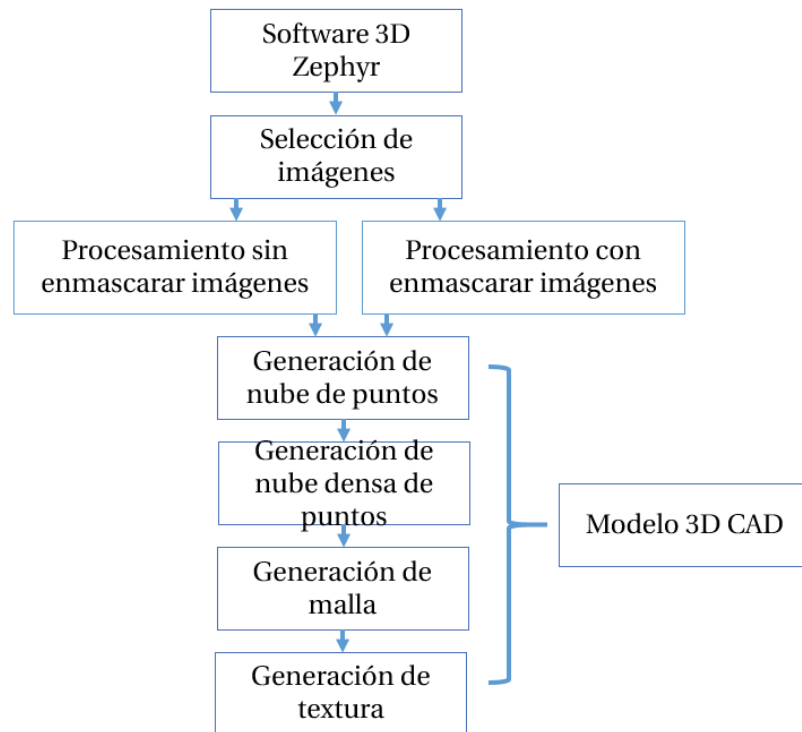


Figura 3-3: Esquema de procedimientos ejecutados por el software *3D Zephyr*.

Los principales procesos que ejecuta este programa, son los descritos a continuación:

Samantha (structure from motion)

Samantha, es como se le ha denominado a la estructura del movimiento, esta etapa es donde se realiza una recuperación automática de posición y orientación de las cámaras utilizadas. Este

procesamiento es en base a un conjunto de imágenes en orden aleatorio, y el programa genera una **nube de puntos** tridimensional. El encargado de realizar este procesamiento es un algoritmo que relaciona puntos clave entre cada una de las imágenes, se le denomina árbol binario (donde cada hoja es una imagen única y los nodos son reconstrucciones parciales). Se recomienda la mayor cantidad de fotografías para una gran suma en cantidad de datos posibles en el inicio de la reconstrucción.

Stasia (Multi-View Stereo)

Es la denominación que se le entrega a la generación de nube densa de puntos tridimensional, altamente precisa. Esta etapa aprovecha el potencial entregado por Samantha, el algoritmo utiliza la información de cada pixel individual de las imágenes utilizadas para generar la superficie tridimensional.

Sasha (Mesh- Extraction)

Es el nombre del algoritmo de extracción de superficie, en la etapa anterior se recopilan los datos de una densa nube de puntos, y con esta información se preserva la mayor cantidad de detalles a través de la extracción de superficie. Cada polígono malla, obtiene la textura, donde además es complementado con un algoritmo de balance de color, el ajuste del color de cada pixel es de forma automática, y depende de los cambios de iluminación de cada una de las fotografías.

Es importante que cada una de estas etapas, sea configurada detalladamente para éste trabajo de investigación. Si bien, el programa tiene incorporado una modalidad de usuario cuyas configuraciones están determinadas de forma automática, se puede omitir detalles importantes que es necesario corregir mediante la interiorización del manejo del software.

Se recomienda explícitamente que las imágenes sean tomadas con una buena iluminación, evitar las sombras del objeto que se desea trabajar. Una cámara de gama alta, no siempre conduce a un mejor resultado, y el rendimiento de una cámara no es proporcionado por la resolución de megapíxeles. Evitar fotografías borrosas, tener una cantidad de solapamiento entre 80 y 90 % (siendo esto una de las reglas fundamentales para una reconstrucción exitosa). Evitar altos valores de ISO, puesto que el ruido afecta considerablemente en la *structure from motion* [30].

Con respecto al lente a utilizar, se recomiendo explícitamente mantener una misma distancia focal para todas las imágenes. En el caso de objetos de mediano y pequeños tamaños, es recomendable mantener la cámara en una posición fija con ayuda de un trípode, y el objeto sobre alguna superficie movable (técnica de mesa giratoria). Los objetos planos y uniformes de texturas, no son recomendables, tampoco los objetos transparentes [8] [30].

3.3 Procesamiento y construcción de modelos 3D CAD

La digitalización de los datos y luego la reconstrucción de estos, son ejecutados mediante el uso de poderosos softwares, los cuales posibilitan entre otras cosas: reconstruir, editar, realizar simulaciones, obtener mediciones, entre otros.

Cada tecnología de procesamiento de imágenes y construcción de modelos tridimensionales, logran establecer características que diferencian la utilización específica de los modelos, los cuales son exportados en diferentes tipos de formatos, y que gran parte de estos archivos, son utilizados e importados por otros programas computacionales.

La importancia de lo mencionado anteriormente, recae en este trabajo, cuyos modelos construidos serán utilizados por medio de trabajos futuros, a simulaciones acústicas, por lo cual, los resultados de los modelos deben presentar el menor error posible en puntos específicos, y de esta forma, evitar la incompatibilidad de los modelos entregados con las proyecciones de los trabajos a desarrollar.

3.3.1 Modelos 3D CAD de cabeza

Las fotografías procesadas y sometidas a las diversas etapas descritas en la sección anterior, dan como resultado el modelo 3D CAD. Se reitera que este trabajo, es a través de la técnica de fotogrametría, asociado a diversos modelamientos matemáticos, y en cuanto a los primeros resultados, se estableció un estándar en los diferentes parámetros y etapas propias del software [30]. En la Figura 3-4 se muestra uno de los primeros resultados, y se destaca las tres principales etapas de procesamiento del software.

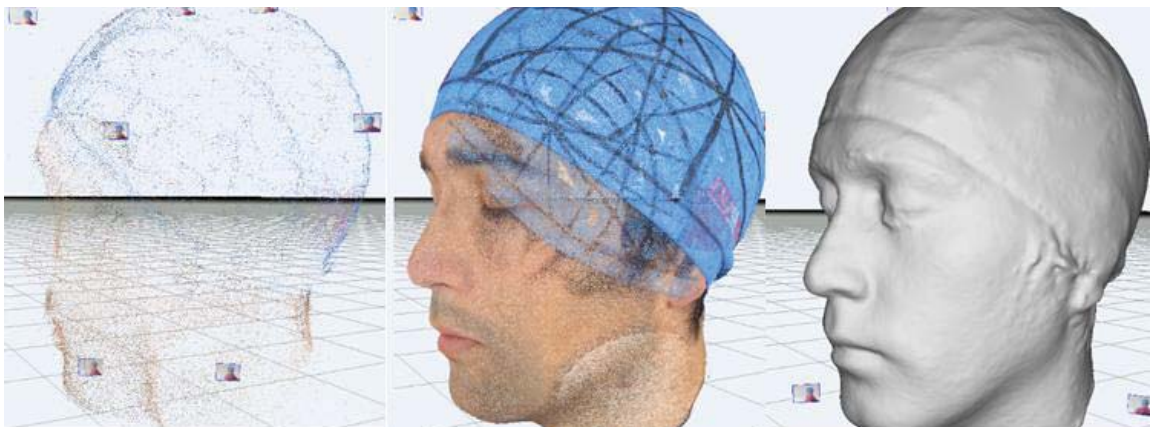


Figura 3-4: Modelo 3D CAD de izquierda a derecha; nube de puntos, nube densa de puntos, textura de malla.

3.3.2 Variaciones en la técnica

Como se mencionó en las diferentes entregas, la investigación ya cuenta con una técnica definida para la obtención de datos para la generación de modelos 3D CAD, no obstante, se mantiene el perfeccionamiento de la técnica, implementado modificaciones y/o nuevos métodos, así como también algunas variaciones en que logren aportar nuevas mejores para los próximos modelos. Dando como una respuesta final, la entrega de la información de cómo realizar el trabajo de generación de modelos, ahorrando de forma general recursos y la mayor disminución posible de error.

Las primeras modificaciones pasan por medio de las actualizaciones en las versiones del software *3D Zephyr*, los cuales involucran principalmente;

- Mejoras en velocidades, en etapas de SFM y MVS.
- Mejora de procedimiento de eliminación de ruido durante la fase MVS.
- Corrección en fallo en la selección de puntos de control.
- Corrección de filtros de orificios llenados.
- Mejora en la presentación en la nube de puntos.
- Reducción de tiempo en el procesamiento de forma general.

Como se indicó en la Tabla 3-2, las cantidades de fotografías a procesar, se aumentó, así como también el número de órbitas de las tomas de fotografías para abarcar una mayor cantidad de ángulos superiores (para la reconstrucción de la parte superior de la cabeza), ángulos laterales (mejoramiento en la definición en la punta de nariz), y ángulos inferiores (mayor información para reconstrucción del mentón de los sujetos puesto a prueba).

Otras de las propuestas para los nuevos modelos, consiste que las sesiones de fotografías de los individuos, deben tener expuestas ***ambas orejas fuera de la gorra*** de goma, para ser captadas por la diferentes tomas de fotografías.

De esta manera, se simplifica la tarea de reconstrucción de los modelos enteros, puesto que una de las grandes dificultades, es en relación a unión de las pinnas en la cabeza. Al tener ambas orejas expuesta en la sesión fotográficas, las imágenes son procesadas y reconstruyen las orejas, si bien estas no llegan a una calidad necesaria para este estudio (puesto que existen recovecos no definidos), son una “pauta” e importante referencia, que se asume para alineación en el momento de juntar orejas más cabeza (proceso final de modelos 3D CAD). Lo descrito se puede apreciar en la Figura 3-5.

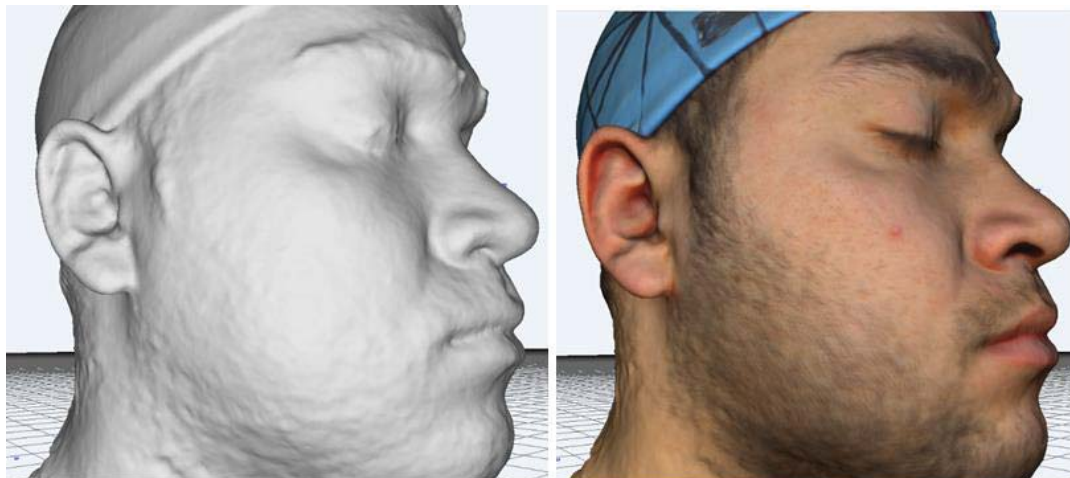


Figura 3-5: Modelo 3D CAD, donde la reconstrucción es de alta definición con respecto a las facciones del individuo, especialmente en las orejas que están expuesta afuera de la gorra.

La Figura 3-6 muestra con mayor detalle los resultados de los modelos CAD con ambas orejas expuestas (fuera de la gorra plástica utilizada por el modelo), utilizando la técnica de fotogrametría directa, es decir, sin necesidad de hacer el modelo híbrido.



Figura 3-6: Pinnas del modelo fotografías 139 procesadas, se observan algunos recovecos, pero sigue siendo insuficiente para los modelos requeridos en esta investigación.

Aun cuando se logra una mejor definición de las orejas, estas no pueden ser consideradas para los modelos 3D CAD finales, debido a que los recovecos siguen sin ser representados, pues es necesario mantener la técnica híbrida, proceso que involucra la obtención de los modelos CAD de ambas orejas y cabeza por separados, para luego realizar la unión de los modelos en una etapa final.

3.3.3 Modelos CAD defectuosos

A continuación, se exponen de forma detallada los diferentes modelos defectuosos obtenidos mediante la construcción de numerosas pruebas a lo largo de la investigación, y cuyos resultados fueron estudiados y analizados con tal de encontrar las respectivas soluciones a los modelos.

Gran cantidad de los modelos finalizados, presentaban rugosidades y curvaturas representadas sobre la gorra. Luego de diversos y numerosos análisis de estudio de estos resultados, se determinó que era producto de los puntos marcados previo a las fotografías. Para la corrección de este tipo de problema es necesario modificar los parámetros de cada una de las etapas, y aumentar algunos filtros de ruidos.

Otro de los problemas es la presencia de huecos en sectores de la cabeza, lugar donde la nube densa de puntos no detectaba información proveniente de las fotografías, lo cual conlleva un error generalizado para las posteriores etapas. La punta de la nariz, y labios, son consideradas las partes más sensibles, producto que el enfoque de la cámara es en el centro del rostro. A medida que el modelo gira este punto de enfoque también varía y no necesariamente queda centrado en la nariz. Para la solución de este tipo de error, fue necesario incorporar más iluminación (a modo de ayuda para el auto-enfoque de la cámara). Los errores obtenidos son mostrados en la Figura 3-7 cuyo mejoramiento es corregido posterior a la mayor iluminación y mayor cantidad de fotografías de perfil y desde una órbita con una altura mayor.

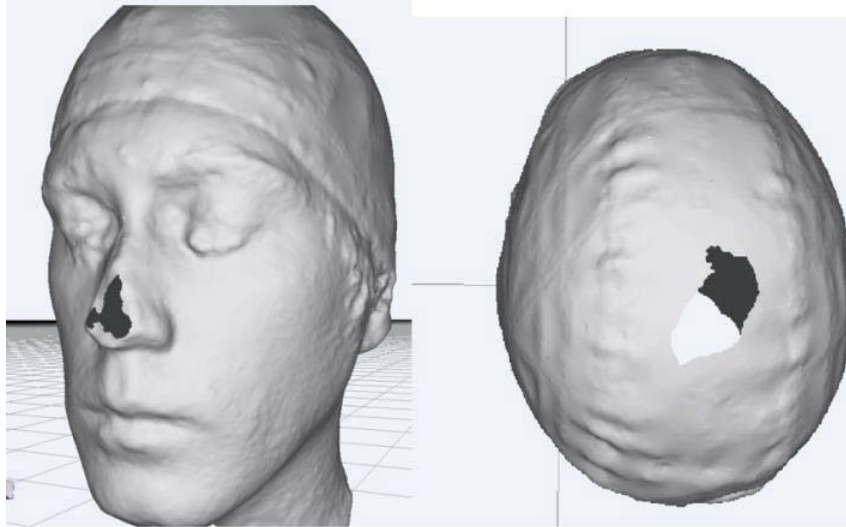


Figura 3-7: Resultados de modelo 3D CAD producto de poca iluminación y falta de cantidad de fotografías por sobre la cabeza y en la punta de la nariz.

Otro de los resultados erróneos, se presentó producto de la utilización de una gorra plástica que contenía impresa la marca del fabricante, esta era visible en ambos costados de la cabeza del sujeto sometido a prueba, similar a como se observa en la Figura 3-8.



Figura 3-8: Simetría en ambos costado de la marca del fabricante de la gorra.

Esto afectó de tal forma, que los algoritmos del software utilizado para la reconstrucción 3D por medio de fotogrametría, identificaba estas marcas en tan solo uno de los costados de la cabeza del sujeto. Este detalle de la marca en ambos costados de la gorra, implicaba que los resultados fuesen procesado erróneamente entregando un modelo deforme, y cuya característica representaba una imagen similar al de un reflejo en un espejo plano, tal como se observa en la Figura 3-9. Para corregir esta anomalía, se decidió utilizar una gorra sin marcas simétricas en los

costados y en las partes frontales, además de utilizar un material de menor brillo para la facilidad procesamiento del software.



Figura 3-9: Nube densa de puntos, con error producido por la simetría de la gorra.

Finalmente, a modo de estudio, se determinó realizar una simulación completa, con los máximos parámetros de cada etapa. Los resultados indican que esta opción no es válida ni adecuada para los objetivos de este trabajo, ya que el software sufre una saturación de información entregando modelos 3D CAD defectuosos, de los cuales no es posible distinguir los detalles del rostro (ojos, nariz, mentón, pómulos), producto del alto ruido de los resultado CAD, tal que se muestra en la Figura 3-10.

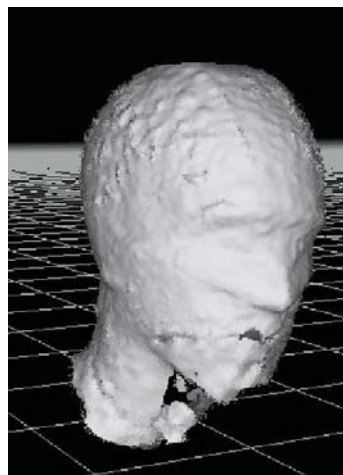


Figura 3-10: Resultado de modelo 3D CAD con parámetros de máxima resolución en todas las etapas de reconstrucción.

3.4 Réplicas humanas y 3D CAD

Se expondrán las metodologías definidas tanto para las obtenciones de réplicas humanas, como también la reconstrucción de los modelos 3D utilizando ambas técnicas (fotogrametría y escáner 3D), dando un importante énfasis a la tecnología del escáner 3D.

3.4.1 Obtención de réplicas 3D humanas de pinnas.

La dificultad de esta investigación, en la creación de modelos 3D CAD individualizados híbridos, es principalmente en las pinnas. Para realizar este trabajo, se especificó la metodología de obtención, con la utilización de réplicas de yeso usando alginato como negativo. Se fundamentó la importancia de obtener réplicas con el menor error posible, ya que, para estudios acústico la morfología de la oreja (concha, hélix, trago, fosa triangular, entre otras), afectan en resonancia, difracción, reflexión, las cuales alteran la percepción de la dirección del sonido, y por consecuencia la HRTF [17].

Si bien las primeras pruebas de réplicas se basaron en la utilización de orejas artificiales GRAS, a modo de estudio de mediciones y comprobación del uso de los materiales, se creó una metodología para la obtención de réplicas en orejas humanas.

La elección de los participantes se determinó principalmente por la examinación realizada por una profesional especializada en temas de salud auditiva. El examen consistía en la revisión del conducto auricular con la utilización de *otoscopio*, y de esta forma descartar posibles anomalías



Figura 3-11: Examen de otoscopia en los posibles participantes

La necesidad de este examen, radica en asegurar las condiciones normales de los participantes, previo a sacar las réplicas de orejas con el alginato. Es preciso indicar, que, en todo momento la preparación de los participantes era supervisado por la persona encargada de tomar la muestra, y como principal medida de seguridad, era necesario introducir tapones de algodón para evitar el ingreso de alginato al conducto auditivo en ambas orejas del sujeto sometido a prueba.

Como se observa en Figura 3-12 es el esquema explicativo del procedimiento que fueron sometidos todos los participantes, y que además se utilizó el mismo proceso en las orejas artificiales de silicona denominadas orejas GRAS.

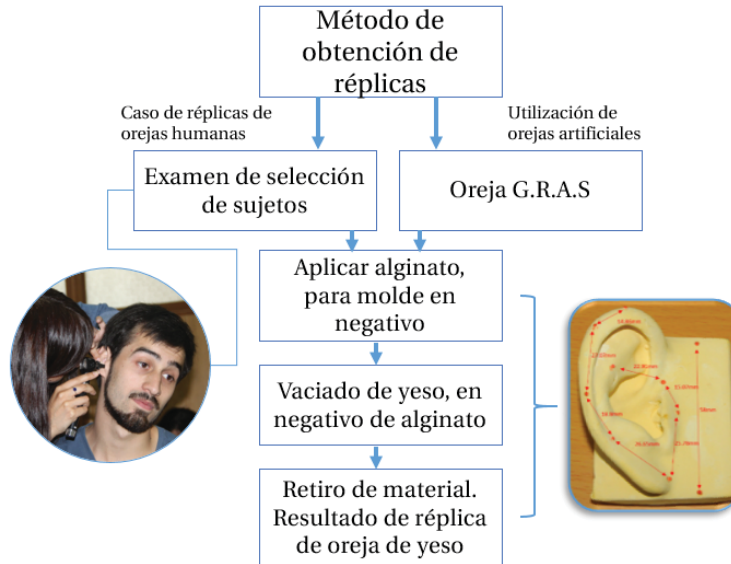


Figura 3-12: Esquema de proceso de obtención de réplicas de orejas de yeso.

Para los casos donde las orejas del sujeto, presenta curvaturas muy pronunciadas y donde a través de las fotografías no es posible visualizar, es necesario realizar cortes en el molde de alginato, donde los resultados en las réplicas de yeso quedan cortados, para luego realizar fotogrametría a los cortes. Lo representado en la Figura 3-13, consiste en los cuatro tipos de cortes que se realizan al negativo de alginato para recopilar la información de “curvas profundas” de las orejas.

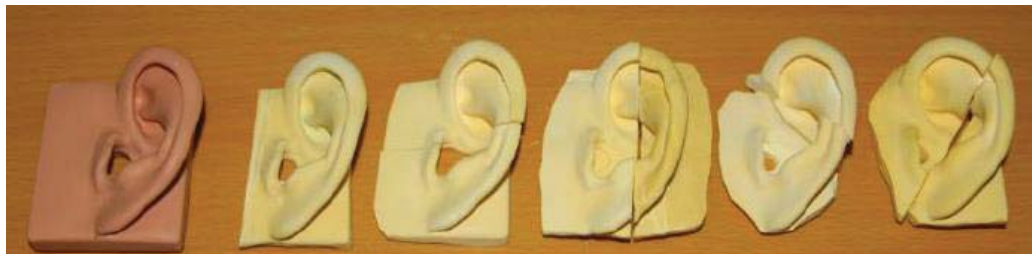


Figura 3-13: De izquierda a derecha réplicas de orejas GRAS, corte horizontal, vertical y diagonales.

3.4.2 Modelo CAD de Réplicas orejas

Para la reconstrucción 3D CAD en las *pinnas*, se utilizó fotogrametría a con el uso del software 3D Zephyr, y el escáner NextEngine 3D. El trabajo realizado con el 3D Zephyr, las configuraciones son idénticas a las utilizadas con los modelos CAD de cabeza, de lo cual se describió anteriormente.

La utilización del escáner, posibilita digitalizar las réplicas en una sola pieza, lo cual entrega resultados altamente definidos en las concavidades de mayor complejidad. El modo de operación del escáner NextEngine 3D, es con el barrido del objeto a escáner a través de los láseres incorporados, además de la captura de imágenes con una serie de cámaras (también incorporadas) que identifican el objeto y trabajan en la triangulación (laser, cámaras y distancia

de objeto), para la adquirir los datos de forma automática, además el giro realizado por la plataforma giratoria, también queda designado según la previa configuración que se indica en la Tabla 3-3.

Tabla 3-3: Caso de mayor cantidad de datos adquirido por el escáner, consecuentemente es el de mayor tiempo de trabajo.

Tipo de configuración	Parámetros
Familia de escaneo	A-B-C-D-E
Posición	360°
Divisiones	16
Puntos/ IN2	67.000
Tiempo	156 minutos

El escáner 3D a través del su propio software, comienza a generar una nube densa de puntos, el programa permite ir visualizando la construcción del objeto (en este caso las pinnas sometida a escaneo) en tiempo real, además de otras alternativas de pre visualización (malla y textura a color). El software da la posibilidad de obtener una “*familia de escáner*”, las cuales se identifican como: A, B, C, D, E. Dentro de cada una de estas *familias de escáner*, se observan las tomas escénicas denominadas “Divisiones”, en cada división el escáner hace una toma fotográfica.

Los modelos tienen como principal variable el tiempo de operación. Dependiendo de cuantas *familias de escáner* se necesitan realizar, tipo de *posición de escaneo*, cuántos *puntos por pulgada cuadrada*, y el tipo de *objetivo* se está escaneando, determina el tiempo de trabajo del proceso de generación de un modelo 3D CAD, tal como se aprecia en Figura 3-14.



Figura 3-14: Proceso de adquisición de datos, por medio de los láseres del escáner NextEngine 3D.

Es preciso indicar, que se trabajó con dos plataformas; la primera es plana y solo permite realizar giros en 360° sin ángulos de elevación, lo cual limita las posibilidades de trabajo en áreas donde no era posible “barrer” con los láseres.

La segunda plataforma, permite (además de realizar giros en 360°) la elevación en -35° hasta los +35°, posibilitando escáner mayor cantidad de áreas de las pinnas. La Figura 3-15 muestra la plataforma descrita.

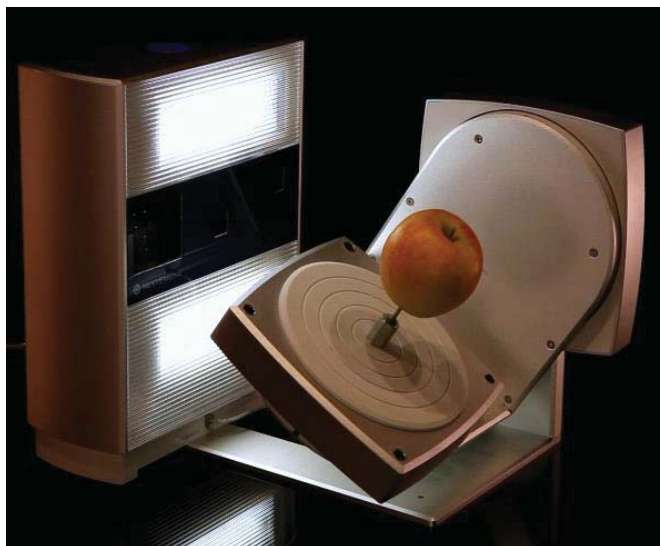


Figura 3-15: Escáner y plataforma *MultiDrive*, la imagen muestra la ejecución del proceso de escaneo.

Los resultados de reconstrucción tridimensional por medio de ambas técnicas (fotogrametría o escáner 3D), en cuanto a dimensiones, tamaño de archivo, cantidad de datos en la nube de punto y características cualitativas, son prácticamente idénticas. Uno de los resultados (por medio del escáner 3D), es expuesta en la Figura 3-16.

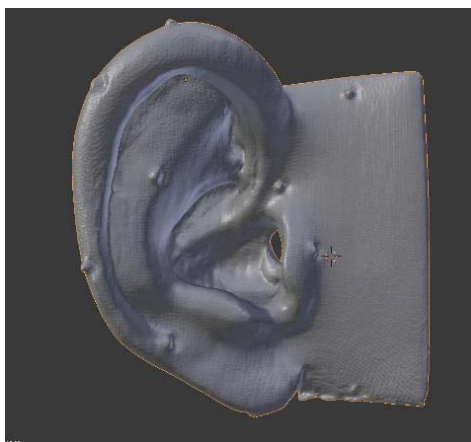


Figura 3-16: Modelo 3D CAD de réplica de oreja GRAS, generado por escáner 3D.

Los detalles técnicos del escáner NextEngine 3D, y algunas de las configuraciones específicas sobre la utilización de este, se describen en mayor profundidad en el apéndice de este informe.

3.5 Modelos 3D CAD híbridos

Es importante mencionar, que la utilización de los softwares de diseño, tales como Rhino y Blender, que son fundamentales en el proceso de edición y terminación de los modelos CAD, puesto que estos programas contienen “herramientas” para la unión de mallas (unión de cabeza con ambas orejas). Esto permite construir un solo archivo CAD de los modelos que han sido reconstruidos de forma individual y que finalmente deben unirse. Todos los archivos 3D CAD, serán exportados en un formato STL, ya que la universalidad de este formato, permite la utilización de los modelos en diferentes softwares de diseño, e incluso acústicos.

Finalmente se logra desarrollar la metodología, para la construcción de modelos 3D CAD híbridos, estableciéndolo siguiente:

- Técnica de alginato y yeso para la construcción de réplica de orejas humanas, previo al examen de otoscopia.
- Técnica de fotogrametría con 120 imágenes por sesión, utilizando 4 orbitas de altura para la toma de fotografías, gorra plástica, y puntos de control definido en la cara y en orejas del sujeto (previa medición de segmentos), y exposición de orejas fuera de la gorra.
- Versión del software *3D Zephyr* 3.0, aplicable tanto en cabeza como también réplicas de orejas.
- Escáner 3D no invasivo, activo, que en esta investigación es el NextEngine 3D, utilizado solo en réplicas de orejas.
- Utilización de software de diseño, que en este trabajo fue ejecutado Blender.

De lo mencionado anteriormente se puede dar inicio a la construcción de modelos finales 3D CAD híbridos.

3.5.1 Sesión fotográfica

Se elige a uno de los sujetos cuya preparación es la descrita en los puntos anteriores (gorras, puntos de control, etc.). En la Figura 3-17, se muestra una imagen capturada en plena sesión de fotografía realizada en el laboratorio.



Figura 3-17: Sesión de fotografía realizada en laboratorio de acústica y vibraciones, PUCV .

3.5.2 Modelo CAD

Una vez finalizada la sesión de fotografías (en total 120 por sesión), se continúa con el procesamiento de las imágenes en el software 3D Zephyr, en cada una de las etapas mencionadas anteriormente. El resultado final CAD no híbrido es presentado en la Figura 3-18, se aprecia la distribución de fotografías en las cuatro orbitas en las cuales fueron tomadas las imágenes (cuatro alturas de trípode con cámara montada).



Figura 3-18: Modelo 3D CAD no híbrido. Imagen capturada desde software 3D Zephyr con proyección de disposición de orbitas de cámaras.

Es importante mencionar, que este resultado del modelo CAD tridimensional (no híbrido), presenta mínima definición en las curvaturas de las pinnas del sujeto, especialmente en lo que es la Fosa triangular, Trago y Antihélix. Con este tipo de resultado se descarta a posibilidad de utilizar esta metodología no híbrida, para la reconstrucción de los modelos 3D CAD individualizado, producto de la falta de información y definición en ambas orejas.

3.5.3 Réplicas de pinnas

En cuanto a las orejas del sujeto, fueron replicadas con la técnica de alginato y yeso. Para esto fue necesario el diseño de varias cubetas (las cuales fueron creadas con la impresora 3D) que cumplen la función de recipiente para el vaciado del alginato, y evita el derrame hacia fuera de la zona requerida (pabellón auricular). Se realizaron cuatro diseños, las cuales contenían cortes; horizontal, vertical, y dos cortes en diagonal. La utilización de estas cubetas mencionadas posibilitaron la obtención de réplicas como las mostradas en la Figura 3-13 utilizando las orejas GRAS como modelo.

Para el caso de las orejas humanas, la cubeta es sostenida por el mismo sujeto, hasta que se realiza el vaciado de alginato, el cual es de secado rápido (3 minutos aproximadamente), lo descrito se observa en la Figura 3-19.



Figura 3-19: Vaciado de alginato en la oreja del participante (el cual sostiene una cubeta diseñada especialmente para la técnica).

Al retirar la cubeta, se procede con el vaciado de yeso, luego de un par de horas, se retira el alginato, y dan como resultado la réplica 3D de oreja. Estas réplicas son posteriormente procesadas con fotogrametría o escáner 3D, de esta manera se obtienen los modelos 3D CAD de cada una.

3.5.4 Unión y modelo híbrido

Una vez ya obtenidos los modelos 3D CAD, tanto de cabeza como de orejas, ya sea por cualquiera de las dos técnicas (fotogrametría o escáner 3D) se procede a la unión de estos modelos.

Es entonces en esta etapa donde el protagonismo pasa directamente por los puntos de control puesto en el rostro y orejas del sujeto. Estos puntos logran hacer el calce altamente preciso entre las orejas generadas directamente por la cabeza y las obtenidas desde las réplicas de oreja. El proceso se realiza en primera instancia en el software *3D Zephyr*, para posteriormente exportarlos por separado, ya que este software no tiene la capacidad técnica de unir los trabajos en una sola malla. El proceso de montaje y superposición realizado en el *3D Zephyr* es observado en la Figura 3-20, donde se aprecia el detalle de los puntos de control puesto en las orejas y rostro del sujeto.

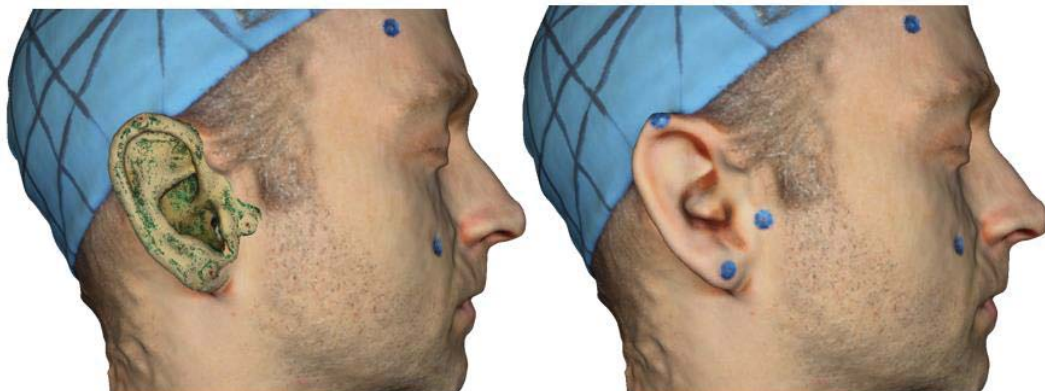


Figura 3-20: Superposición de réplica de oreja CAD en las orejas del modelo CAD de cabeza.

Consecuentemente, con la exportación de los archivos (cabeza y ambas réplicas de orejas), en formatos STL, son importados en el software Blender, donde se procede a realizar el proceso de unión de orejas. Al unir las ambos archivos de orejas en la cabeza, se selecciona la herramienta “*join*” propia del software, y queda en un único archivo STL, finalizando de esta manera el modelo 3D CAD híbrido final, tal como se muestra en la Figura 3-21.

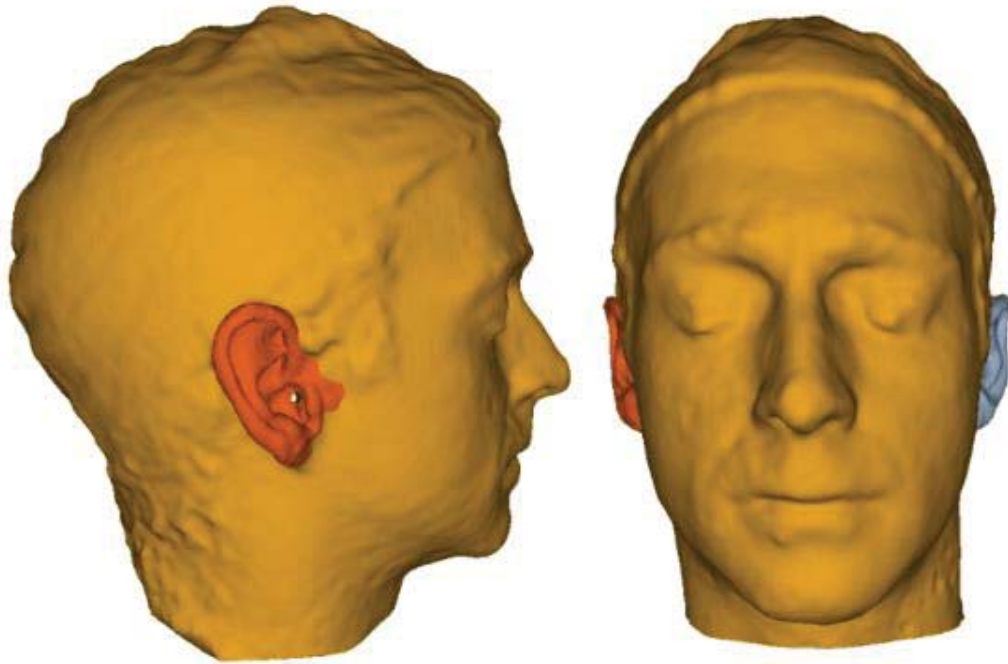


Figura 3-21: Modelo 3D CAD híbrido de orejas y cabeza.

Se puede apreciar que son de diferentes colores para distinguir la procedencia de diferentes archivos CAD, lo cual destaca la reconstrucción híbrida del modelo final.

Los archivos STL de los modelos 3D CAD híbridos finales, posibilita la impresión de estos modelos, por medio de impresoras 3D. Esta iniciativa fue realizada durante el desarrollo de este trabajo, lo que para el caso de las réplicas de orejas resultó bastante productivo en unos de los trabajos de pruebas descrito más adelante durante esta presentación de informe.

Para el caso de los modelos de cabezas, estos solo fueron impresos a pequeña escala, de aproximadamente unos 10 [cm] de altura y de unos 60 [gr] y fueron entregados a todos los participantes (aceptados previo al examen de otoscopia), en forma de agradecimiento. Es importante mencionar que las impresiones entregadas están construidas de un material plástico de características biodegradable conocido como PLA. El ácido poli-láctico (PLA) tiene como principal característica la no emisión de gases nocivos (esto es ventajoso para imprimir en espacios cerrados), además brinda una mayor cantidad de colores. Es importante mencionar que

se ha seleccionado este material ya que no requiere impresora con base caliente u otro tipo de características, es decir, se puede utilizar en cualquier tipo de impresora 3D.

Los resultados son visualmente muy detallados en la zona del rostro y las pinnas, pero estas impresiones son frágiles y vulnerables a la calidad de impresión que se selecciona y de igual forma al tipo de gama de impresora 3D, ya que en el mercado existe una gran cantidad de variedades las cuales se diferencian en el grado de precisión de las impresiones.

3.6 Conclusiones del capítulo

Lo descrito durante este capítulo, es el trabajo teórico y práctico desarrollado durante gran parte de esta investigación que describe los procedimientos, las mejoras realizadas en las técnicas, los primeros resultados con los respectivos errores que obtuvieron producto de diferentes problemáticas y las soluciones de estos.

Finalmente, se puede describir que hasta el punto, el trabajo logra el objetivo general, y complementa lo realizado por otras investigaciones [8] [19], aunque probando una nueva técnica de obtención por medio de la utilización de escáner. En el caso de las pinnas, se proponen cortes para lograr una mayor definición de los recovecos en lugares donde la fotogrametría ni el escáner 3D pueden localizar información de datos, y en el caso de hacerlo, es de muy baja resolución. La posibilidad de unión de malla posibilita lo mencionado, puesto que, con los puntos de control, es posible unión todos los cortes de las pinnas.

El trabajo descrito con la utilización de los puntos de control, involucra el uso de software de diseño y cuyo formato de exportación de los modelos 3D CAD reconstruidos, son fundamental para posibilitar estas uniones en los diferentes softwares, es por eso que se elige el formato STL.

Con todo lo expuesto anteriormente en este informe, se concluye que la metodología desarrollada y aplicada, es convincente para los resultados esperados en el modelo híbrido final.

4 Pruebas y resultados

La metodología desarrollada y expuesta en el capítulo anterior, debe ser sometida a diversas pruebas, las cuales entregarán resultados para corroborar y calcular las fallas y errores que puedan existir en la reconstrucción de modelos 3D CAD. De esta forma, es posible garantizar y establecer la efectividad del método desarrollado, y determinar, si cumple con los actuales objetivos impuestos, y del mismo modo para los objetivos de trabajos futuros, especialmente los asociados a simulaciones acústicas.

La generación de réplicas (las cuales siempre tienen un margen de error), y la construcción de modelos en base a técnicas diferentes, son vulnerables a posibles fallas, errores e inexactitud. Es por eso que se decide realizar diferentes pruebas, y establecer cuantitativamente las diferencias existentes entre cada procedimiento de la metodología.

4.1 Análisis de distorsión en tamaños de réplicas de orejas 3D

Este trabajo, nace con la necesidad de comparar los tamaños generados de las réplicas de orejas 3D, realizadas con las dos técnicas. Lo más destacable dentro de este trabajo de análisis de tamaños, es que además de realizar las mediciones en las réplicas reales y con los respectivos modelos CAD (de esas réplicas), se logró realizar impresiones de los dos modelos mediante la utilización de una impresora 3D. Utilizando material biodegradable ácido poli-láctico (PLA), material que es usado en gran parte de la industria de las impresiones 3D, por sus ventajosas características.

Las pruebas y análisis son mediante:

- Réplica de oreja GRAS (modelo de prueba).
- Réplica de yeso.
- Modelo CAD desde fotogrametría.
- Modelo CAD escáner 3D.
- Impresión 3D por medio de técnica fotogramétrica.
- Impresión 3D por medio de escáner 3D.

Y cuya explicación para complementar la información lo indica el esquema mostrado en la Figura 4-1.

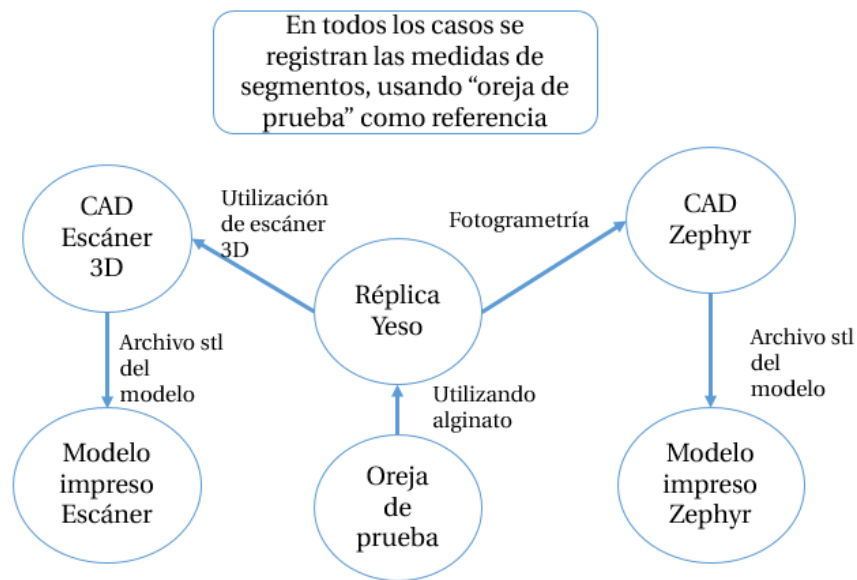


Figura 4-1: Explicación de trabajo realizado con réplicas de orejas.

Lo descrito en relación a las réplicas de orejas y sus respectivas impresiones 3D se presenta en Figura 4-2.



Figura 4-2: oreja GRAS, réplica de yeso, impresión desde la técnica fotogramétrica, impresión desde el escáner 3D.

Como se puede observar, en la oreja de prueba GRAS, se incorporaron puntos de control, estos fueron replicados a través de la técnica de alginato y yeso, y posteriormente reconstruidos por los modelos CAD, los cuales, al ser sometidos a impresión, estos están representados en la superficie (los puntos de control).

Previamente, fue necesario calcular el error de medición, el cual fue tomado con instrumento de medición (pie de metro digital), de precisión submilimétrica. Se realizaron 20 medidas con pie de metro al segmento de mayor longitud de la *pinna* de prueba, para medir el error existente.

Tal resultado registra que el error *promedio* de medición utilizando el pie de metro es de 0.22% y teniendo una *desviación estándar* de 0.27%.

En relación a los segmentos, estos fueron medidos en milímetros, la mayor longitud es el *segmento A* que mide 57,94 [mm], y el cual, a su vez, es utilizado como segmento de escalamiento para los modelos 3D CAD. Como dato complementario, el segmento de menor longitud es el *segmento es H* que mide 14.94 [mm]. En la Figura 4-3, se presenta un gráfico correspondiente al registro de medidas entre cada una de las *pinnas*, identificando a través de figuras a qué tipo de réplica corresponde. Es importante mencionar, que los segmentos visualizados en el gráfico, ordenados de forma decreciente en relación al tamaño.

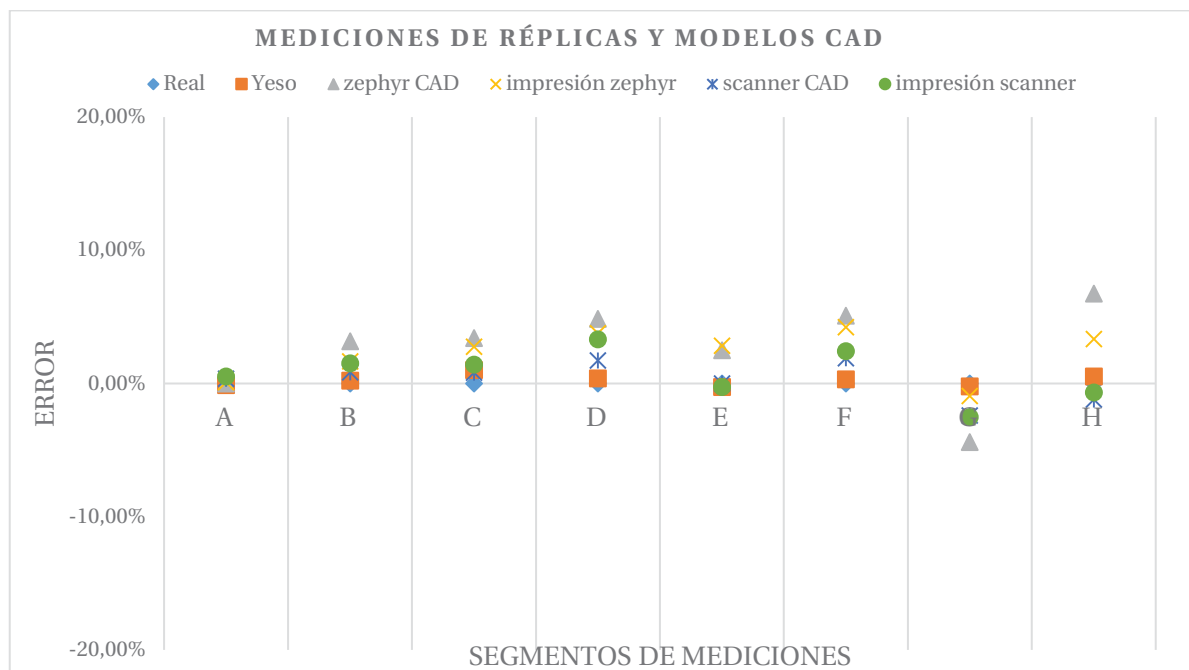


Figura 4-3: Medición de error entre réplica, modelos CAD y modelos impresos.

En cuanto a los resultados obtenidos en las réplicas de pinnas, modelos 3D CAD e impresiones de 3D mediante los registros de las longitudes de segmentos entre los puntos de control, indican que el error porcentual *promedio* de todos los segmentos medidos es de **1,90 %** mientras que la *desviación estándar* es de **1.18%**.

Estos resultados, prueban que la variación de tamaño entre las réplicas ya mencionadas, es de 1,71 [mm], lo que es el equivalente al 1,90%, considerando el segmento de mayor longitud para escalar los modelos.

4.2 Prueba de repetitividad

Una de las pruebas a las cuales se sometió la metodología de reconstrucción de modelos 3D CAD con la técnica de fotogrametría, es en base a la repetitividad. Busca determinar la efectividad del método realizándolo varias veces, pero manteniendo las mismas condiciones técnicas referente a iluminación, tipo de cámara, números de fotografías, puntos de control en el rostro, gorra plástica, entre otros. En otras palabras, es poder determinar qué tanto cambian los resultados, si él o los sujetos a prueba, se someten a una sesión de fotografías, generación de moldes de orejas de yeso y el procesamiento de las imágenes en el software, a diferentes horas, días, o meses, y calcular la variación de resultados.

Como en los inicios de la creación de la metodología y tras lo realizado en trabajos anteriores a modo de comprobación [8]. Se utilizarán los puntos de control seleccionados en la cara de los sujetos participantes, estos son medidos (segmentos medidos entre la unión de puntos). Tal como se muestra en la Figura 4-4.

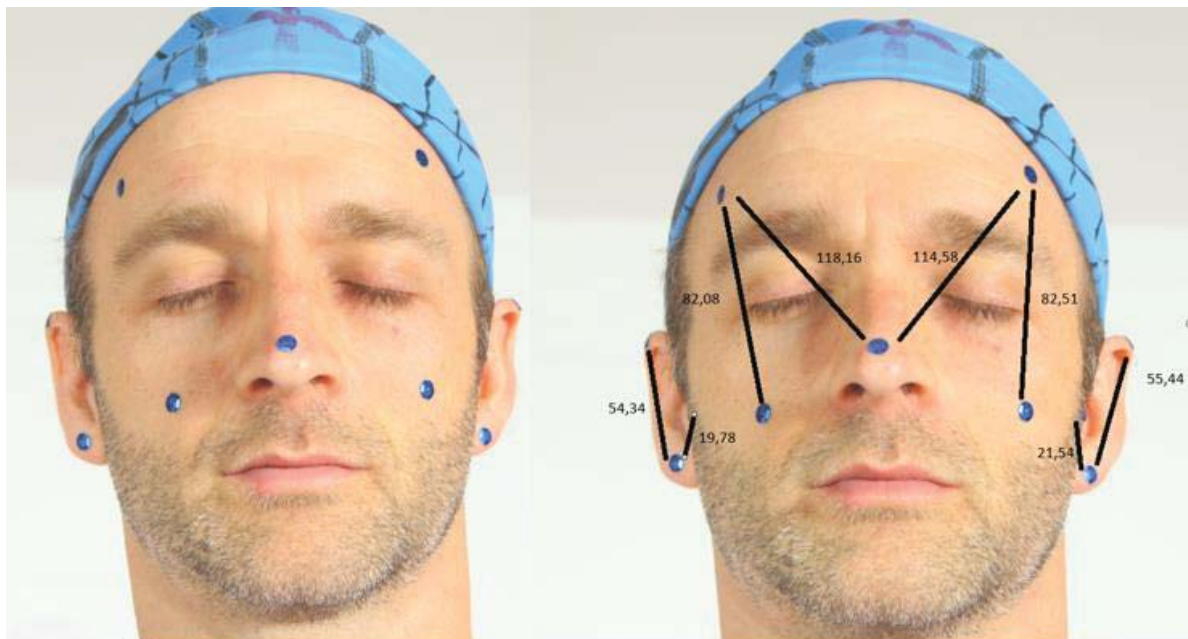


Figura 4-4: Puntos de control y medidas registradas en el sujeto, previo a la sesión de fotografía.

Luego, las distancias entre cada uno de los puntos son medidas (formando diferentes segmentos), y cuyo registro se adquieren desde el modelo 3D CAD. El software utilizado para la generación de modelos tridimensionales (3D Zephyr) cuenta con una herramienta que permite lo anteriormente descrito (ver en la Figura 4-5). Es importante precisar que previamente al registro y comparación de distancias entre los puntos que forman los segmentos, se debe forzar uno de los segmentos (registrar en el programa, una de las distancias reales del sujeto de prueba), como método de escalamiento, y se recomienda hacer el escalamiento del diseño generado, con el segmento de mayor longitud.

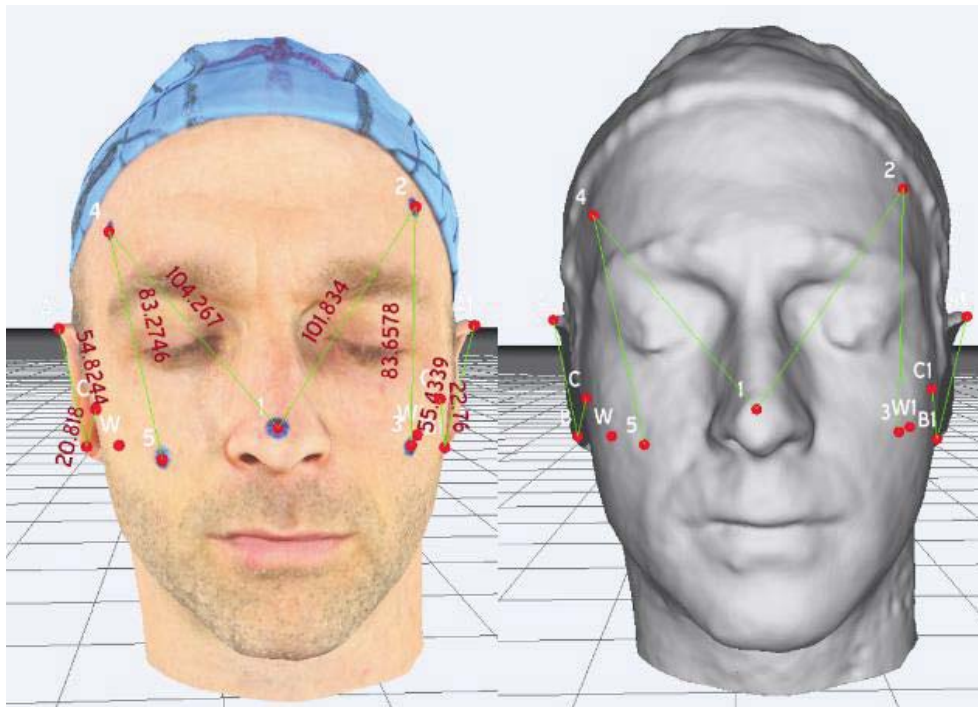


Figura 4-5: Mediciones de segmentos en puntos de control desde el modelo 3D CAD.

Este procedimiento, es el considerado para la verificación de carácter cuantitativo, pero es sumamente importante, visualizar los resultados cualitativos, puesto que ningún modelo puede resultar con fallas, ya sea de mala reconstrucción de nariz, presencia de agujeros en la parte superior de la cabeza u otras problemáticas descrita en el capítulo anterior.

Las medidas registradas en el rostro de los sujetos, se realizan con la ayuda de un instrumento de medición (pie de metro digital), el cual tiene indicador de hasta centésimas de milímetro, lo cual representa un alto grado de exactitud.

El trabajo de repetitividad consideró diversas variables para darle robustez a los análisis de resultados, estas variables son las siguientes:

- Sesión estándar.
- Sesión de reducción en resolución en imágenes.
- Sesión con menor cantidad de fotografías.

A continuación, describe los procesos de *repetitividad individual* y la *repetitividad colectiva*., donde las diferencias, radican en que, para la repetitividad individual, se consideraron aspecto de configuración con menor cantidad de fotografías a procesar, y una versión anterior del software 3D Zephyr, además de trabajar las cuatro sesiones con **solo un sujeto de prueba**. En cambio, en la repetitividad colectiva, se utilizó **tres sujetos** sometidos a cuatro sesiones en diferentes momentos, actualización del software 3D Zephyr en la última versión disponible, mayor cantidad de números de fotografías y la adición de una nueva orbita angular en las tomas fotográficas.

4.2.1 Repetitividad individual

Este trabajo de repetitividad individual, se usa la técnica de fotogrametría, y contempla cuatro sesiones de fotografías en diferentes días y bajo las mismas configuraciones escénicas (como lo mostrado en la Figura 3-1).

Fueron consideradas tres tipos de variables; la primera con *sesión estándar* y utilizado una cantidad de 60 fotografías, con tres orbitas de ángulos para la captura de estas. La segunda, *sesión de reducción en resolución de las imágenes*, y la tercera, *sesión con menor cantidad fotografías*.

En todas las sesiones, se consideraron un total de seis segmentos medidos previamente en el rostro del sujeto (con la ayuda de un pie de metro) sometido a prueba, donde el segmento de mayor longitud es el **C-D**, y que es utilizado en el modelo CAD para el proceso de escalamiento del espacio de trabajo, forzando esa medida identificada en el rostro del sujeto.

- Las longitudes de los seis segmentos en el rostro del sujeto, son denominadas; *Distancia real*.
- Para el caso de las longitudes de los segmentos generados en el modelo de reconstrucción tridimensional, son denominadas; *Distancia virtual*.

Ambas longitudes son registradas y calculando el error de medición entre los seis segmentos, no olvidando que el segmento C-D es el utilizado para escalar el modelo CAD. En la Figura 4-6 se explica el proceso del trabajo de repetitividad individual.

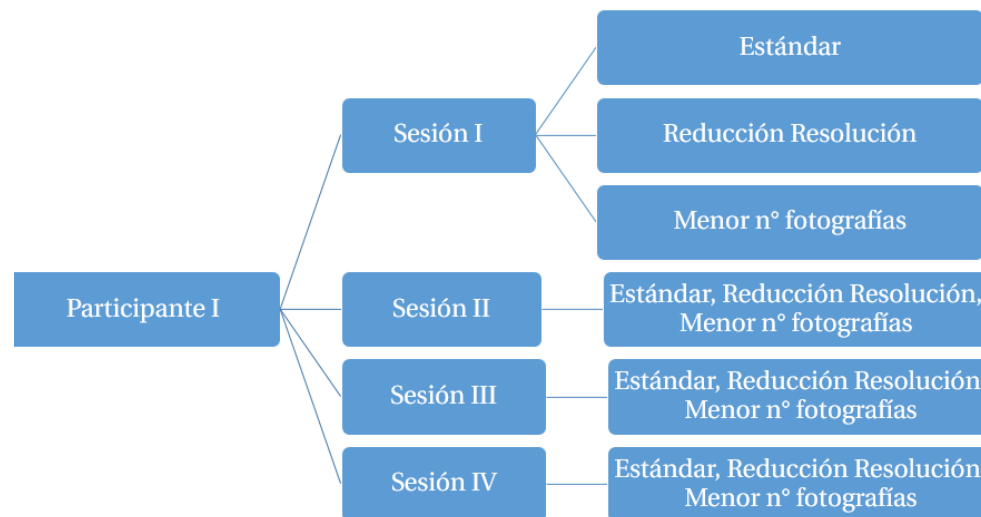


Figura 4-6: Diagrama del trabajo de repetitividad individual.

Sesión estándar

Estas sesiones son consideradas estándar, producto de que se utilizan las resoluciones normales de las fotografías, y se procesan la totalidad de estas, tal como los casos normales ya establecidos en primera instancia.

Los resultados obtenidos por medio de esta prueba de repetitividad individual en tan sólo una de las cuatro sesiones, son los que se observan en la siguiente Tabla 4-1.

Tabla 4-1: Distancia registradas entre los puntos de control en el rostro del participante y el respectivo modelo CAD generado.

Segmentos	Distancia real [mm]	Distancia virtual [mm]	Diferencia [mm]	Error %
A-B	23,57	24,39	0,82	3,48
C-D	106,18	106,18	0	0
A-E	35,78	35,92	0,14	0,39
A-C	39,46	38,86	0,6	1,52
B-C	45,19	44,88	0,31	0,69
D-E	68,69	68,8	0,11	0,16
			Error promedio	1,04 %

Los resultados en relación a la primera sesión arrojan un *error promedio de 1,04%*. Además, el modelo 3D CAD no presenta errores cualitativamente identificables.

Para las siguientes tres sesiones restantes, la metodología de registro es idéntica a la mostrada en la Tabla 4-1, es por este motivo, que se procede a mostrar solo los resultados de los errores promedios de cada una de las sesiones en la Tabla 4-2.

Tabla 4-2: Error promedio de todas las sesiones de la prueba de repetitividad individual con variable *sesión estándar*.

Sesión #	Error promedio
I	1,04%
II	1,24%
III	0,80%
IV	1,26%
Promedio	1,08%

Con el registro de los errores promedios obtenidos en las cuatro sesiones de repetitividad, se conduce hacia el cálculo del error por medio de las sesiones estándar. El resultado indica que se obtiene un 1,08% de error promedio, correspondiente a un equivalente de 1,14 [mm], considerando el mayor de los segmentos para escalar los modelos. como valor cuantitativo.

El análisis de resultados del total de los modelos 3D CAD reconstruidos, por medio de lo que se conoce como resultado cualitativo, se observa que los cuatros modelos sí son aceptables en cuanto a las definiciones de nariz, nula presencia de agujeros en la parte superior de cabeza, bajo nivel de ruido sectores del rostro. Dicho de otra forma, estos resultados cumplen los requisitos impuesto en este trabajo de investigación.

Sesión de reducción en resolución al 60%

Para este caso, se utilizó la misma cantidad de imágenes, pero aplicando una reducción en la resolución al 60% del tamaño original, de esta forma se genera un nuevo conjunto de imágenes de menos resolución para luego procesarlas y obtener los modelos CAD. La estimación de tiempo de procesamiento por parte del software se ve reducida, por el uso de imágenes más pequeñas.

Los resultados obtenidos, reducen el porcentaje de error en relación al caso original como se observa en la Tabla 4-3. Cualitativamente, hubo pérdidas significativas al ser inspeccionadas visualmente.

Tabla 4-3: Error promedio de todas las sesiones de la prueba de repetitividad individual con variable *sesión de reducción en resolución al 60%*.

Sesión #	Error promedio
I	0,83%
II	1,08%
III	1,09%
IV	1,21%
Promedio	1,05%

El resultado equivalente de la prueba de repetitividad mediante la variable de reducción de resolución, es de un valor promedio de 1,05% de error promedio. En cuanto al resultado de calidad, los modelos presentan fallas significativas, deformación en la nariz, y un alto nivel de ruido en sectores del rostro del sujeto. En relación a los análisis de los resultados, este tipo de sesión basado en la variable realizada, queda descartado como parte de la metodología final para del proyecto.

Sesión con menor cantidad de fotografías

Si se trabaja basándose en la teoría de fotogrametría, la cual entre otras cosas indica que mientras mayor sea la cantidad de imágenes traslapadas, los resultados de tridimensionalidad mejoran notoriamente, puesto que se logra una mayor cantidad de información de cada uno de los puntos entre imágenes procesadas (proceso denominado *matching*) y por consecuencia la representación a través de los resultados de los modelos 3D también debiesen presentar mejoras. Para corroborar y estudiar lo indicado, es que, en este tipo de sesiones, se prueba con la mitad de números de fotografías del total, con las cuales se estaba desarrollando la construcción de los modelos anteriores en otras sesiones, por lo tanto, se trabaja con tan solo 30 imágenes en cada sesión. De esta manera, se somete a prueba las condiciones teóricas de fotogrametría, aunque no hay que descartar, que el software tiene algoritmos capaces de generar nube de puntos con baja información, es decir, cuenta con la capacidad de generar modelos con menor cantidad de imágenes procesadas. En la Tabla 4-4 se muestran los resultados de las sesiones sometidas bajo esta última variable de trabajo.

Tabla 4-4: Error promedio de todas las sesiones de la prueba de repetitividad individual con variable *sesión con menor cantidad de fotografía*.

Sesión #	Error promedio
I	1,34%
II	1,73%
III	1,13%
IV	1,51%
Promedio	1,43%

Los resultados para este caso, como se visualiza, es de un 1,43% de error promedio. A modo de visualización general por medio del trabajo de repetitividad individual expuesto, se determina que los porcentajes de error en cada una de las variables no supera 1,5 % de error en cuanto a la deformación de los modelos, lo cual, no implica que todos sean aceptables, ya que por el momento no se ha descrito de forma detallada los resultados cualitativos de cada una de las sesiones trabajadas. Estos análisis se verán en profundidad en el siguiente capítulo de este trabajo, con las respectivas conclusiones.

4.2.2 Repetitividad colectiva

Este trabajo de repetitividad colectiva, nace con la motivación de hacer los mismos cálculos, aunque con mayor cantidad de participantes sometidos a las sesiones, sin embargo, se trabaja con algunos cambios técnicos en la realización de las sesiones, estableciendo la metodología definitiva de trabajo en cuanto a la toma de imágenes. Como se ha mencionado anteriormente, toda la investigación ha sido desarrollada durante un año, lo cual ha implicado el descubrimiento y perfeccionamiento en la generación de modelos 3D CAD y que hasta la fecha contribuyen a la metodología final.

Si se toma en cuenta de forma cronológica el desarrollo de esta investigación en la creación de la metodología de obtención de los modelos 3D, es preciso mencionar que, en el caso de la repetitividad individual, los parámetros establecidos fueron las primeras decisiones de metodología. En cambio, en la repetitividad colectiva, ya se había logrado una mayor expertis, varias horas de experiencias y números resultados de modelos, por lo cual la metodología de trabajo estaba en una etapa “madura” y definitiva.

Al igual que en la prueba de repetitividad anterior, esta considera las mismas variables establecidas, pero existen algunos cambios los cuales radican en las cantidades de imágenes, aumentando a 120 fotografías por cada sesión, y con respecto a las orbitas de posicionamiento de la cámara (ángulo inferior, dos ángulos frontales, y ángulo superior) aumentan de tres a cuatro , tal como lo indica la Figura 4-7.



Figura 4-7: Medidas de altura de trípodes de cámara. Cada altura se relaciona con cada orbitas de captura de fotografía.

Otra de las diferencias, es que se realizaron cuatro sesiones de fotografías con un total de tres personas. Es necesario especificar las variables de las sesiones:

- *Sesiones Estándar*: estas consisten en el procesamiento de las imágenes con el estándar ya establecido de la construcción de los modelos 3D CAD (120 fotografías).
- *Sesión de reducción en resolución*: Las imágenes son sometidas a una reducción de tamaño (al 60% de las originales).
- *Sesiones menor cantidad de fotografías*: Se considera el 50% del total del número de fotografías de cada sesión, que, para este trabajo de repetitividad, es de 120 fotografías a procesar. De esta forma se analiza si influye la teoría de fotogrametría en la cual se recomienda una mayor cantidad de imágenes para una mejor representación de los modelos tridimensionales.

Por cada uno de los tres participantes, se harán un total de cuatro sesiones fotografías, cada una de las sesiones tiene estas tres variables (sesión estándar, sesión de reducción en resolución, sesión menor cantidad de fotografías) y cuyos parámetros y configuraciones de las sesiones ya fueron mencionadas.

Para una mayor comprensión y entendimiento de lo descrito anteriormente con respecto al trabajo de repetitividad colectiva, se expone detalladamente la siguiente Figura 4-8 la metodología, enfatizando en número de participante, numero de sesión y el tipo de variable que fue considerada en cada una de las sesiones. Es importante mencionar que, si se desea replicar este estudio de *repetitividad colectiva* es necesario conservar cada uno de los parámetros establecido, y la utilización del mismo software de reconstrucción tridimensional, ya que de vital relevancia en los resultados obtenidos.

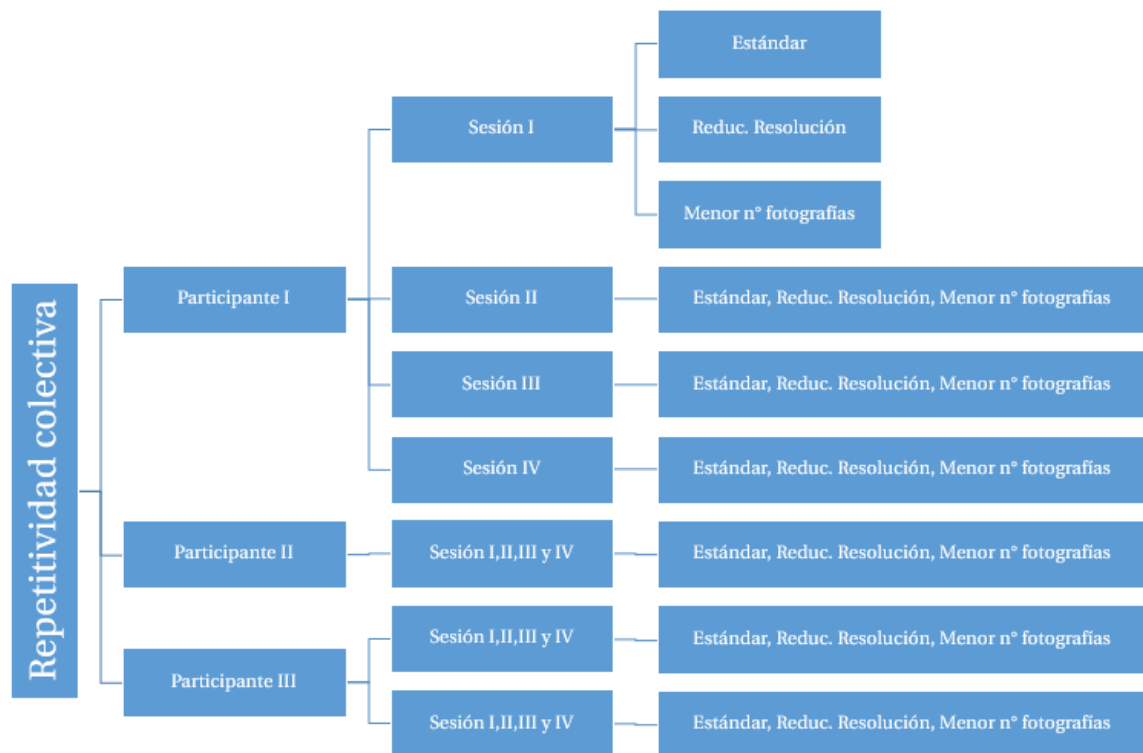


Figura 4-8: Diagrama de trabajo de repetitividad colectiva. Especificando cantidad de participantes, cantidad de sesiones, y tipos de sesiones.

Sesión estándar

Al igual que en el caso de repetitividad anterior, la Tabla 4-5, representa las mediciones en cada uno de los segmentos registrados en el rostro del sujeto y posteriormente en el modelo CAD, comparando las diferencias existentes. La particularidad, es que este proceso se repitió cuatro veces (para el caso de cada sesión, en este caso, sesión estándar) y en tres personas diferentes. Otra de las modificaciones es que el **segmento forzado fue el A-B**, para todos los casos de este trabajo de repetitividad.

Tabla 4-5: Distancia registradas de la primera sesión del primer sujeto participante, entre los puntos de control en el rostro del participante y el respectivo modelo CAD generado.

Segmentos	Distancia real [mm]	Distancia virtual [mm]	Diferencia [mm]	Error %
A-B	80,56	80,56	0	0
B-C	34,98	34,27	0,71	2,03
C-D	44,8	44,74	0,06	0,13
D-E	80,78	77	3,78	4,68
F-G	33,22	33,8	0,58	1,75
B-D	77	76,34	0,66	0,86
			Error promedio	1,57 %

A continuación, se presentan los resultados de las mediciones obtenidos (visualizar en la Tabla 4-6) y cuya particularidad, es que contiene la información de las tres personas participante dentro de esta prueba de repetitividad.

Tabla 4-6: Error promedio de todas las sesiones de la prueba de repetitividad colectiva, con variable *sesión estándar* y de los tres participantes de este trabajo.

N° Muestra	Sesión #	Error %
Participante I	I	1,57
	II	0,73
	III	1,06
	IV	1,11
Participante II	I	0,41
	II	0,89
	III	1,99
	IV	0,55
Participante III	I	1,43
	II	0,84
	III	0,47
	IV	0,60
Promedio		0,97 %

Los resultados entregados producto del trabajo desarrollado a través de esta prueba de repetitividad colectiva, indican que el error promedio es de 0,97%, un resultado que a nivel de deformación presentada equivale a 0,78 [mm]. En cuanto a los resultados cualitativos, que detallan la calidad de definición del rostro, concavidades y convexidades de ambas pinnas, son aceptable y de un alto nivel de detalle, en los sectores complejos (nariz y parte superior de cabeza), ya que presentan un bajo nivel de ruido y se debe principalmente al aumento de fotografías y al número de orbitas de posicionamiento de la cámara.

Sesión de reducción en resolución al 60%

Al igual que lo expuesto en el trabajo de repetitividad individual, en esta etapa del trabajo, todas las sesiones realizadas con los tres participantes, se conserva en relación al número de fotografías en un total de 120 por cada sesión fotográfica.

Estas imágenes, son reducidas al 60%, por medio del software IrfanView, el cual tiene la capacidad de visualizar, editar y reproducir imágenes y videos. Es importante mencionar, que este mismo software fue el utilizado para el trabajo de repetitividad individual.

Al reducir las imágenes, estas contienen menor cantidad de información por pixel, lo cual podría afectar de mayor o menos forma, en los resultados cuantitativos y cualitativos de los modelos 3D CAD.

Los resultados de cada una de las sesiones de los tres participantes (en relación al error promedio de cada sesión), son registradas en la Tabla 4-7, para luego entregar el cálculo de error porcentual general de todo el trabajo por medio de la sesión de reducción en resolución.

Tabla 4-7: Error promedio de todas las sesiones de la prueba de repetitividad individual con variable *sesión de reducción en resolución* y de los tres participantes de este trabajo.

N° Muestra	Sesión #	Error %
Participante I	I	1,91
	II	0,82
	III	1,23
	IV	1,50
Participante II	I	0,99
	II	1,35
	III	4,49
	IV	1,81
Participante III	I	2,03
	II	1,39
	III	7,77
	IV	1,62
Promedio		2,24 %

Para este caso, los resultados presentan muy buena definición, el nivel de ruido es menor al de las pruebas anteriores (sesión estándar), pero el porcentaje de error promedio es mayor 2,24%, lo cual indica que, a través de este tipo de pruebas, los modelos finales presentan un mayor grado de cambios en las dimensiones.

Sesión con menor cantidad de fotografías

En esta última variable de estudio desarrolladas en este trabajo de repetitividad, nuevamente se somete a prueba la teoría de fotogrametría, en el punto que se precisa que mientras mayor sea el número de imágenes, mejor son los resultados.

Una de las particularidades existentes, es que al trabajar con el 50% del total de fotografías de cada sesión, estas llegan a un número de 60 imágenes. Lo cual para el caso de repetitividad individual representaba el 100% de las imágenes a procesar. En concordancia, los resultados esperables, debiesen ser bastante aceptable (al menos cualitativamente hablando), aunque en este trabajo de repetitividad, se hizo con un mayor número de participantes.

Cada uno de los resultados mediante este tipo de sesión con menor cantidad de fotografías, son registradas en la Tabla 4-8.

Tabla 4-8: Error promedio de todas las sesiones de la prueba de repetitividad individual con variable *sesión con menor cantidad de fotografía* y de los tres participantes de este trabajo.

N° Muestra	Sesión #	Error %
Participante I	I	2,06
	II	0,99
	III	1,71
	IV	1,63
Participante II	I	2,07
	II	2,07
	III	2,16
	IV	1,93
Participante III	I	2,03
	II	1,39
	III	7,77
	IV	1,62
Promedio		2,24 %

En el análisis de resultados para este trabajo de repetitividad, los modelos cualitativamente y cuantitativamente son aceptables. La definición de estos, no presentan falla alguna en las partes críticas mencionadas anteriormente y que son considerados al momento de la evaluación del modelo final.

El error promedio es de 2,24%, lo cual equivale en una deformación de 1,8 [mm].

4.3 Conclusiones del capítulo

Las conclusiones referentes a las dos pruebas de repetitividad, buscan determinar el porcentaje de exactitud de la generación de los modelos 3D CAD por medio de la técnica de fotogrametría y escáner 3D. El estudio de los resultados obtenidos, muestran qué tan diferentes son los modelos 3D CAD reconstruidos. Si bien ambas pruebas de repetitividad, son realizadas de diferentes metodologías, los modelos finales cumplen (en ambos casos) con los criterios establecidos para su utilidad como modelo 3D CAD híbridos finales.

Es preciso indicar que, en cuanto a la repetitividad individual, la mejor técnica y modo de trabajo es la *sesión estándar*, puesto que la calidad de los modelos no presenta fallas de reconstrucción, y a la vez, el porcentaje de error promedio es de 1,08% equivalente a 1,14 [mm]. Para el caso de las pruebas de repetitividad colectiva, estas en las tres pruebas, cualitativamente son con casi nula falla, pero la diferencia se fundamenta en los porcentajes de error promedio, donde la de menor error es la prueba *sesión estándar* 0,97%, siendo la de mejor porcentaje por sobre ambas pruebas.

5 Discusión y conclusiones

El trabajo desarrollado en este informe argumenta el estudio, desarrollo y presentación de la metodología de creación de modelos 3D CAD híbrido individualizado. Justificando esta primera etapa de una extensa investigación, que tiene como objetivo general la medición de la HRTF individualizado, por medio de modelos CAD.

La base de la creación de estos modelos, significó el estudio y razonamiento *teórico-práctico* en diversas temáticas y disciplinas de las cuales se destacan; áreas de teoría acústica, teoría de la fotogrametría, capacitación técnica de materiales e instrumentación utilizados en áreas de odontología, estudios y manejo de técnicas fotográficas, teoría de funcionamientos en escáner 3D, utilización de software computacionales (de diseño y reconstrucción tridimensional), entre otros. Cada una de las materias mencionadas, fueron requeridas, para los diversos procesos y etapas que contempla la metodología de trabajo desarrollada durante este proyecto de título.

Los primeros métodos propuestos, se respaldaron principalmente por trabajos anteriores, así como la orientación en cuanto a la utilización de materiales y softwares para los modelos 3D [7] [8]. Con respecto a las investigaciones desarrolladas, ya se había establecido una metodología en cuanto a la reconstrucción 3D CAD de cabeza individualizada, así como de igual forma, la construcción de modelos 3D CAD híbridos, sin embargo, estos trabajos no entregaban resultados numéricos con respecto al grado de exactitud de los modelos, repetición de la metodología, y la utilización de nuevas técnicas diferentes a la de fotogrametría. Estas temáticas, fueron establecidas para trabajos futuros, y que mediante este trabajo son ejecutadas.

El desafío para este proyecto, es poder alinear conocimientos de [8] [17], en cuanto a la construcción de la metodología en la obtención de los modelos individualizado, realizando diferentes pruebas en base a lo que ya estaba establecido, y complementándolo con nuevas técnicas y los respectivos resultados.

La mayor complejidad, es cuanto a la reconstrucción de las orejas, puesto que sus concavidades y convexidades producto de la morfología, impiden el modelamiento CAD de forma directa (pérdida de información en aquellos lugares que no se visualizan). Esto significó, idear a través de técnica de alginato como negativo, y yeso como positivo, la creación de réplicas de pinnas en yeso.

Como el proyecto contempla la creación de modelos individualizados, involucra una problemática extra, en cuanto a que todas las personas participantes tienen diferentes tamaños y diferencias de ángulos en las orejas. La solución propuesta y efectuada, es la utilización de cortes (horizontales, verticales o en diagonal) según el tipo de diseño más adecuado para realizar posteriormente la digitalización de esas orejas por medio de las técnicas establecidas (fotogrametría o escáner 3D). La conclusión de este tipo de solución, es que posibilita la digitalización de cualquier tipo de oreja, independiente de que tan “cerrada” sea, permitiendo darle una mayor libertad a la metodología en cuanto a la “filosofía” de construir modelos 3D CAD individualizado.

En cuanto a los modelos 3D CAD de cabezas, esta metodología se mantiene con la utilización de fotogrametría, lo cual era necesario, establecer parámetros estandarizados en cuanto al número de fotografías utilizada, preparación del sujeto sometido a prueba, puntos de control, entre otros detalles técnicos. Además, se expusieron las nuevas configuraciones, las cuales a lo largo de este proyecto se fueron adecuando en base al avance de resultados y experiencias adquiridas, debido a la gran cantidad de modelos y pruebas realizadas en laboratorio.

En relación a los participantes, no existe mayor problemática (en cuanto a la seguridad físicas de estos) para la construcción de los modelos 3D CAD por medio de fotogrametría, puesto que esta técnica es no invasiva y no causa ningún efecto secundario (ya que el sujeto se somete a una secuencia de fotografías, tomadas en diferentes ángulos).

En cuanto a las pinnas humanas, la toma de impresión de réplicas por medio de alginato, fue necesario establecer un protocolo previo. Los participantes eran sometidos a un examen de revisión (otoscopia) con el trabajo de una profesional especializada, para descartar posibles daños previo al vaciado de alginato al pabellón auricular (el cual en todo momento era protegido por tapones de algodón, evitando la filtración hacia el interior del oído de los participantes). Este paso es de suma importancia y es considerado en todo momento como parte de la metodología de trabajo.

Con la obtención de las réplicas humanas se indica que, fueron sometidas a fotogrametría para procesar las imágenes por medio del software *3D Zephyr*, cuya etapa final, entrega el modelo 3D CAD. Además, con las réplicas de pinnas, se realizaron pruebas con la nueva técnica, la consiste en reconstruir los modelos mediante la utilización de un escáner 3D. El modo de operación del escáner, consiste en primera instancia, en un “barrido” de superficie (trabajo realizado por láseres incorporados dentro del escáner), información que es captada por el software (propio del escáner), y que genera en tiempo real, una nube de puntos densa, reconstruyendo las pinnas en modelo CAD.

Se concluye que la utilización del escáner, posibilita generar los modelos CAD de forma más autónoma, reduciendo el trabajo de preparación en relación a la toma de fotografías (120 imágenes por cada pinna), y a todo el trabajo de preparación de imágenes que esto conlleva, utilizados por la técnica de fotogrametría. Además de la entrega de los modelos ya escalados en las dimensiones reales de las pinnas (proceso que en *3D Zephyr* era necesario realizarlo manualmente), y finalmente la posibilidad de realizar trabajos de edición (reducción de ruido,

unión de modelos, y sobreponer mayor cantidad de puntos a través de doble escaneo en ciertas áreas, entre otros) sin la necesidad de exportar a otros softwares.

Con respecto a las pruebas de repetitividad realizada en dos instancias, estas fueron de gran ayuda para corroborar que la técnica de fotogrametría, ya sea en orejas o en cabeza, si garantiza un bajo nivel de distorsión tanto en tamaños como en definición de los modelos, por medio de la calidad representada den ciertos lugares complejos de la cabeza.

Las pruebas de repetitividad se desarrollaron de dos maneras:

- Repetitividad individual.
- Repetitividad colectiva.

Como se explicó en el capítulo anterior, ambas fueron realizadas en diferentes etapas de desarrollo de este trabajo, siendo la de repetitividad individual la primera y la que mayor experiencia entregó para perfeccionar a metodología. Este trabajo concluye interesantes resultados, donde el más destacable pasa por el trabajo realizado en las *sesiones estándar* (cuyos parámetros y detalles fueron descritos en el capítulo 4), y donde los resultados medidos arrojan un error promedio de **1,08%** equivalente **1,14 [mm]** en cuanto a la deformación, en cuanto a la calidad de los modelos, estos eran representados sin fallas significativas.

La prueba de repetitividad colectiva, fue establecida casi al final del desarrollo de la metodología de trabajo, lo cual permitió al desarrollo de forma más metódicas en cuanto a las sesiones y a las configuraciones de construcción de modelos. Cuantitativamente los resultados son de **0,97%**, el cual resulta ser el de menor porcentaje de deformación. En esta prueba, tanto la *sesión estándar* como la *sesión con menor cantidad de fotografías*, ambos cualitativamente son de gran similitud, pero se define la sesión estándar como el mejor, puesto que presenta un porcentaje de error promedio entre los modelos, menor al 1%.

Las conclusiones respecto a las pruebas descritas, es que el nivel de precisión a través de la técnica de fotogrametría cumple con las condiciones y expectativas, ya que, en el peor de los casos, no supera (en ninguna de las pruebas) el 2,5% de error. Con estos resultados, la técnica es respaldada como metodología eficaz para la construcción de modelos 3D CAD.

Finalmente, dentro de las pruebas realizada en este trabajo, es la que se expone en relación a las réplicas de pinnas, donde además de medir las réplicas de yeso, se mide (a través de los puntos de control previamente establecidos), los modelos 3D CAD, y las impresiones respectivas de esos modelos CAD (por medio de impresora 3D). Los resultados es que a pesar de pasar por varias etapas; oreja original, réplica de yeso, modelo 3D CAD, e impresión 3D, estas presentan un error promedio de **1,90 %**, y entregando definiciones de los recovecos altamente idénticos a la de oreja tomada como referencia.

A modo general, los resultados y la metodología de trabajo obtenida por medio de esta investigación, se respaldó con las pruebas descritas, lo cual hace posible obtener modelos asistidos por computadoras individualizados, con un gran nivel de precisión.

6 Proyección

La proyección de esta investigación se enfoca en dos aspectos, primero el perfeccionamiento de la técnica para reconstrucción de los modelos 3D CAD individualizado, y segundo la utilización de los modelos híbridos individualizados en simulaciones acústicas.

Con respecto al perfeccionamiento de la reconstrucción de los modelos CAD, se proyecta la obtención de los modelos de cabezas de forma directa con la utilización del escáner 3D. Esto involucraría la creación de una nueva metodología, ya que involucra un mayor tiempo de exposición de los sujetos de prueba, análisis de resultados, y la constante supervisión de las curvaturas tanto del rostro del sujeto como también en ambas pinnas.

La creación de modelos 3D CAD individualizados sin necesidad de realizar las réplicas de yeso de ambas orejas, sería un importante desafío debido a la extrema dificultad que involucra la orejas. Esto eliminaría utilización de materiales odontológicos, y el trabajo de unión de los modelos CAD (cabezas y orejas), ya que se trabajaría en un solo CAD de forma directa.

En materia de estudios acústicos, existen principalmente dos grandes proyecciones utilizando los modelos 3D CAD individualizados. Esto se basa principalmente en el tipo de formato de almacenamiento de los modelos (formato STL), lo cual permite importar el archivo a softwares especializados en simulaciones acústicas y hacer impresiones 3D a escala real con el objetivo de someterlos a otros tipos de estudios acústicos.

Para el caso de las impresiones 3D a escala real se propone como trabajo futuro, la realización agujeros en los modelos CAD en la zona del conducto auditivo externo de ambos oídos, de esta manera, se habilitaría el espacio para la introducción de micrófonos, los que detectarían las ondas sonoras, emitidas por monitores (idealmente de respuesta plana) y cuyo registro de esta información puede medir la HRTF del modelo sometido a prueba.

Además y como consecuencia de que los modelos 3D CAD son individualizado, es posible realizar pruebas de simulación acústica, tanto con el sujeto real (persona que fue sometida a pruebas de fotogrametría), el modelo tridimensional CAD del mismo sujeto (a través de softwares) y con la respectiva impresión 3D. Pruebas de espacialidad, sonidos 3D, audiofrecuencias, entre otras, y que formarían parte de las diferentes proyecciones y trabajo futuro que entregan los resultados de esta primera etapa de la investigación.

Bibliografía

- [1] D. Batteau, «The role of the Pinna in Human Localization,» *Proceeding of The Royal Society Biological Sciences*, vol. 168, pp. 158-180, 1967.
- [2] J. S. Rayleigh, *The Theory of Sound*, London: Macmillan, 1877.
- [3] F. Wightman y D. Kistler, «Headphone simulation of free-field listening. I: Stimulus synthesis,» *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 85, nº 2, p. 858, 1998.
- [4] K. Martin y G. Bill, «HRTF Measurements of a KEMAR Dummy-Head Microphone,» MIT Media Lab, Massachuset, 1994.
- [5] O. Wulf y B. Wagner, «FAST 3D SCANNING METHODS FOR LASER MEASUREMENT SYSTEMS,» *International Conference on Control Systems and Computer Science*, 2003.
- [6] Y. Chi-Yuan, L. Yu-Hung y C. Wen-Ko, «The 3D scanner for measuring body surface area: a simplified calculation in the Chinese adult,» *Applied Ergonomics*, vol. 34, nº 3, pp. 273-278, 2003.
- [7] J. L. Bravo , «Construcción de Modelo de Oreja Artificial de Silicona y Medición de Características Acústicas,» Valparaíso, 2015.
- [8] R. Codoceo, «Construcción de Modelos 3D de Oreja y Cabeza Individualizada para Medición Acústica,» Valparaíso, 2016.
- [9] B. Seeber y H. Fastl, «Subjective Selection of non-Individual HRTF,» de *Proceedings of the 2003 International Conference on Auditory Display, Boston*, Boston, 2003.
- [10] B. Seeber, «Untersuchung der auditiven lokalisation mit einer lichtzeirgermethode,» Munchen, 2003.
- [11] M. Vorländer, «Sound Fields in Complex Listening Environments,» *SAGE Journals*, vol. 15, nº 3, pp. 106 - 115, 2011.
- [12] M. Geronazzo y S. Spagnol, «Estimation and Modeling of Pinna-Related Transfer Functions,» de *Conference on Digital Audio Effects*, Graz, 2010.
- [13] J. Craig, P. Guillon y N. Epain, «Creating the Sydney York Morphological and Acoustic Recordings of Ears Database,» *IEEE Transactions on Multimedia*, vol. 16, nº 1, pp. 37-46, 2014.

- [14] F. Netter, Atlas de anatomía humana 6ta edition, Elsevier Masson, 2015.
- [15] E. Vela, A. San Martin y R. Arana, «Fundamentos de Acústica,» TecniAcústica, Bilbao, 2003.
- [16] P. Cetta, «Localización Espacial del Sonido,» Buenos Aires, 2003.
- [17] J. Fels, «From Children to Adults: How Binaural Cues and Ear Canal Impedances grow,» Mönchengladbach, 2008.
- [18] R. Klumpp y H. R. Eady, «Some Measurements of Interaural Time Difference Thresholds,» *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 28, nº 5, 1956.
- [19] P. Botella, Procesador de sonido y estudio de métodos para la generación de audio 3D en tiempo real, Gandia, 2012.
- [20] S. L. Ramírez, *Servicios de laboratorio de la universidad de Málaga*, Málaga.
- [21] J. Ramis, J. Redondo y J. Alba, «MEDIDA DE LA FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA DE UN MANIQUÍ ACÚSTICO,» Escuela Politécnica Superior de Gandia, Valencia.
- [22] I. López Hidalgo y J. A. Balarezo Razzeto, «Estudio in vitro de la alteración dimensional de impresiones con silicona,» *Revista estomatologica herediana*, vol. 14, nº 2, pp. 45-50, 2004.
- [23] C. Garcia , M. Espinoza, J. Orellana, A. Ramírez y V. Setién , «Técnica de impresión con alginato,» de *Acta Odontológica Venezolana*, Caracas, 2008.
- [24] «www.Asprs.org,» [En línea]. Available: <http://www.asprs.org/Photogrammetric-Engineering-and-Remote-Sensing/PE-RS-Archives.html>.
- [25] B. Ciro, Principios Básicos de la Fotogrametría Actual, México: ESIA, 2005.
- [26] D. Jiménez Badillo y J. A. Reyes Solís, «<http://remarq.ning.com>,» [En línea]. Available: <http://remarq.ning.com/page/tecnicas-para-el-modelado-tridimensional-de-artefactos-arqueologi>.
- [27] F. Aronowitz, «Theory of traveling wave optical laser,» *American Physical Society*, vol. 134, pp. A635-A646, 1965.
- [28] j. A. Beraldin, F. Blais, L. Cournoyer, G. Godin y M. Rioux , «Active 3D Sensing,» Ottawa, 2003.
- [29] C. Rocchini, C. Montani, P. Cignoni y R. Scopigno , «A low cost 3D scanner based on structured light,» *EUROGRAPHICS*, vol. 20, nº 3, 2001.

- [30] R. Toldo, «Towards automatic acquisition of high-level 3D model from images,» Università degli Studi di Verona, Verona, 2013.

A Instructivo general de uso del software 3D Zephyr

En el siguiente apéndice, se darán las instrucciones generales de uso del software 3D Zephyr, recordar que solo se destacan las operaciones relevantes para la construcción de los modelos 3D, utilizado en esta investigación.

A.1 Workspace y enmascaramiento de imágenes y nube de puntos.

Para comenzar con la utilización del programa, es necesario seleccionar un nuevo “workspace”, en el cual se trabaja todo el proceso de reconstrucción de los modelos 3D, siendo los procesos más destacables los siguientes:

- Edición de modelos construidos.
- Importación de otros espacios de trabajos “workspace”.
- Elaboración de una o más etapas de reconstrucción: nube densa de puntos, mallas y textura.

Continuando con la explicación, se seleccionan las imágenes a procesar, y estas deben someterse a un proceso denominado enmascaramiento. Al enmascarar las imágenes, estas posibilitan editar, por medio de la selección de la imagen con rojo y azul, en relación a las áreas que se requiere construir a través de la nube de punto y las posteriores etapas.

La imagen en la Figura -1, se visualiza el proceso indicado. El área roja, es la que procede a la contrucción del modelo tridimensional, el área azul será descartada para los siguientes procesos del software.

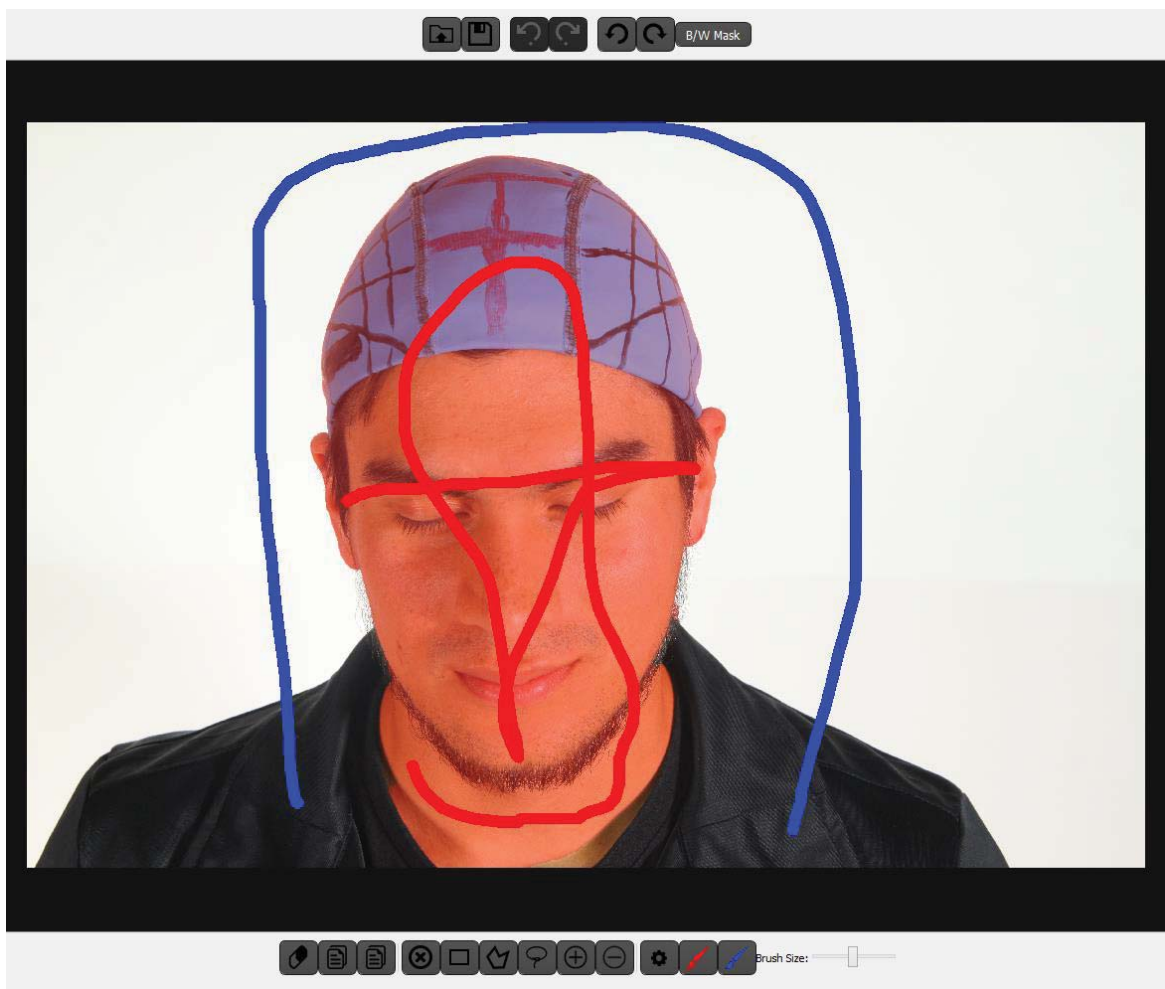


Figura -1: Enmascaramiento de las imágenes. Rojo: área de selección a reconstruir. Azul: área de selección eliminada.

Al finalizar con el proceso de enmascaramiento de las fotografías, estas deben ser “actualizadas” en el selector de imágenes, donde se indica que las imágenes han sido enmascaradas. En la Figura-2 se visualiza lo descrito en cuanto a la actualización de las imágenes.

Masking
Setup images mask

Camera	Mask	Status
IMG_6256.JPG	C:/Users/DANNY_~1/GOOGLE~1/PUCV-I~1/S013/H013/PMH013/PAMH013/IMG...	Loaded
IMG_6257.JPG	C:/Users/DANNY_~1/GOOGLE~1/PUCV-I~1/S013/H013/PMH013/PAMH013/IMG...	Loaded
IMG_6258.JPG	C:/Users/DANNY_~1/GOOGLE~1/PUCV-I~1/S013/H013/PMH013/PAMH013/IMG...	Loaded
IMG_6259.JPG	C:/Users/DANNY_~1/GOOGLE~1/PUCV-I~1/S013/H013/PMH013/PAMH013/IMG...	Loaded
IMG_6260.JPG	C:/Users/DANNY_~1/GOOGLE~1/PUCV-I~1/S013/H013/PMH013/PAMH013/IMB...	Loaded
IMG_6261.JPG	C:/Users/DANNY_~1/GOOGLE~1/PUCV-I~1/S013/H013/PMH013/PAMH013/IMC...	Loaded
IMG_6262.JPG	C:/Users/DANNY_~1/GOOGLE~1/PUCV-I~1/S013/H013/PMH013/PAMH013/IM2...	Loaded
IMG_6263.JPG	C:/Users/DANNY_~1/GOOGLE~1/PUCV-I~1/S013/H013/PMH013/PAMH013/IME...	Loaded
IMG_6264.JPG	C:/Users/DANNY_~1/GOOGLE~1/PUCV-I~1/S013/H013/PMH013/PAMH013/IM6...	Loaded
IMG_6265.JPG	C:/Users/DANNY_~1/GOOGLE~1/PUCV-I~1/S013/H013/PMH013/PAMH013/IM8...	Loaded
IMG_6266.JPG	C:/Users/DANNY_~1/GOOGLE~1/PUCV-I~1/S013/H013/PMH013/PAMH013/IMC...	Loaded
IMG_6267.JPG	C:/Users/DANNY_~1/GOOGLE~1/PUCV-I~1/S013/H013/PMH013/PAMH013/IMB...	Loaded
IMG_6268.JPG	C:/Users/DANNY_~1/GOOGLE~1/PUCV-I~1/S013/H013/PMH013/PAMH013/IM2...	Loaded
IMG_6269.JPG	C:/Users/DANNY_~1/GOOGLE~1/PUCV-I~1/S013/H013/PMH013/PAMH013/IM5...	Loaded
IMG_6270.JPG	C:/Users/DANNY_~1/GOOGLE~1/PUCV-I~1/S013/H013/PMH013/PAMH013/IM1...	Loaded
IMG_6271.JPG	C:/Users/DANNY_~1/GOOGLE~1/PUCV-I~1/S013/H013/PMH013/PAMH013/IM3...	Loaded
IMG_6256.JPG	C:/Users/DANNY_~1/GOOGLE~1/PUCV-I~1/S013/H013/PMH013/PAMH013/IMG...	Loaded

Figura-2: Selector de imágenes enmascaras, actualizadas y listas para procesar.

En la Figura-3, se muestran los parámetros de configuración para el inicio de la construcción de nube de puntos. La imagen indica los parámetros utilizados tanto para los modelos CAD de cabeza y réplicas de orejas 3D, a lo largo de toda la investigación.

Project Wizard Settings Page
Select the desired settings.

Settings: Advanced ▾

Keypoint Density
 Very Low Low Medium High Very High

Matching Type
 Very Fast Fast Accurate

Matching Stage Depth
 Automatic Low Medium High Full

Reprojection Error Tolerance
 Very Strict Strict Normal Wide

Reconstruction Engine
 Incremental Global

Bundle Adjustment
 Local And Restrained Local Full

Photo Ordering
 Unordered Sequential Circular Approximate Grid

Figura-3: Configuración de parámetros para la reconstrucción nube de puntos.

La ejecución de este proceso, es posible visualizar en el siguiente link:
<https://www.youtube.com/watch?v=yPWw0wS0pYU>

A.2 Parametros para la nube densa de puntos.

El siguiente proceso es la nube densa de puntos, para esto es necesario configurar los tres siguientes parámetros, los cuales fueron determinada en relación al estudio en profundidad del software. Es necesario indicar, que existe la posibilidad de reconstrucción en el modo estándar, el cual tiene un apartado de “Human Body”, pero como recomendación, y modo de uso avanzado se utilizan las configuraciones a mostrar.

En la Figura-4, se muestra la configuración correspondiente la etapa de reconstrucción de nube densa de puntos. Es importante mencionar que los porcentajes de resolución y filtro de ruido, son altamente determinante, por ende, es recomendable mantener los parámetros indicados.

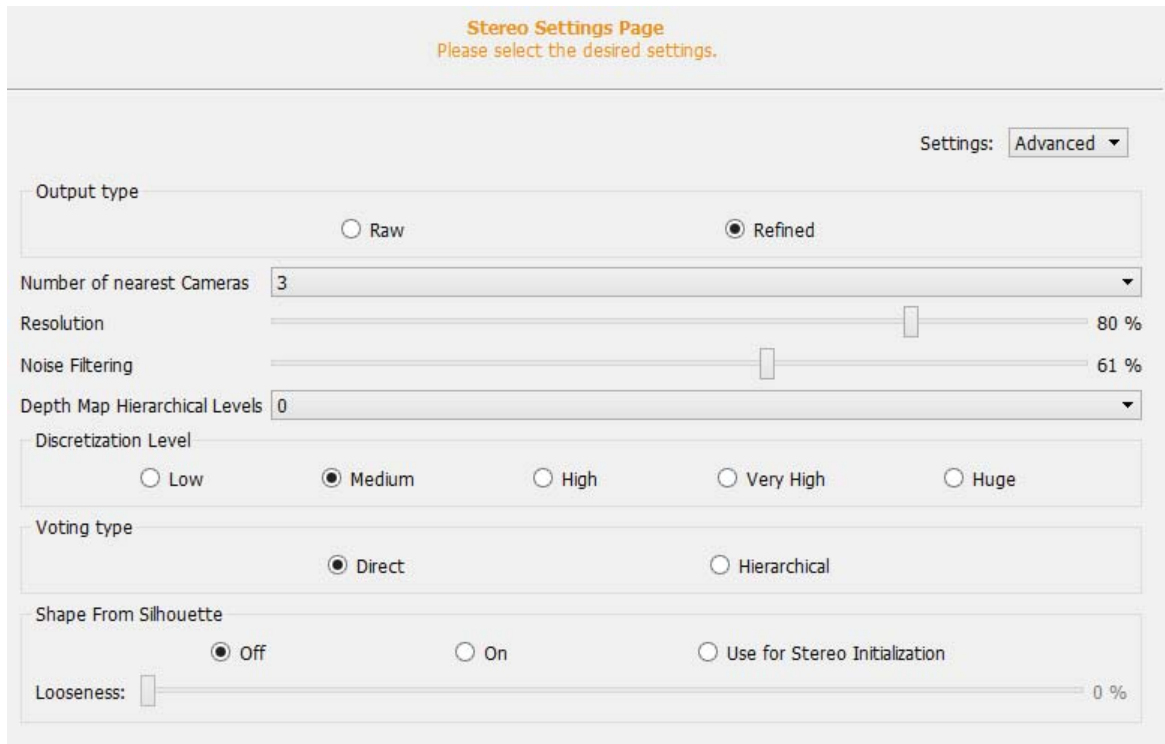


Figura-4: Configuración en la etapa de reconstrucción de nube densa de puntos.

El resultado es mostrado en la Figura-5, donde el modelo ya se logra visualizar gran parte del resultado final.



Figura-5: Modelo 3D CAD en el equivalente de nube densa de puntos.

A.3 Reconstrucción de malla

Esta etapa, al igual que la nube densa de puntos, tiene la configuración de “Human Body”, pero mostrada en la Figura-6, donde el porcentaje de “smoothness” es el más recomendado para los modelos de cabeza.

Mesh creation Settings Page
Please select the desired settings.

Settings: Advanced ▾

Polygon Count

Low Medium High Very High Huge

Smoothness 30 %

Reconstruction Type

Smooth Sharp

Min. Vertices Max. Vertices

Photoconsistency Based Optimization

Off On

Number of neighbor cameras:

Image Resolution: 25 %

Max Iterations:

Target Reprojection Area:

Hierarchical Subdivisions:

Use Symmetric Pairs

Figura-6: Configuración de malla del modelo 3D.

A.4 Textura

Es la última de reconstrucción del modelo, donde el software realiza un trabajo de textura, en relación a colores por pixel, y de forma más detallada, es posible reducir el número de vértices del modelo en textura. Los parámetros utilizados para esta etapa, es la estándar sugerida por el software, visualizado en la Figura-7.

Textured Mesh generation wizard
Settings

Mesh to use: Mesh 1

Texture Size: 4096 Lossless

Max number of vertices: 242451 Maximum

Max number of cameras per triangle: 1

Use Multiband Use Color Balance

Select cameras to use All cameras Selected

Figura-7: Selector de configuración para la generación del modelo en textura.

B Parametros de software escáner 3D

La utilización del escáner NextEngine 3D, comienza con una calibración automatizada al momento de abrir el software (propio del escáner).

El escáner da la posibilidad de obtener una “*familia de escáner*”, las cuales se identifican como: A, B, C, D, E. Dentro de cada una de estas *familias de escáner*, se visualizan las tomas escénicas denominadas “Divisiones”, en cada división es escáner hace una toma fotográfica. Además, dentro de las configuraciones de posicionamiento, existen tres posibilidades: Escaneo de 360°, de 180° y finalmente la opción individual la cual sólo da la posibilidad de escaneo frontal del objeto montado sobre la plataforma giratoria.

La construcción de nube de puntos es visualizada en tiempo real. Dependiendo de cuantas *familias de escáner* se necesitan realizar, tipo de *posición de escaneo*, cuántos *puntos por pulgada cuadrada*, y el tipo de *objetivo* se está escaneando, determina el tiempo de trabajo del proceso de generación de un modelo 3D CAD. La Figura-8 es la única etapa de configuración previa de la creación de los modelos tridimensionales.



Figura-8: Configuraciones previas al inicio de escaneo.

El software, tiene la capacidad de:

- Disminuir la resolución de los modelos 3D.
- Cubrir agujeros e imperfecciones en los resultados.
- Unir a modelos diferentes por medio de puntos de control.
- Solo realiza un modelo 3D a la vez.
- Exporta en diferentes archivos: STL, 3D, etc.

Estas ediciones y trabajos del modelo generado a través del NexteEngine, es posible por medio de la utilización de las diferentes herramientas dispuestas en la ventana (ver Figura-9).



Figura-9: Barra de herramientas disponible en el software.