

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



PONTIFICIA
UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DEL PERÚ

**PROTOCOLO DE ESTIMACIÓN DEL VOLUMEN DE ULCERACIONES DE
LEISHMANIASIS CUTÁNEA A TRAVÉS DE LA COMPARACIÓN ENTRE LAS
TÉCNICAS DE FOTOGRAMETRÍA DIGITAL Y DEL ESCÁNER LÁSER 3D**

Tesis para optar por el Título de Ingeniero electrónico, que presenta el bachiller:

Víctor Antonio Vásquez Huaytalla

ASESORES: Dr. Ing. Benjamín Castañeda Aphan, Ing. José Fernando Zvietcovich Zegarra.

Lima, Mayo del 2016

RESUMEN

La Leishmaniasis Cutánea (LC) es una enfermedad tropical de evolución crónica que se produce por parásitos del género *Leishmania* y consiste en la aparición de úlceras granulares en la piel, causadas por la picadura del mosquito denominado *Leishmania* o Manta Blanca.

Asimismo, la población que la padece está ubicada en zonas rurales y en lugares muy alejados de los hospitales de la ciudad de Lima; en donde los hospitales no poseen medios tecnológicos suficientes y personal capacitado para realizar un seguimiento respecto al tratamiento a seguir después de la consulta realizada al doctor tratante y a los médicos investigadores de dicha enfermedad.

En segundo lugar, existe la probabilidad de comprobar la hipótesis de que el volumen de la ulceración de LC puede ser utilizado como una métrica para la obtención de un indicador biomédico que sirva de ayuda al doctor tratante; y de esa forma disponer de un protocolo útil que indique la evolución de la enfermedad mediante un tratamiento adecuado.

Por esta razón, se propuso realizar un registro de puntos mediante un protocolo de estimación del volumen de ulceraciones de LC a través de la comparación entre las técnicas de fotogrametría digital y del Escáner Láser 3D. Para ello, se utilizaron los programas Agisoft PhotoScan Profesional, MeshLab Versión 1.3.2, Cloud Compare Versión 2 y MatLab 7.12.0; para crear reconstrucciones tridimensionales. Además, se realizaron una serie de experimentos con maniqués de lesiones de LC de diferentes tamaños (pequeño, mediano y grande) para establecer el protocolo de fotogrametría digital más adecuado de acuerdo a las métricas de exactitud y precisión.

Para ello, se utiliza los seis modelos del MeshLab para calcular el volumen de cada uno (incluyendo el modelo del Escáner Láser 3D) mediante la interpolación Spline en el software MatLab. Además, se calcula la desviación estándar del volumen (mediante el cálculo del error de precisión del volumen en porcentaje) para cada maniquí de LC (pequeño, mediano y grande), sin incluir el valor del volumen del Escáner Láser 3D.

En consecuencia, la presente tesis brinda información respecto a la estimación del volumen de maniqués de ulceraciones de LC, mediante el diseño del protocolo de fotogrametría digital PMM (Protocolo Mosaico Mejorado); la cual es comparable con las métricas del volumen obtenidas con el Escáner Láser 3D, considerando los siguientes errores de precisión del volumen para cada maniquí de LC (pequeño, mediano y grande) : 11 %, 13 % y 8 % ; respectivamente. Además, se obtuvieron los errores de exactitud del volumen para cada maniquí de LC (pequeño, mediano y grande; respecto al valor del volumen del Escáner Láser 3D) y son los siguientes: 9 %, 9 % y 10 % ; respectivamente.

Finalmente, el error porcentual de la exactitud para el cálculo del volumen mediante el Protocolo Mosaico Mejorado (PMM), son aceptables y menores o iguales al 10% para los maniqués pequeño, mediano y grande.



PONTIFICIA
UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DEL PERÚ

FACULTAD DE
CIENCIAS E
INGENIERÍA

TEMA DE TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO ELECTRÓNICO

Título : Protocolo de Estimación del Volumen de ulceraciones de Leishmaniasis Cutánea a través de la Comparación entre las Técnicas de Fotogrametría Digital y del Escáner Láser 3D.
 Área : Procesamiento Digital de Imágenes # 1149
 Asesor : Dr. Ing. Benjamin Castañeda Aphan e Ing. José Fernando Zvietcovich Zegarra
 Alumno : Victor Antonio Vásquez Huaytalla
 Código : 20059041
 Fecha : 18 03 16



Descripción y Objetivos

La Leishmaniasis Cutánea (LC) se define como una enfermedad tropical que consiste en la aparición de úlceras granulares en la piel causadas por la picadura del mosquito denominado Leishmania o Manta Blanca. Asimismo, en la actualidad la LC representa un grave problema de salud pública que ocasiona problemas a nivel psicológico, social y económico; afecta alrededor de 12 millones de personas en todo el mundo y es endémica en el Perú.

Dado que en el Perú aún no se ha realizado y comprobado investigaciones respecto a la obtención de un indicador biomédico de estimación del volumen de ulceraciones de LC para establecer un avance o disminución del tratamiento clínico del paciente y garantizar su cura parcial o definitiva mediante una técnica de fotogrametría digital comparable a la técnica del escáner láser 3D, entonces se propone realizar un protocolo de estimación del volumen de ulceraciones de LC a través de la comparación entre las técnicas de fotogrametría digital y del escáner Láser 3D. Para ello, se utiliza el Software libre Agisoft PhotoScan Professional para crear reconstrucciones tridimensionales. Luego, el modelo volumétrico de la lesión se compara con el modelo obtenido del escáner láser 3D a través de un registro de puntos. Finalmente, se medirá la exactitud y la precisión de estas mediciones.

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA

M. Sc. Ing. MIGUEL ANGEL CATANO SANCHEZ
Coordinador de la Especialidad de Ingeniería Electrónica

MÁXIMO 50 PÁGINAS



FACULTAD DE
CIENCIAS E
INGENIERÍA

TEMA DE TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO ELECTRÓNICO

Título : Protocolo de Estimación del Volumen de ulceraciones de Leishmaniasis Cutánea a través de la Comparación entre las Técnicas de Fotogrametría Digital y del Escáner Láser 3D.

Índice

Introducción

1. Problemática de la Leishmaniasis Cutánea en el Perú.
2. Estado del Arte de Tecnologías de estimación del volumen de lesiones de Leishmaniasis Cutánea en la actualidad.
3. Diseñar un Protocolo de Estimación del Volumen de ulceraciones de Leishmaniasis Cutánea a través de la Comparación entre las Técnicas de Fotogrametría Digital y del Escáner Láser 3D.
4. Pruebas y Resultados.

Conclusiones

Recomendaciones

Bibliografía

Anexos

Máximo: 50 páginas

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA

M. Sc. Ing. MIGUEL ANGEL CATAÑO SÁNCHEZ
Coordinador de la Especialidad de Ingeniería Electrónica

MÁXIMO 50 PÁGINAS

Ante todo, debo agradecer a mi familia. A mis padres Andrea y Victoriano. A mi hermana Maira y mi cuñado Luis Huamán. Ya que gracias a ellos comprendí que la fuerza de voluntad conlleva a sacrificar un espacio de nuestras vidas para desarrollarnos como personas de fe.

A la Dra. Bertha Serquén, a la Dra. Ligia Casanova y a la Dra. Matzuno.

Al Laboratorio de Imágenes Médicas (LIM); a Leslie Casas, Elizabeth H., Omar Zenteno, Eduardo, Antonio Angulo, Juvenal y Fernando Zvietcovich, por sus consejos y amistad.

A mis asesores Dr. Ing. Benjamín Castañeda e Ing. Fernando Zvietcovich, por brindarme la oportunidad de realizar un trabajo de investigación en equipo respecto a lesiones de LC.

A todos mis profesores por compartir su estilo de trabajo.

A mis amigos de la PUCP, a Gabriela M., Antonio Chía, Antonio Tello, Daniel S., Ángel Balvín, Harold Gutiérrez, Aldo Huamán, Estefano Romero, Edwin Martínez, Juan Sotelo, Leslie Tamayo, Elizabeth Espílco, Antonio Díaz, Renzo López, Gary López, Claudia Reyna, Abio Salcedo, Janeth Llaja, Diana Ortega, César Mendoza, Johnny Marcellini, Rama Estudiantil IEEE-PUCP, TISP-PUCP, RAS-PUCP, Dirección de informática en general.

Gracias a todas las personas, profesores y compañeros que formaron parte de mi formación profesional.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO 1	
Problemática de la Leishmaniasis Cutánea (LC) en el Perú.....	2
1.1 Definición y características clínicas	2
1.2 La Leishmaniasis en el Perú	3
1.2.1 Definición	3
1.2.2 Historia	3
1.3 Aspectos Epidemiológicos	3
1.3.1 Agente Etiológico	3
1.3.2 Vector	5
1.3.3 Reservorio	5
1.3.4 Transmisión	5
1.4 Aspectos clínicos	6
1.4.1 Diagnóstico y tratamiento	6
CAPÍTULO 2	
Estado del Arte de Tecnologías de estimación del volumen de lesiones de Leishmaniasis Cutánea en la actualidad	8
2.1 Estado del Arte de Tecnologías de estimación del volumen de lesiones de Leishmaniasis Cutánea en la actualidad	8
2.1.1 Estimación de volumen de lesiones producidas por Leishmaniasis Cutánea utilizando un Escáner Láser de triangulación 3D	8
2.1.2 La Factibilidad de la medición del volumen de heridas de Leishmaniasis Cutánea (LC) haciendo uso de un ecógrafo	9
2.1.3 Una herramienta de evaluación de heridas 3D completo para una exacta clasificación de tejidos y su medición	10
2.2 Objetivos	11
2.2.1 Objetivo general	11
2.2.2 Objetivos específicos	11
2.3 Hipótesis	12
2.3.1 Hipótesis principal	12

CAPÍTULO 3**Diseño del Protocolo de Estimación del Volumen de ulceraciones de Leishmaniasis Cutánea a través de la Comparación entre las Técnicas de Fotogrametría Digital y del Escáner Láser 3D 12**

3.1 Características del Escáner Láser 3D	13
3.2 Metodología de la investigación	14
3.3 Definiciones operativas	16
3.4 Sistema de adquisición de imágenes digitales y la reconstrucción de modelos tridimensionales	17
3.4.1 Etapa de pre-tratamiento	18
3.4.1.1 Construcción de los modelos en el Agisoft PhotoScan Profesional	18
3.4.1.1.1 Protocolo Treuillet	18
3.4.1.1.2 Protocolo Mosaico y Protocolo Mosaico Mejorado (PMM).....	19
3.4.2 Metodología de cuantificación y análisis por comparación de modelos en el software CloudCompare para los modelos del Agisoft PhotoScan Profesional, CAD 3D y Escáner Láser 3D.....	23
3.4.3 Etapa de refinamiento digital en el software MeshLab	26
3.4.4 Etapa de comparación entre el “Protocolo Mosaico” y el “Protocolo Mosaico Mejorado (PMM)” mediante el software CloudCompare	28
3.4.5 Pre-Procesamiento digital de los modelos en 3D de cada maniquí (pequeño, Mediano y grande) mediante una etapa de regularización, para el “Protocolo Mosaico” y el “Protocolo Mosaico Mejorado (PMM)”	28
3.4.6 Etapa final para la reconstrucción del volumen de los maniqués de LC	33
3.4.6.1 Etapa de segmentación manual	33
3.4.6.2 Generación de cubierta por interpolación Spline cúbica	33

CAPÍTULO 4**Pruebas y resultados 40**

4.1 Pruebas y resultados del “Protocolo Mosaico Mejorado (PMM)” como el mejor protocolo de Fotogrametría Digital	40
4.2 Cálculo de la precisión del volumen de cada maniquí de LC	43
4.3 Cálculo del error de la exactitud del volumen de cada maniquí de LC	44
4.4 Resultados del Volumen total de cada modelo para cada maniquí de LC	45

CONCLUSIONES 47**RECOMENDACIONES 48****BIBLIOGRAFÍA 49**

INTRODUCCIÓN

La Leishmaniasis Cutánea (LC) se define como una enfermedad tropical que consiste en la aparición de úlceras granulares en la piel, causadas por la picadura del mosquito denominado Leishmania o Manta Blanca. Asimismo, en la actualidad la LC representa un grave problema de salud pública que ocasiona problemas a nivel psicológico, social y económico; afecta alrededor de 12 millones de personas en todo el mundo y es endémica en el Perú.

Además, en el Perú aún no se ha realizado y comprobado investigaciones respecto a la obtención de un posible indicador biomédico de estimación del volumen de ulceraciones de LC con técnicas de fotogrametría digital; sin embargo, sí existe un protocolo que utiliza un Escáner láser 3D.

Asimismo, para la presente investigación se plantea utilizar dos cámaras digitales, de las cuales se escogerá la de mejor resolución (Sony CyberShot 10.1 MP.). Después, se realizarán capturas de imágenes digitales (set de fotografías) para evaluar los protocolos propuestos (técnicas de fotogrametría digital). Luego, se ingresará estas imágenes en el Agisoft PhotoScan Profesional para crear una nube de puntos densa. Posteriormente, se generará un proceso de alineación (se evaluará tres fases: High, Medium y Low), y de geometría (se evaluará tres fases: High, Medium y Low). Una vez establecido el mejor protocolo (Protocolo Mosaico Mejorado o PMM), se genera los seis modelos en formato PLY. A continuación, se realiza una alineación total en el MeshLab para generar seis modelos en formato STL.

Finalmente, se utilizan los seis modelos del MeshLab para calcular el volumen de cada uno (incluyendo el modelo del Escáner Láser 3D) mediante la interpolación Spline en el software MatLab. Además, se calcula la desviación estándar del volumen (mediante el cálculo del error de precisión del volumen en porcentaje) para cada maniquí o fantoma de LC (pequeño, mediano y grande), sin incluir el valor del volumen del Escáner Láser 3D. Adicionalmente, se calcula el error de la exactitud del volumen en porcentaje para cada maniquí o fantoma de LC (pequeño, mediano y grande), respecto al valor del volumen del Escáner Láser 3D.

CAPÍTULO 1: Problemática de la Leishmaniasis Cutánea (LC) en el Perú

El presente capítulo tiene como objetivo principal brindar una descripción de la Leishmaniasis y de la Leishmaniasis Cutánea (LC). Asimismo, se planteará el marco problemático en el Perú.

1.1 Definición y características clínicas

Se denomina Leishmaniasis a un grupo de enfermedades que son causadas por especies de protozoos parásitos del género *Leishmania* y que son transmitidas por insectos de los géneros *Lutzomyia*, en el continente americano; y por el insecto *Phlebotomus*, en los continentes de Europa, Asia y África. Su transmisión puede ser antroponótica; es decir, se produce de un hombre a otro; o zoonótica, en donde se transmite de un animal al hombre.

Asimismo, según las manifestaciones clínicas, la Leishmaniasis se clasifica en cuatro tipos y son los siguientes:

- 1.- La Leishmaniasis Visceral (LV).
- 2.- La Leishmaniasis Cutánea difusa (LD).
- 3.- La Leishmaniasis Mucocutánea (LM).
- 4.- La Leishmaniasis Cutánea (LC).

Además, cada tipo de Leishmaniasis tiene distinta inmunopatología, morbilidad y mortalidad. Es decir, la LV presenta casos fatales, si la enfermedad no es tratada; la LC se cura sin la ayuda de algún tratamiento en un periodo de 1 año y 6 meses y es la más común, ya que se reportó cerca de 1.5 millones de casos anualmente alrededor del planeta tierra [9].

La Leishmaniasis es una enfermedad con alta prevalencia en las zonas subtropicales y tropicales, siendo la LC y LM las que se presentan mayormente en 24 países de América y su extensión va desde el sur de E.E.U.U. hasta el norte de Argentina [1].

En Sudamérica, se han reportado más de 14000 casos por año de Leishmaniasis Cutánea en Bolivia, Colombia, Venezuela y Perú [9]. Estos aspectos han determinado que la LC sea considerada como una de las seis enfermedades tropicales de mayor importancia en términos de investigación por la Organización Mundial de la Salud (OMS) [1].

La base del tratamiento de la LC se basa en el uso de antimonio pentavalente, el cual fue desarrollado hace 50 años. Sin embargo, el tratamiento con antimonio pentavalente es caro (\$300-\$400 en Perú), de larga duración y presenta complicación por toxicidad. Debido a que la resistencia al tratamiento va incrementando en zonas donde la enfermedad es endémica, entonces nuevos métodos para el tratamiento se han desarrollado, combinando otros compuestos junto al antimonio pentavalente como la Anfotericina B, Miltefosina o Imiquimod crema [3].

1.2 La Leishmaniasis en el Perú

1.2.1 Definición

La Leishmaniasis es una enfermedad de evolución crónica que se adquiere en zonas rurales y es producida por parásitos del género *Leishmania*. Además, la LC es la forma más común y abundante de Leishmaniasis en el Perú [1].

En el Perú, la Leishmaniasis es la segunda endemia de tipo tropical y la tercera causa de morbilidad por enfermedades transmisibles, después de la Malaria y la Tuberculosis. Además, ocupa un cuarto lugar entre las enfermedades que generan un mayor impacto negativo (social, económico, psicológico, laboral) [1]. Asimismo, se ha reportado mayor incidencia de casos de Leishmaniasis Cutánea (LC) en los valles interandinos y en los andes del Perú; conociendo a la LC con el nombre quechua de “Uta” [1].

Por otro lado, el tratamiento para la enfermedad es de larga duración y con un costo elevado, presentando efectos colaterales como fatiga, cardiopatías y pancreatitis. Asimismo, los resultados a lo largo del tratamiento no presentan, en muchos casos, una mejoría inmediata; por lo tanto, muchos pacientes dejan el tratamiento generando una resistencia al tratamiento recibido [9].

1.2.2 Historia

Cerámicas antropomórficas de la cultura Mochica y Chimú retratan a personas con secuelas deformantes o destructivas. De esta manera, se demuestra claramente la presencia de lesiones de Leishmaniasis durante el periodo Pre-Colombino. Además, cronistas españoles se refieren a la enfermedad como una llaga de difícil curación que ataca a los indígenas mayormente de las zonas de la sierra, valles calientes y húmedos donde se cultivaba la coca [1].

1.3 Aspectos Epidemiológicos

1.3.1 Agente Etiológico

En principio, el agente etiológico de la Leishmaniasis es un protozooario dimórfico del género *Leishmania*, orden Kinetoplastía y pertenece a la familia Trypanosomatidae [1].

En segundo lugar, según su desarrollo en el intestino de los flebótomos vectores se divide en dos subgéneros: *Leishmania* (en el intestino medio o anterior) y *Viannia* (en el intestino posterior, medio y anterior de los flebótomos).

En tercer lugar, morfológicamente las distintas especies de *Leishmania* no se pueden identificar. Para llegar a la clasificación de las especies del género *Leishmania* se debe considerar ciertas características:

a) Biológicas: Morfología, tipo de desarrollo en el flebótomo vector, crecimiento en los medios de cultivo, desarrollo en el huésped vertebrado.

b) Bioquímicas: Electroforesis de isoenzimas, análisis del ADN del núcleo y del cinetoplasto.

c) Inmunológicas: Reactividad del parásito con anticuerpos monoclonales y serotipificación del factor de excreción y taxonomía numérica para definir mejor la evolución molecular y la relación filogenética de los parásitos del género *Leishmania*.

En cuarto lugar, las *Leishmanias* se presentan bajo dos formas diferentes:

a) Promastigote: Es móvil y flagelada, comúnmente encontrada en el mosquito, libre, alargada, de 10 a 14 por 1.5 a 3.5 μm . ; se multiplica y migra a la parte anterior del mosquito, y está allí hasta ser inoculada (ver Figura 1).



Figura 1. Morfología Promastigote de los especímenes de *Leishmania* [1].

b) Amastigote: Es inmóvil, intracelular, dentro de los macrófagos y otras células del sistema reticuloendotelial del huésped vertebrado, redondeada u ovoide, de 2.5 a 5.0 por 1.5 a 2.0 μm .

Finalmente, en el Perú se han identificado cinco especies de *Leishmania*:

- 1) *Leishmania* (V) *braziliensis*.
- 2) *Leishmania* (V) *guyanensis*.
- 3) *Leishmania* (V) *peruviana*.
- 4) *Leishmania* (V) *lainsoni*.
- 5) *Leishmania* (L) *amazonensis*.

Asimismo, en la amazonía se reconocen tres especies como agentes causantes de Leishmaniasis llamada también Leishmaniasis selvática o espundia: *L.* (L) *amazonensis*, *L.* (V) *guyanensis* y *L.* (V) *braziliensis*. Esta última es la de mayor importancia en esta región (ver Figura 2). Entre los 600 y 2000 m.s.n.m. (Ayacucho, Pasco, San Martín, Huánuco) se ha reportado la presencia de *L.* (V) *lainsoni*. La forma cutánea andina, llamada uta, es causada por la *L.* (V) *peruviana*, que se desarrolla entre los 600 y 3000 m.s.n.m.

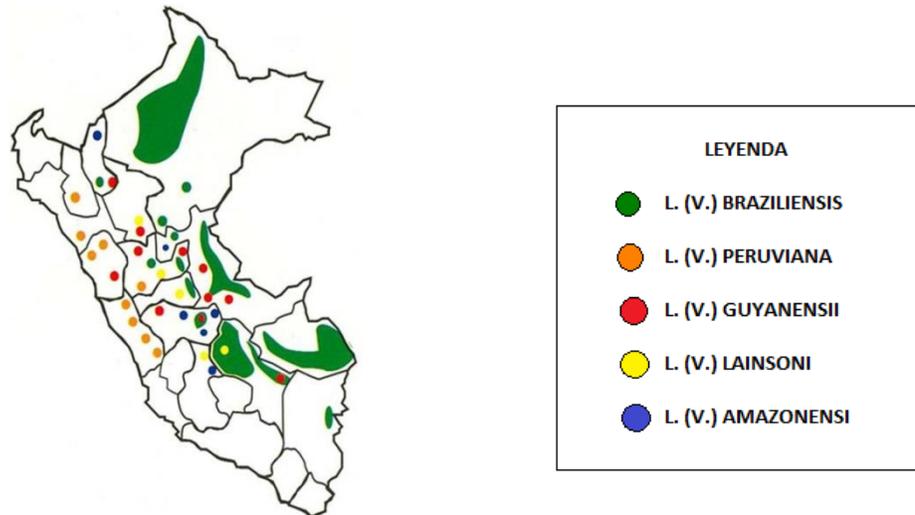


Figura 2. Distribución de las especies de Leishmania en el Perú [1].

1.3.2 Vector

La leishmaniasis es transmitida por la picadura de flebótomos, pequeñas moscas que abundan todo el año en las zonas tropicales; y en el verano, en las zonas templadas.

Asimismo, se conocen a dos géneros de flebótomos como transmisores: los Phlebótomos en Europa, Asia y África; y Lutzomyia en América. Su hábitat se encuentra en lugares húmedos, oscuros y abundante vegetación.

En nuestro país, la Lutzomyia es conocida como “Manta Blanca” o “Titira”. Este mosquito, de 1.5 a 3 mm. de tamaño, puede volar distancias de hasta 200 metros de la zona donde se cría y aparece. Además, entre las 18 y 20 horas aparecen para alimentarse de sangre humana (la más importante al interior de las casas). Su picadura es muy dolorosa y deja una mancha roja y circular [1].

1.3.3 Reservorio

Existe una gran variedad de animales silvestres y domésticos que son considerados reservorios de especies de Leishmania. Asimismo, en áreas andinas se han encontrado infectados, naturalmente, a perros domésticos (*Canis familiaris*) y a roedores (*Rattus rattus*) [1].

1.3.4 Transmisión

La Leishmaniasis se transmite al ser humano a partir de la picadura de un flebótomos, que contiene sangre infectada de algún animal considerado como reservorio [1].

1.4 Aspectos clínicos

En principio, las manifestaciones clínicas de la Leishmaniasis son variables y dependen del agente infectante, la respuesta inmune del huésped y la zona geográfica (medio ambiente).

Respecto a la Leishmaniasis Cutánea (LC), la enfermedad se desarrolla de dos semanas a dos meses, posteriormente se genera una lesión inicial con forma de una pápula eritematosa de 3mm. [1].

Asimismo, al inicio las lesiones se asemejan a la picadura de insectos, máculas rosadas y pruriginosas. Luego, las lesiones se elevan y adquieren un carácter papuloso, con una base firme e hiperémica. Por lo tanto, la LC es difícil de detectar por el paciente. Después de varios días, la lesión se convierte en una ulceración con las siguientes características: bordes definidos, indolora y de forma redondeada.

Finalmente, cuando la costra se desprende, se observa un fondo granuloso, limpio y sin sangrado en la úlcera. Caso contrario, la ulceración puede infectarse si el paciente no acude al centro médico.

1.4.1 Diagnóstico y tratamiento

En principio, para el diagnóstico de Leishmaniasis se considera los antecedentes epidemiológicos, el lugar de procedencia del paciente (residencia o visitas a zonas endémicas) y los antecedentes laborales. Asimismo, si la persona se ha enfermado anteriormente de LC, se debe conocer el tiempo de cicatrización de la ulceración.

Después de considerar los antecedentes epidemiológicos se realiza un diagnóstico clínico que definirá si se trata de LC o LM. Luego de definir el tipo de enfermedad, se realiza un diagnóstico de laboratorio por métodos directos e indirectos [1].

Por otro lado, antes de iniciar el tratamiento, se recomienda realizar una limpieza de la lesión de LC con agua mineral y jabón, para desinfectar las infecciones bacterianas. Si el paciente presenta otras enfermedades (tuberculosis pulmonar y desnutrición), se debe verificar si ha sido sometido a algún tratamiento adecuado en otro centro de salud.

En segundo lugar, la especie causante de la LC determina las características clínicas y los tratamientos. Por ello, el uso de antimoniales es el estándar para el tratamiento de esta enfermedad [1]. Es decir, en otros países se basan en tratamientos tópicos e inyecciones intralesionales de antimonio pentavalente, aplicación de Imiquimod, crioterapia o aplicación de láser de CO₂. Asimismo, tratamientos por administración oral de Azitromicina y Miltefosina; suministro de drogas vía intravenosa o intramuscular utilizando antimoniales sistémicos, pentamidina o anfotericina B [1].

En tercer lugar, en el Perú existe una investigación sobre la combinación de sales antimoniales pentavalentes e Imiquimod en crema dio como resultado una mejoría rápida y de mejor calidad en la cicatrización de la ulceración. En consecuencia, el costo y la toxicidad del tratamiento se reducen, y su práctica es el más adecuado para comunidades de bajos recursos económicos. Asimismo, el riesgo de infecciones bacterianas se reduce por el proceso acelerado del tratamiento [3].

En cuarto lugar, el Grupo de Estudios de Leishmaniasis (GEL) del Instituto de Medicina Tropical Alexander von Humboldt (IMTA vH) de la UNCH desarrolló una clasificación por estadios para elaborar una escala estándar que mide la eficiencia del tratamiento propuesto. Además, para realizar la evaluación se consideraron los siguientes criterios: porcentaje de mejoría, estatus clínico y ubicación de la lesión en uno de los cinco estadios posibles.

Tabla 1. Estadios propuestos por los médicos del IMTA vH [3].

Estadio	Observaciones
M0	No mejoría. La lesión es activa y tiene las mismas características o ha aumentado de tamaño respecto al inicio del tratamiento.
M1	El tamaño de la lesión disminuye ~50% en comparación con la lesión inicial. Signos inflamatorios mínimos y con discreta regeneración del epitelio.
M2	El tamaño de la lesión disminuye entre 50-90% en comparación con la lesión inicial. Pocos signos inflamatorios, menor que M1.
M3	El tamaño de la lesión disminuye más de 90%, con regeneración del epitelio y muy pocos signos inflamatorios.
M4	Completa regeneración del epitelio con una cicatriz característica y ausencia de inflamación.

Finalmente, según la Tabla 1, la clasificación de las lesiones mediante los estadios clínicos depende del análisis de las dimensiones de las ulceraciones y de las variaciones del tamaño, la reconstrucción epitelial, la persistencia y la ausencia de signos inflamatorios como eritema e infiltración [3]. Además, las medidas se registraron por visión directa (criterio de subjetividad de cada médico por su experiencia); en consecuencia, no existe un método estandarizado.

En la actualidad, existe un método cuantitativo que evite la subjetividad del médico tratante según las investigaciones realizadas en la “Estimación de volumen de lesiones producidas por Leishmaniasis Cutánea utilizando un Escáner Láser de triangulación 3D” [3].

Además, se establece que una medición en dos dimensiones no es suficiente para una buena identificación del estadio [3]. Por ello, gracias al trabajo de investigación que se desarrolló en el Laboratorio de Imágenes Médicas de la PUCP, existe una gran probabilidad de que el volumen de la ulceración represente una buena métrica directamente relacionada a la evolución de la enfermedad.

Por tal motivo, se plantea a largo plazo brindar un protocolo de estimación del volumen de ulceraciones de Leishmaniasis Cutánea (LC) a través de la comparación entre las técnicas de fotogrametría digital y del Escáner Láser 3D para maniqués reales, en el cual se obtiene un modelo de la nube de puntos en tres dimensiones de la ulceración. Luego, mediante la comparación entre ambas técnicas, se pretende calcular su volumen (con el registro de la precisión y la exactitud de cada método). Para ello, es necesario utilizar herramientas de procesamiento digital de imágenes, software de geometría computacional e interpolación Spline; para resolver los objetivos planteados en la presente investigación.

CAPÍTULO 2: Estado del Arte de Tecnologías de estimación del volumen de lesiones de Leishmaniasis Cutánea en la actualidad

2.1 Estado del Arte de Tecnologías de estimación del volumen de lesiones de Leishmaniasis Cutánea en la actualidad

2.1.1 Estimación de volumen de lesiones producidas por Leishmaniasis Cutánea utilizando un Escáner Láser de triangulación 3D

El presente modo de adquisición de modelos en 3D se relaciona con el principio de funcionamiento de triangulación óptica, en el cual se ubica el objeto a una determinada distancia del Escáner Láser indicada por el fabricante. Asimismo, la elección de esta distancia depende de la resolución y del rango de captura que se desea obtener. Luego el escáner procede a hacer un barrido del haz láser sobre el objeto a medir. La forma del haz láser puede variar desde puntos de nubes hasta arreglos de líneas paralelas (ver Figura 3a). Finalmente, el proceso puede tomar desde unos cuantos segundos hasta algunos minutos [3].

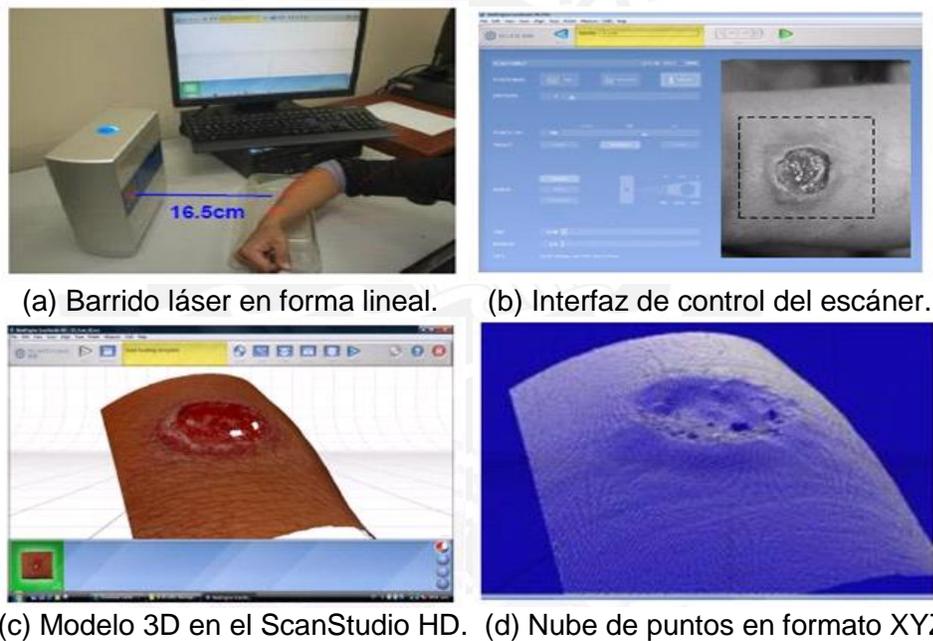


Figura 3. Adquisición de modelos 3D de lesiones de LC:(a) Barrido láser en forma lineal,(b) interfaz de control del escáner,(c) modelo 3D en el ScanStudio HD,(d) nube de puntos en formato XYZ que representa la lesión de LC [3].

Además, terminada la adquisición se obtiene la nube de puntos del objeto medido. Esta nube de puntos consiste en el conjunto de coordenadas que representan la superficie del objeto. Por ejemplo, algunos escáneres láser comerciales vienen acompañados de un paquete de software que permite representar esta nube de puntos con triángulos o polígonos (ver Figura 3b), permiten hacer suavizados e interpolación (ver Figura 3c); y finalmente, asociar la imagen de textura y color del objeto sobre el modelo tridimensional (ver Figura 3d). Finalmente, los formatos de archivos con la información 3D que se quiere exportar pueden variar entre STL, OBJ, XYZ o VRML.

Características técnicas del Escáner Láser 3D

Las principales características técnicas son las siguientes:

- **Campo de visión:** Se refiere al área espacial en la cual el objeto puede ser medido de forma satisfactoria. Asimismo, se expresa con las dimensiones de altura y ancho de un rectángulo.
- **Resolución:** Se refiere a la densidad de puntos que se obtienen del objeto medido. Usualmente se representa en puntos por pulgada cuadrada. Por ejemplo: 40k DPI2 (dots per inch squarell).
- **Exactitud:** Se refiere al error absoluto que existe en la ubicación del punto medido respecto al valor de ubicación real en el objeto. Por ejemplo: 0.005" ó 0.127 mm.
- **Precisión:** Se refiere a la variabilidad o dispersión en la ubicación de un mismo punto medido varias veces. Por ejemplo: 10 um.
- **Tiempo de muestreo:** Se refiere al tiempo que emplea el equipo en extraer la información 3D del objeto. Además, varía según la resolución deseada. Por ejemplo: 50 k puntos por segundo.

Existen otro conjunto de características que se mencionan en la documentación de un equipo 3D tales como longitud de onda del láser, brillo de láser, dimensiones del equipo, condiciones ambientales de captura de datos, características de hardware de la computadora que lo operará, tamaño estándar de los archivos con la información 3D, entre otros. Para mayor información se puede consultar los manuales técnicos del escáner Next Engine Laser Scanner HD [3].

2.1.2 La Factibilidad de la medición del volumen de heridas de Leishmaniasis Cutánea (LC) haciendo uso de un ecógrafo

Respecto a la investigación realizada por Díaz Rojas [2], utiliza la rama de la medicina que se encarga de obtener imágenes médicas en base al ultrasonido (Ultrasonografía) y el equipo que realiza esta función es el ecógrafo (ver Figura 5 y Figura 6). Asimismo, es un método usado para exploraciones en el cuerpo humano y las imágenes son nítidas (ver Figura 4). Además, el paciente u objeto no se ve expuesto a ninguna clase de radiación que sería muy dañina; y los ultrasonidos hasta el momento no parecen causar ningún efecto adverso en su utilización en pacientes, aunque esta información no está bien documentada.



Figura 4. Varias vistas de la lesión de LC utilizada en el experimento para demostrar la deformación del volumen reconstruido. La lesión está ubicada en la muñeca izquierda y es de un tamaño considerable.

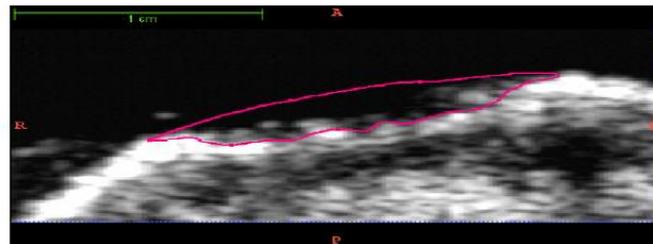


Figura 5. Imagen ultrasónica por una porción de segmentación realizada manualmente donde se muestra el “Criterio de las intensidades” utilizado para hallar el volumen a partir de una pila de imágenes.

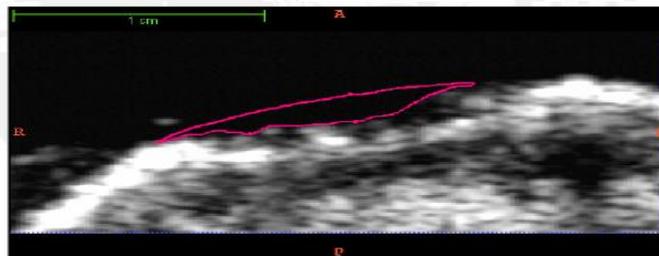


Figura 6. Imagen ultrasónica por una porción de segmentación realizada manualmente donde se muestra el “Criterio de Espacios Vacíos” utilizado para hallar el volumen a partir de una pila de imágenes [2].

2.1.3 Una herramienta de evaluación de heridas 3D completo para una exacta clasificación de tejidos y su medición

En esta investigación destaca el proyecto MEDPHOS que consiste en tres cámaras montadas en forma triangular de separación fija. Utiliza principios de la técnica de fotogrametría de cámara múltiple y geometría proyectiva. Asimismo, ofrece información tridimensional de la reconstrucción de las lesiones con la que se puede obtener mediciones de área, volumen y profundidad. Además, la etapa de calibración de este sistema es crítico en la precisión del modelo digital obtenido por lo que necesita un operador entrenado; no es portable y el sistema falla algunas veces debido a reflexiones causadas por la sudoración de la lesión, pero se alcanza valores de precisión bastante aceptables [7].

Finalmente, según el proyecto ESCALE se obtiene la reconstrucción en 3D de la lesión a partir de imágenes digitales no calibradas (ver Figura 7). Si bien se utiliza el principio de triangulación para obtener el volumen de la lesiones, no se considera la curvatura de la piel sana como límite que encapsula al orificio de la lesión. Asimismo, se logra una precisión de 3% y una exactitud de 5% en medición de volumen; no obstante, la prueba de exactitud fue realizada en base a la comparación de una medida guía con variabilidad de 13% lo que resulta poco aceptable [7].



Figura 7. Reconstrucción parcial de una ulceración en el Scale Project [7].

2.2 Objetivos

2.2.1 Objetivo general

Diseño de un Protocolo de Estimación del Volumen de ulceraciones de Leishmaniasis Cutánea a través de la Comparación entre las Técnicas de Fotogrametría Digital y del Escáner Láser 3D.

2.2.2 Objetivos específicos

- Comparación y alineación de los modelos en 3D, con el “Protocolo Mosaico Mejorado (PMM)” para establecer un método de Fotogrametría Digital comparable con el Escáner Láser 3D.
- Estimación del volumen de maniqués (pequeño, mediano y grande) de ulceraciones de LC con el “Protocolo Mosaico Mejorado (PMM)”, como método de Fotogrametría Digital.
- Estimación del volumen de maniqués (pequeño, mediano y grande) de ulceraciones de LC con el Escáner Láser 3D.
- Comparación del volumen obtenido entre el “Protocolo Mosaico Mejorado (PMM)” de Fotogrametría Digital y el Escáner Láser 3D.
- Cálculo del error de precisión del volumen en porcentaje para cada maniquí de LC (pequeño, mediano y grande; sin incluir el valor del volumen del Escáner Láser 3D).
- Cálculo del error de la exactitud del volumen en porcentaje para cada maniquí de LC (pequeño, mediano y grande; respecto al valor del volumen del Escáner Láser 3D).

2.3 Hipótesis

2.3.1 Hipótesis principal

Dado que en el Perú aún no se ha realizado y comprobado investigaciones respecto a la obtención de un indicador biomédico de estimación del volumen de ulceraciones de LC para establecer un avance o disminución del tratamiento clínico del paciente, y garantizar su cura parcial o definitiva mediante una técnica o protocolo de fotogrametría digital comparable a la técnica del Escáner Láser 3D; entonces se propone realizar un protocolo de estimación del volumen de ulceraciones de LC a través de la comparación entre las técnicas de fotogrametría digital y del Escáner Láser 3D.

Para ello, se utiliza el software Agisoft PhotoScan Profesional para crear reconstrucciones tridimensionales. Luego, el modelo volumétrico de la lesión se compara con el modelo obtenido del Escáner Láser 3D a través de un registro de puntos. Finalmente, se medirá la exactitud y la precisión de estas mediciones.

CAPÍTULO 3: Diseño del Protocolo de Estimación del Volumen de ulceraciones de Leishmaniasis Cutánea a través de la Comparación entre las Técnicas de Fotogrametría Digital y del Escáner Láser 3D

En el presente capítulo se describe el mejor protocolo de estimación del volumen de maniqués de ulceraciones de Leishmaniasis Cutánea (LC) utilizando el software Agisoft PhotoScan Profesional en base al mejor protocolo propuesto de Fotogrametría Digital, y tiene como objetivo principal comparar estos resultados obtenidos con los resultados del Escáner Láser 3D (Equipo NextEngine Laser Scanner HD) y obtener los siguientes parámetros: el error de precisión y el error de exactitud del volumen, en porcentaje.

Herramientas utilizadas para la tesis de investigación:

- Equipo NextEngine Laser Scanner HD, con su respectivo software ScanStudio HD.
- Software Agisoft PhotoScan Standard Edition y Profesional.
- Software MeshLab v.1.3.2.
- Software CloudCompare v.2.
- Software MatLab v.7.12.0.
- Cámara digital CANON POWERSHOT A720 IS - 8 MP.
- Cámara digital modelo SONY CYBERSHOT DSC-W170 - 10.1 MP.
- Fluorescente blanco de AC 220-240V, 50-60 Hz, 36 W.
- Montaje mecánico con 25 posiciones móviles para tomas fotográficas iniciales.
- Regla de 30 centímetros.
- Soporte.

3.1 Características del Escáner Láser 3D

El Escáner Láser 3D a utilizar en el trabajo de investigación es el NextEngine Laser Scanner HD®, basado en la tecnología de Triangulación Láser Multifranja (siglas en inglés: MLT). Además, está equipado de un arreglo doble de cuatro láser de estado sólido (clase 1M, 10mV, $\lambda=650\text{nm}$) y de dos arreglos de sensores CMOS RGB de 3 Megapíxeles (MP) (ver Figura 8a) [3].

Asimismo, su funcionamiento tiene dos modos de captura (modo Macro y modo Wide) con diferencias en el rango de visión, exactitud, tiempo de captura, distancia de ubicación del objeto respecto al escáner para cada modo (ver Tabla 2).



Figura 8: a) Montaje del NextEngine Laser Scanner HD con los siguientes componentes: la cámara CMOS (2) y los arreglos de láser (1); b) Interfaz de usuario del ScanStudioHD para controlar la adquisición del escáner, con sus modos de operación [3].

El equipo NextEngine Laser Scanner HD funciona con diferentes posicionamientos en la captura de datos, el cual permite rotar al objeto en 360° y extraer información en todas sus vistas. Asimismo, el tiempo de adquisición de los datos va a depender del modo y resolución que se utilice.

Tabla 2. Especificaciones del fabricante respecto al Escáner Láser NextEngine® [3].

(*) DPI² = *Dots per inch square* (puntos por pulgada cuadrada)

	Modo Macro	Modo Wide
Campo de visión	5.1x3.8" (129.5x96.5mm)	13.5x10.1"(342.9x256.5mm)
Resolución máxima	160k DPI ² *	22.5 DPI ² *
Exactitud	0.005" (0.127mm)	0.015"(0.381mm)
Ubicación del objeto desde el escáner	6.5" (16.51cm)	17" (43.18cm)

En principio, el montaje del sistema consiste en la habilitación del Escáner Láser NextEngine controlada por la computadora a través del software ScanStudio HD. Luego, se coloca el soporte a 6.5" (16.51cm.) del escáner para adecuar los maniqués de LC (pequeño, mediano y grande) y obtener los tres modelos en formato OBJ. Además, se utiliza el modo Macro del escáner a la primera velocidad SD obteniéndose una resolución de 10k DPI2 (puntos por pulgada cuadrada) y un tiempo de toma de datos de 77 segundos. Finalmente, se utilizó el modo de captura Single el cual hace una sola toma de información (modelo) del objeto a medir [3]. Nota: la separación de 6.5" es debido al modo Macro elegido [3].

3.2 Metodología de la investigación

En principio, las consideraciones más importantes para diseñar el mejor protocolo propuesto son los siguientes:

A. Proponer el "Protocolo Treuillet", que consiste en la captura de imágenes digitales con las cámaras digitales CANON POWERSHOT A720 IS - 8 MP y SONY CYBERSHOT DSC-W170 - 10.1 MP desde 25 posiciones diferentes (intersecciones) con la siguiente variación de los ángulos: 10°, 20°, 25°, 30° y 40°; y con diferentes distancias radiales de 34 cm., 37 cm., 40 cm., 43 cm. y 46 cm. [5] (ver Figura 9.1a).

B. Proponer el "Protocolo Mosaico", que consiste en la captura de imágenes digitales con las cámaras digitales CANON POWERSHOT A720 IS - 8 MP y SONY CYBERSHOT DSC-W170 - 10.1 MP desde varias posiciones verticales (en el eje z), con una distancia focal perpendicular menor a 34 cm. respecto a los maniqués de LC pequeño, mediano y grande (ver Figura 9.1b y Figura 9.1c).

C. Realizar las capturas fotográficas con fondos de color oscuro y con luz artificial (fluorescente blanco de 36 W.), con la finalidad de evitar que la luz natural genere sombras sobre los maniqués de LC (pequeño, mediano y grande).

D. Proponer el "Protocolo Mosaico Mejorado (PMM)", que consiste en mejorar la calidad de imágenes digitales para obtener los modelos en el Agisoft PhotoScan Profesional, ya que sí se reconstruye los tres modelos de los maniqués de LC con la cámara digital SONY CYBERSHOT DSC - W170 - 10.1 MP.

E. Finalmente, para continuar con el trabajo de tesis fueron necesarios considerar una buena disposición de las imágenes, con nitidez suficiente, área adecuada y un número suficiente de imágenes digitales.

En segundo lugar, mediante el presente diagrama de flujo se representa la metodología de la investigación final de tesis (ver Figura 9).

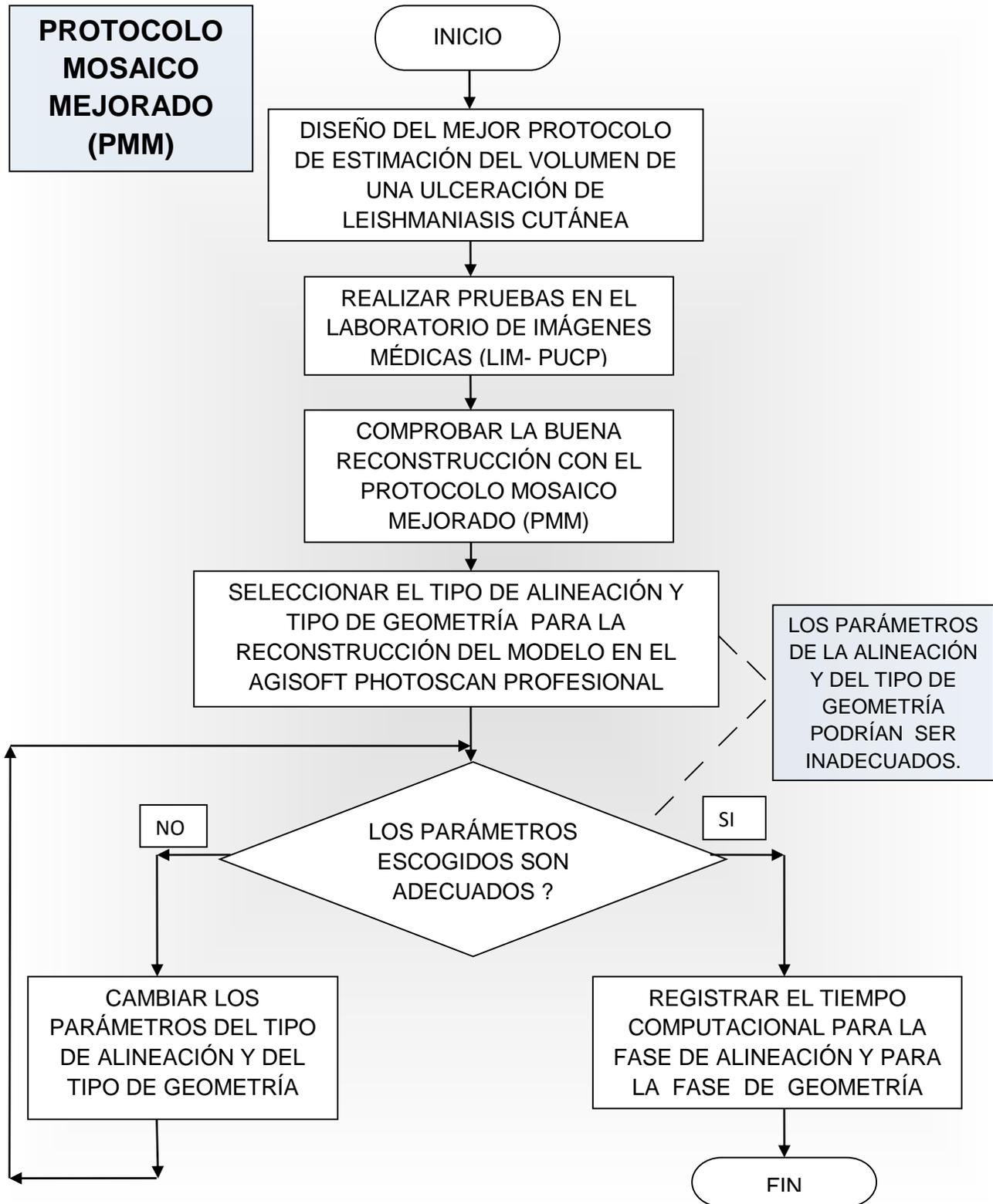
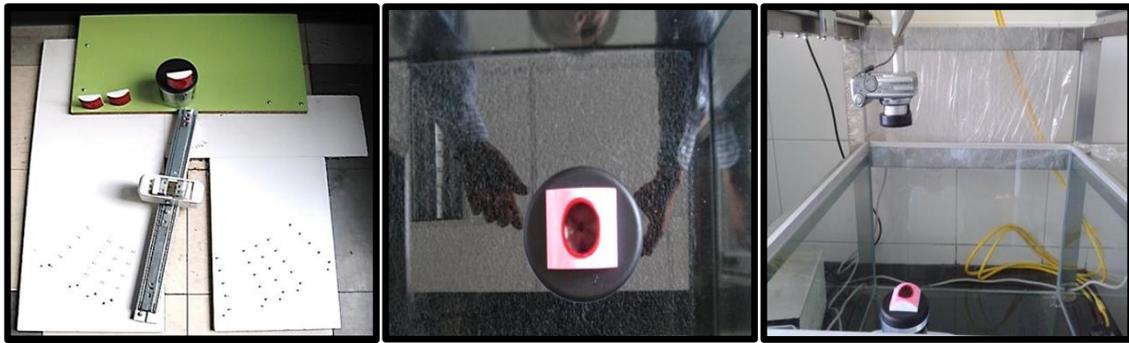


Figura 9. Diagrama de flujo que representa la metodología de investigación final.



(a)

(b)

(c)

Figura 9.1 (a) Montaje manual para el “Protocolo Treuillet”. (b) y (c) Montaje manual para el “Protocolo Mosaico y Protocolo Mosaico Mejorado (PMM)”.

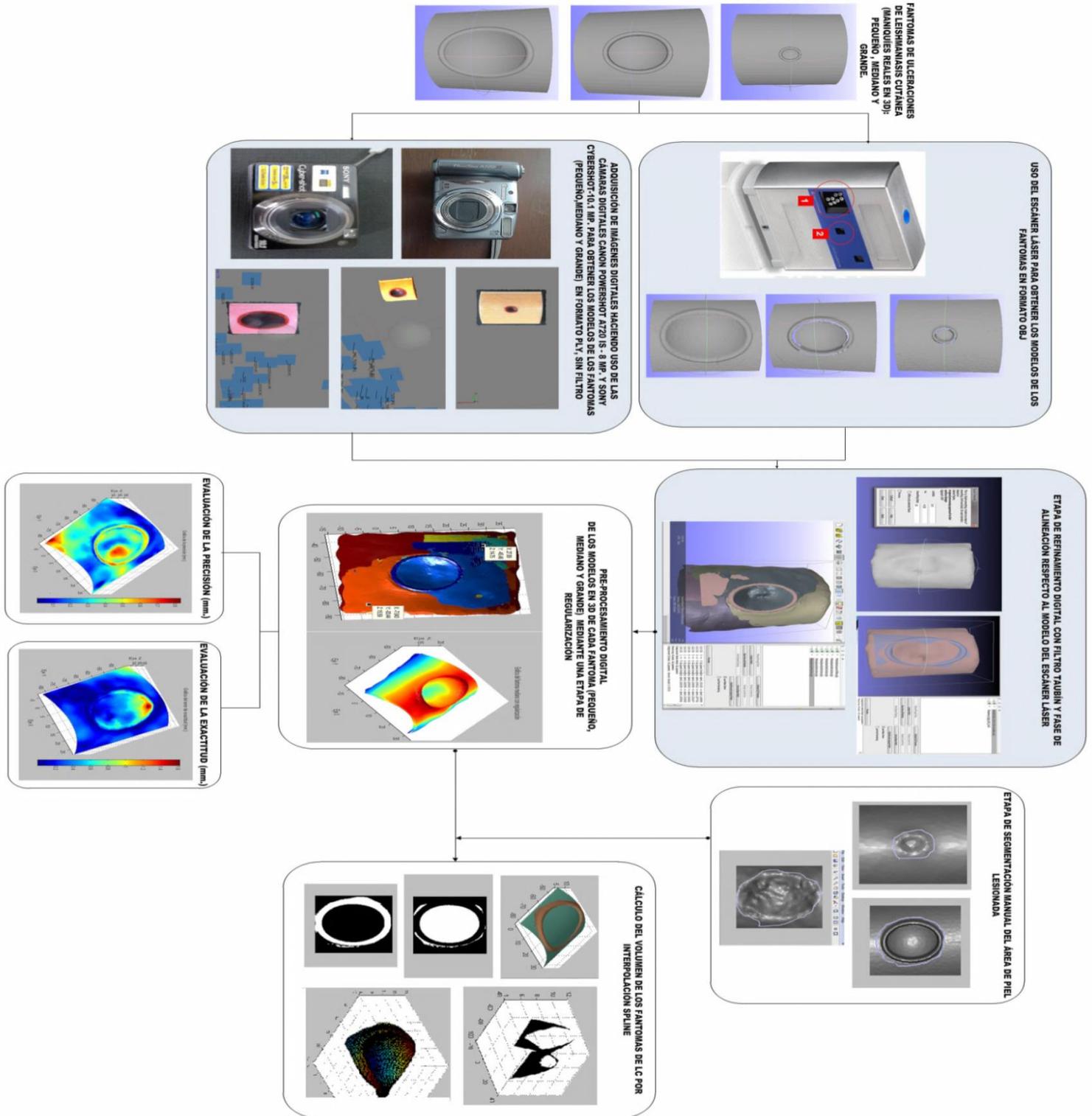
3.3 Definiciones operativas

Es necesario definir ciertas variables que tienen repercusión o afectan el correcto funcionamiento de la técnica de estimación del volumen para tres maniqués de Leishmaniasis Cutánea (LC) :

- La exactitud: La mínima variación de magnitud que se puede apreciar mediante el error absoluto en porcentaje que se define como la diferencia entre el valor de la magnitud experimental (modelo del Agisoft PhotoScan Profesional) y el valor de la magnitud verdadera (modelo del Escáner Láser 3D).
- Punto de muestreo: Lugar de donde son tomadas las mediciones y donde se encuentra la cámara fotográfica digital.
- La precisión: Para dar el mismo resultado en mediciones diferentes realizadas en las mismas condiciones de la técnica de estimación del volumen (Protocolo Mosaico Mejorado o PMM).
- Distorsión óptica o resolución: Deformación que sufre la imagen digital después de capturarla a través de la cámara fotográfica digital.

3.4 Sistema de adquisición de imágenes digitales y la reconstrucción de modelos tridimensionales

Figura 10. Diagrama de bloques del sistema de adquisición de imágenes digitales y la reconstrucción de modelos tridimensionales.



3.4.1 Etapa de pre-tratamiento

En la primera etapa se realiza el proceso de la adquisición de imágenes digitales haciendo uso de las cámaras digitales CANON POWERSHOT A720 IS - 8 MP y SONY CYBERSHOT DSC-W170 - 10.1 MP para obtener los modelos de los maniqués de LC (pequeño, mediano y grande) en formato PLY, sin filtro.

3.4.1.1 Construcción de los modelos en el Agisoft PhotoScan Profesional

Los protocolos propuestos respecto a la técnica de fotogrametría digital a partir de una secuencia de imágenes digitales, son los siguientes:

3.4.1.1.1 Protocolo Treuillet (ver montaje en la Figura 9.1a)

A. En la primera fase, se colocaron los maniqués en el origen de coordenadas. Luego se distribuye la ubicación de la cámara digital en 25 posiciones diferentes para fotografiarlo. Es decir, se generan posiciones con la siguiente variación de los ángulos: 10°, 20°, 25°, 30° y 40°; y con diferentes distancias radiales de 34 cm., 37 cm., 40 cm., 43 cm. y 46 cm. En consecuencia, se observan 25 intersecciones.

B. En la segunda fase, se realiza la captura de las 25 imágenes digitales.

C. En la tercera fase, se realizó un registro computacional de las imágenes digitales a través del Agisoft PhotoScan Profesional mediante cuatro pasos esenciales:

Paso 1: Cargar un registro computacional mediante las 25 imágenes digitales en el Agisoft PhotoScan Profesional.

Paso 2: Crear mediante la alineación de imágenes digitales los puntos comunes a través del Agisoft PhotoScan Profesional; para ello, se realizó primero el “Protocolo de Adquisición de Imágenes Digitales de Treuillet”.

Paso 3: Tras la detección de puntos comunes de las 25 imágenes digitales, mediante una tercera acción se desencadena la creación de la nube de puntos en 3D. Tras finalizar este proceso, dependiendo del número de imágenes usadas, y puntos creados, podemos observar el modelo.

Paso 4: El cuarto proceso que nos falta, es crear lo que se conoce como “nube de puntos densa”; es decir, a partir de la nube anterior “poco densa” se van generando nuevos puntos a partir de las 25 imágenes digitales. Mientras que el paso anterior sólo tenemos puntos con coordenadas XYZ, mediante la creación de la nube densa vamos a tener puntos con información XYZ RGB por lo que el resultado final será una nube de puntos cuyo aspecto será el de una imagen 3D más o menos realista de cada maniquí de LC.

Finalmente, este primer protocolo fue descartado por la aplicación ya que no se obtiene una correcta reconstrucción de los modelos en formato PLY con las cámaras digitales CANON POWERSHOT A720 IS - 8 MP. y SONY CYBERSHOT DSC-W170 - 10.1 MP (ver Figura 10.1).

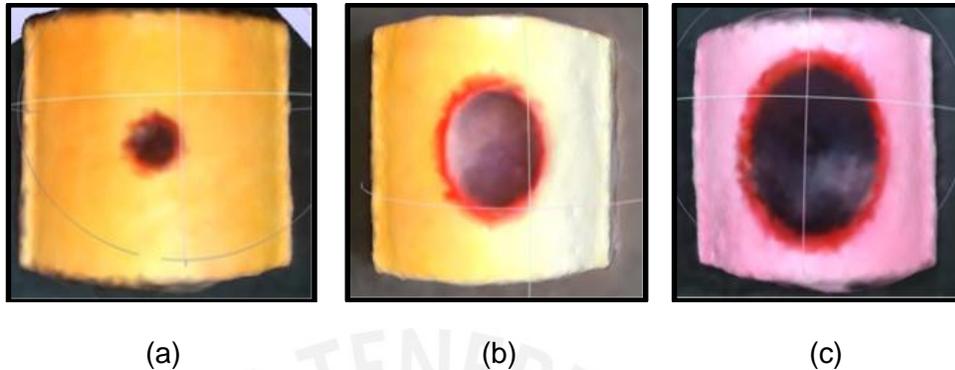


Figura 10.1 Reconstrucción de los maniqués de LC pequeño (a), mediano (b) y grande (c).

3.4.1.1.2 Protocolo Mosaico y Protocolo Mosaico Mejorado (PMM)

Protocolo Mosaico: Consiste en la captura de imágenes con las cámaras digitales CANON POWERSHOT A720 IS - 8 MP y SONY CYBERSHOT DSC-W170 - 10.1 MP desde varias posiciones verticales (en el eje z), con una distancia focal perpendicular menor a 34 cm. respecto a los maniqués pequeño, mediano y grande (según la “Metodología de la investigación” en el punto 3.2). Es un proceso de cálculo intenso ya que requiere un gran consumo de recursos por parte del equipo informático, requiriendo una división de equipos informáticos (servidor y computadora del Laboratorio de Imágenes Médicas LIM-PUCP, computadora portátil personal y otra computadora no portátil) para llevarla a cabo (ver Tabla 3). Sin embargo, se descarta el procedimiento para la cámara digital CANON POWERSHOT A720 IS - 8 MP por la baja resolución de la imagen digital y por no obtener las reconstrucciones de los maniqués pequeño, mediano y grande. Por otro lado, con la cámara digital SONY CYBERSHOT DSC-W170 - 10.1 MP es factible realizar el presente protocolo ya que sí se obtiene una correcta reconstrucción de los modelos de los maniqués de LC (pequeño, mediano y grande) en formato PLY.

Protocolo PMM: También denominado “Protocolo Mosaico Mejorado”, que consiste en seguir los mismos procedimientos del “Protocolo Mosaico”(ver el “Diagrama de flujo que representa la metodología de la investigación final”, en la Figura 9); mediante el cual se mejora la calidad de las imágenes digitales con la cámara digital SONY CYBERSHOT DSC-W170 - 10.1 MP , y se obtiene mejores modelos en el Agisoft PhotoScan Profesional; por lo tanto, una óptima reconstrucción de los maniqués de LC (pequeño, mediano y grande) en formato PLY. Después, se utiliza el presente “Protocolo Mosaico Mejorado” para obtener fotografías mediante cinco sets de imágenes digitales de los maniqués pequeño, mediano y grande (ver Tabla 3).

Una vez ejecutados los algoritmos con la ayuda del software Agisoft PhotoScan Profesional se registra los mejores tiempos computacionales mediante el tipo de alineación “High” y tipo de geometría “High” (ver Figura 12), para continuar con trabajos de optimización de dicha nube. En consecuencia, se logra obtener los modelos de las reconstrucciones de los maniqués pequeño, mediano y grande (ver Figura 11).

Finalmente, al obtenerse el modelo 3D digitalizado de los maniqués de LC (pequeño, mediano y grande); es importante destacar las características métricas del modelo, que nos permiten realizar análisis y mediciones sobre él con precisiones milimétricas.

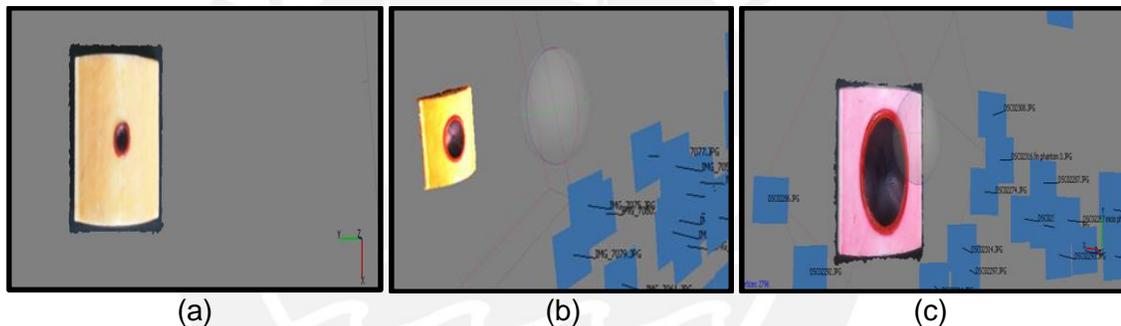
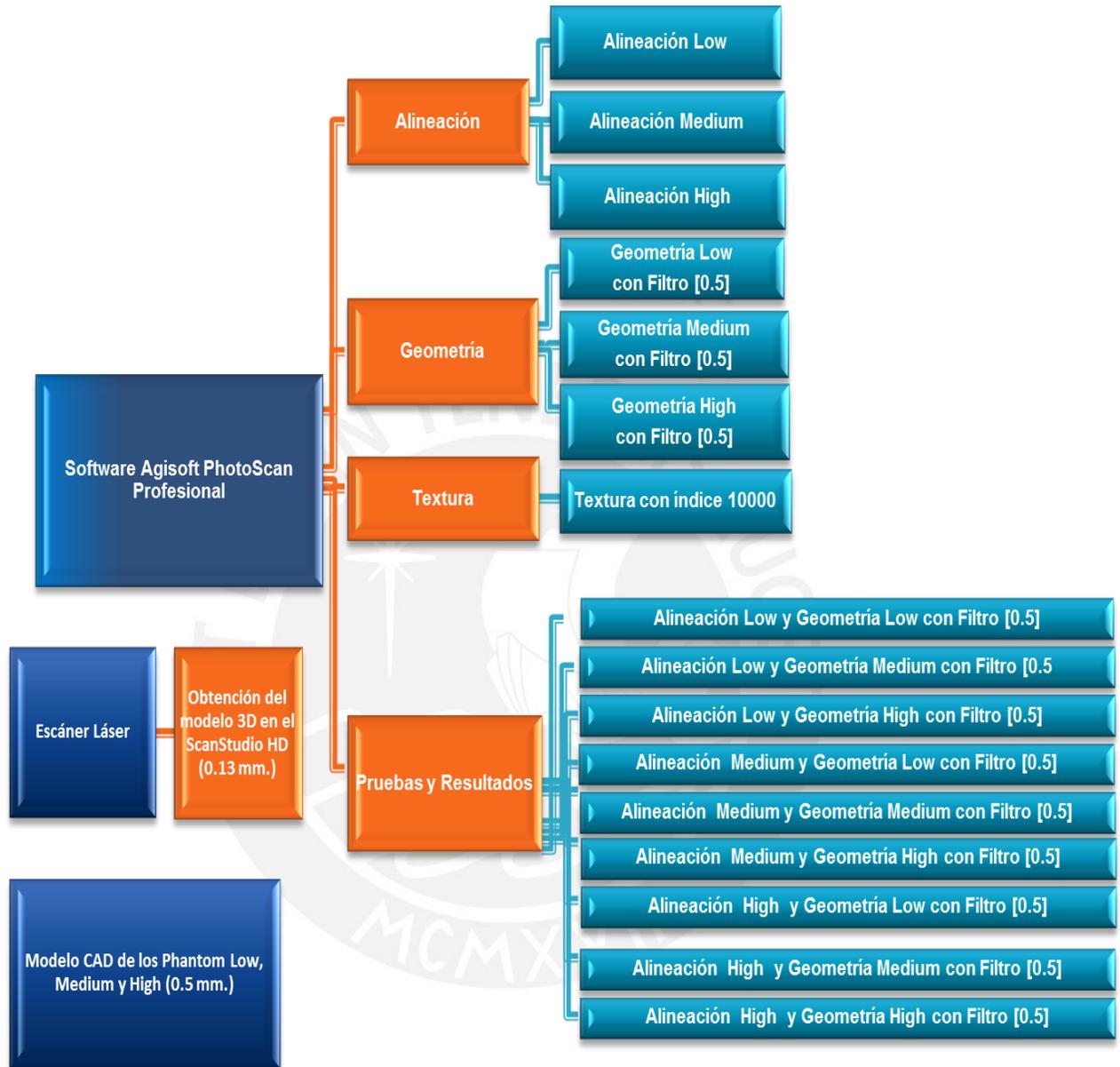


Figura 11. Proceso de reconstrucción de los maniqués de LC pequeño (a), mediano (b) y grande (c).

Tabla 3. Cantidad de imágenes digitales aleatorias para los cinco sets de fotografías, correspondientes a los maniquíes pequeño, mediano y grande con el tipo de alineación "High" y tipo de geometría "High".

PROTOCOLO MOSAICO MEJORADO (PMM)		
MANIQUÍ	SET	NÚMERO DE IMÁGENES DIGITALES
GRANDE	1	25
	2	26
	3	27
	4	26
	5	23
MEDIANO	1	25
	2	24
	3	22
	4	23
	5	24
PEQUEÑO	1	21
	2	23
	3	25
	4	26
	5	24
PROTOCOLO MOSAICO		
MANIQUÍ	SET	NÚMERO DE IMÁGENES DIGITALES
GRANDE	1	50
	2	26
	3	32
	4	44
	5	30
MEDIANO	1	49
	2	36
	3	37
	4	32
	5	31
PEQUEÑO	1	36
	2	26
	3	33
	4	32
	5	30

Figura 12. Tipo de Alineación y geometría en el software Agisoft PhotoScan Profesional, precisión del modelo en el Escáner Láser 3D y del modelo del CAD.



3.4.2 Metodología de cuantificación y análisis por comparación de modelos en el software CloudCompare para los modelos del Agisoft PhotoScan Profesional, CAD 3D y Escáner Láser 3D.

Esta metodología de cuantificación y análisis por comparación entre los modelos del Agisoft PhotoScan Profesional, CAD 3D y Escáner Láser 3D, sirve para escoger el modelo patrón como referencia a comparar con el modelo del Agisoft PhotoScan Profesional de los maniqués de LC (pequeño, mediano y grande); en formato PLY.

Para ello, se calcula la distancia promedio (mean distance) de la diferencia entre los modelos Agisoft-CAD3D, Agisoft-LÁSER3D y LÁSER3D-CAD3D (en mm.); y su respectiva desviación estándar (standard deviation) para los maniqués de LC (pequeño, mediano y grande). Asimismo, se obtiene el histograma de colores de las distancias de la diferencia entre los modelos propuestos.

Por otro lado, primero se separa la parte de la lesión de LC del CAD 3D en el software CloudCompare. Es decir, se usa la opción “Mesh remaining” para realizar el corte y se obtiene la parte de la lesión de LC. Por ejemplo, se usa el modelo del maniquí pequeño (ver Figura 12.1).

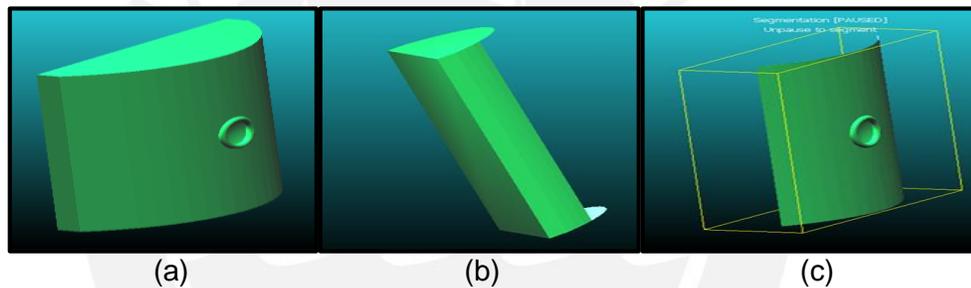


Figura 12.1 Separación de la lesión de LC del maniquí pequeño del CAD 3D en el software CloudCompare. Modelo del CAD 3D real (a), modelo del CAD 3D sin la lesión de LC pequeño (b) y modelo de la lesión de LC pequeño separado (c).

Sin embargo, no se utilizan los modelos separados del CAD 3D de los maniqués de LC (pequeño, mediano y grande), ya que son muy pocos los triángulos que lo representan (ver Figura 12.2). Para ello, se discretiza con 1 millón de puntos en 3D el modelo CAD 3D de los maniqués de LC (pequeño, mediano y grande), mediante las opciones “Mesh” y “Sample points” del software CloudCompare.

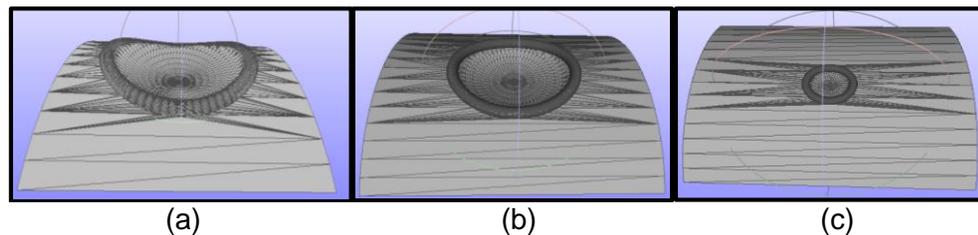


Figura 12.2 Modelos separados del CAD 3D de los maniqués de LC grande (a), mediano (b) y pequeño (c).

En primer lugar, se realiza la alineación de los tres modelos: Agisoft PhotoScan Profesional y Escáner Láser 3D, respecto al CAD 3D; para los maniqués de LC pequeño, mediano y grande (ver Figura 12.3). Asimismo, se utiliza los procedimientos de la “Etapa de refinamiento digital en el software MeshLab” (ver en el punto 3.4.3 del presente capítulo).

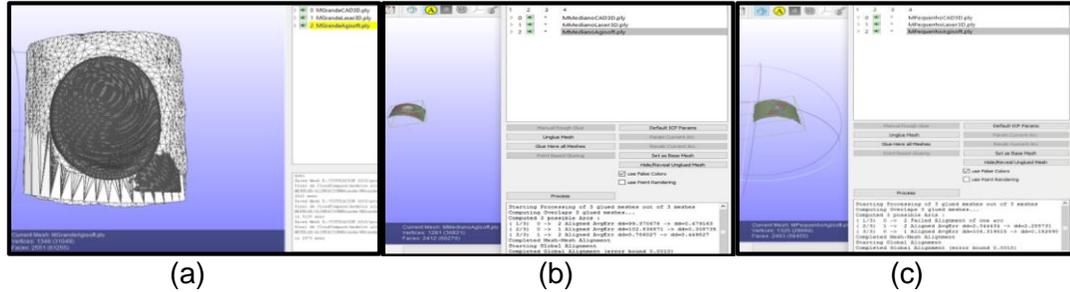


Figura 12.3 Alineación de los tres modelos en formatos PLY: Agisoft PhotoScan Profesional y Escáner Láser, respecto al CAD 3D; para los maniqués de LC grande (a), mediano (b) y pequeño (c).

En segundo lugar, se comparan los modelos del Agisoft PhotoScan Profesional y del CAD 3D (Agisoft-CAD3D); ya que en el software del CloudCompare solo se puede realizar la comparación entre dos modelos. En tercer lugar, se comparan los modelos del Agisoft PhotoScan Profesional y del Escáner Láser 3D (Agisoft-LÁSER3D). En cuarto lugar, se comparan los modelos del Escáner Láser 3D y del CAD 3D (LÁSER3D-CAD3D).

En esta metodología no se activa la opción “signal distance”; es decir, la diferencia de las distancias entre los modelos será en valor absoluto. Caso contrario, al activar la opción, si un modelo está por encima del otro, sale positivo; y si está por debajo, sale negativo.

A continuación, se muestran las comparaciones entre los modelos para el maniquí grande, del LÁSER3D-CAD3D (mean distance = 0.000001, standard deviation = 0.000001, tiempo computacional = 2.00 s.), Agisoft-CAD3D (mean distance = 1.189972, standard deviation = 1.328209, tiempo computacional = 0.36 s.), y Agisoft-LÁSER3D (mean distance = 1.189972, standard deviation = 1.328209, tiempo computacional = 0.24 s.) (ver Figura 12.4).

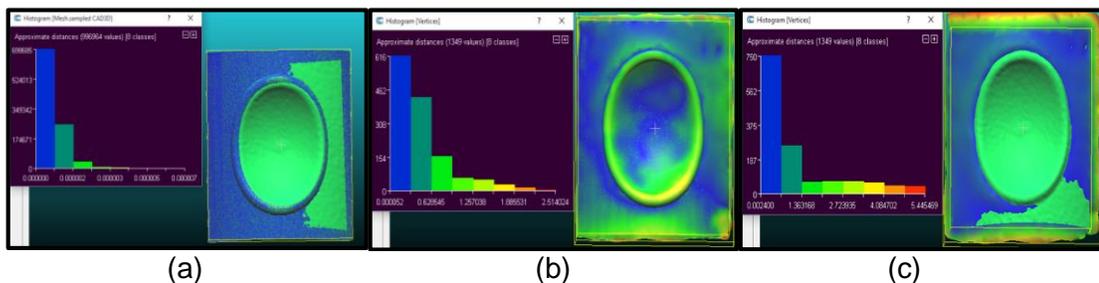


Figura 12.4 Comparación entre los modelos en el CloudCompare para el maniquí grande: modelos LÁSER3D-CAD3D (a), Agisoft-CAD3D (b) y Agisoft-LÁSER3D (c).

Luego, se muestran las comparaciones entre los modelos para el maniquí mediano, del LÁSER3D-CAD3D (mean distance = 0.000001, standard deviation = 0.000001, tiempo computacional = 1.42 s.), Agisoft-CAD3D (mean distance = 0.386774, standard deviation = 0.482183, tiempo computacional = 0.18 s.), y Agisoft-LÁSER3D (mean distance = 0.339444, standard deviation = 0.502362, tiempo computacional = 0.13 s.) (ver Figura 12.5).

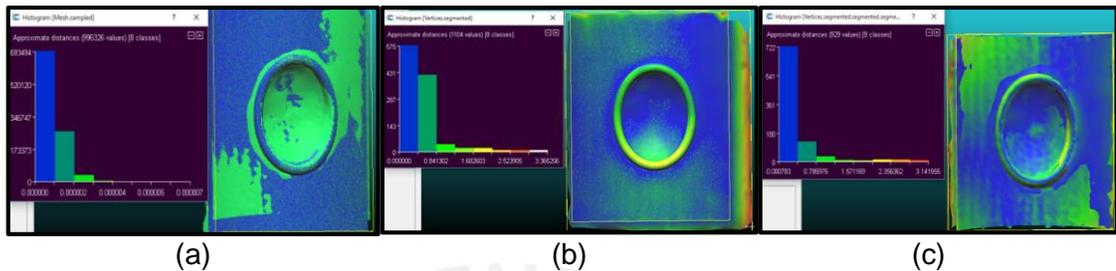


Figura 12.5 Comparación entre los modelos en el CloudCompare para el maniquí mediano: modelos LÁSER3D-CAD3D (a), Agisoft-CAD3D (b) y Agisoft-LÁSER3D (c).

Finalmente, se muestran las comparaciones entre los modelos para el maniquí pequeño, del LÁSER3D-CAD3D (mean distance = 0.000001, standard deviation = 0.000001, tiempo computacional = 1.99 s.), Agisoft-CAD3D (mean distance = 0.525295, standard deviation = 0.530274, tiempo computacional = 1.07 s.), y Agisoft-LÁSER3D (mean distance = 0.524959, standard deviation = 0.517268, tiempo computacional = 0.12 s.) (ver Figura 12.6).

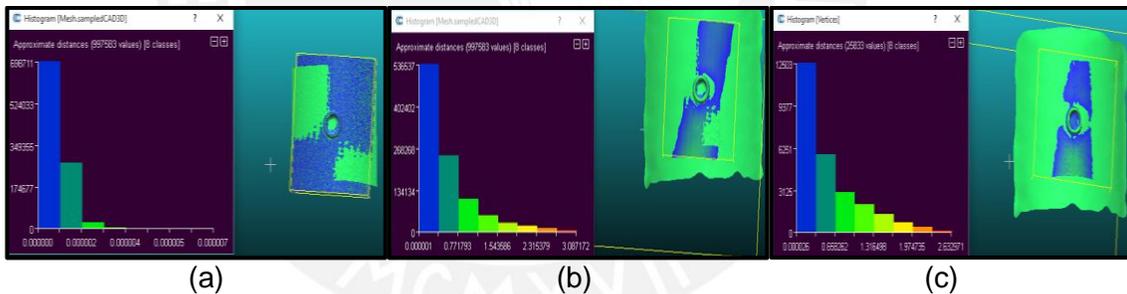


Figura 12.6 Comparación entre los modelos en el CloudCompare para el maniquí pequeño: modelos LÁSER3D-CAD3D (a), Agisoft-CAD3D (b) y Agisoft-LÁSER3D (c).

Asimismo, existen zonas en los bordes de la erosión del modelo del Agisoft PhotoScan Profesional, en las cuales no han sido bien atenuadas; por lo tanto, se analizan las comparaciones entre modelos de forma cualitativa. Es decir, en las zonas de color azul y celeste existen menor error de aproximación de distancias entre modelos; en las de color rojo y anaranjado, existen mayor error de aproximación de distancias entre modelos; y en las zonas de color amarillo y verde existen un error promedio de aproximación de distancias entre modelos.

En consecuencia, se utiliza el modelo del Escáner Láser 3D como patrón de referencia a comparar con el modelo del Agisoft PhotoScan Profesional, ya que el error de aproximación de distancias entre modelos es muy bajo (0.000001). Asimismo, tiene muy buena exactitud y fidelidad.

3.4.3 Etapa de refinamiento digital en el software MeshLab

Esta etapa consiste en aplicar el proceso de refinamiento digital en el software MeshLab para el “Protocolo Mosaico” y “Protocolo Mosaico Mejorado”.

Es decir, se aplica el filtro Taubín con $\lambda = 0.50$ y $\mu = -0.53$, para suavizar el modelo de cada maniquí de LC (pequeño, mediano y grande); luego los cinco modelos del Agisoft PhotoScan Profesional se alinean con el modelo del Escáner Láser 3D (ver Figuras 13 y 14). En consecuencia, se generan seis archivos y se guardan en formato PLY. Además, en el MeshLab se utiliza la opción “freeze current matrix” para obtener seis archivos sin formatos matriciales (ver Figura 15). Finalmente, se guardan los seis archivos en formato STL.

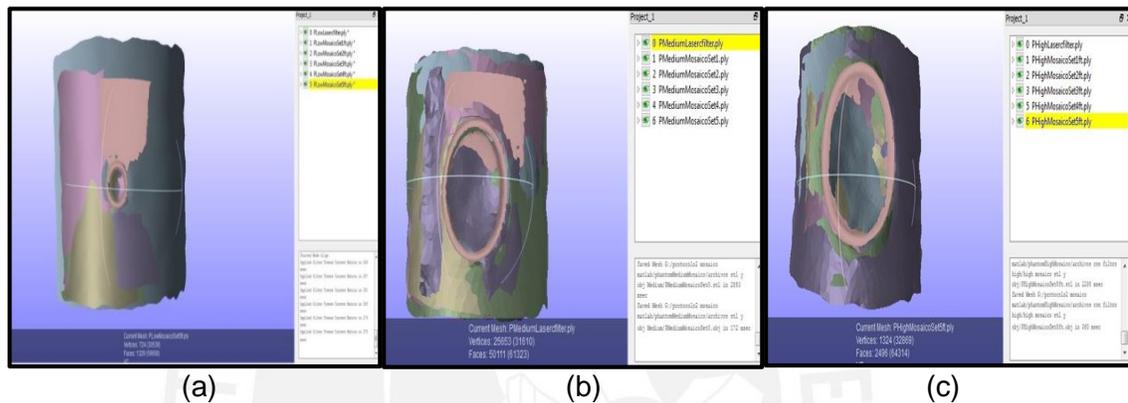


Figura 13. Protocolo Mosaico: alineación de los cinco modelos obtenidos en el Agisoft PhotoScan Profesional respecto al modelo del Escáner Láser, en formatos PLY; para los maniqués pequeño (a), mediano (b) y grande (c).

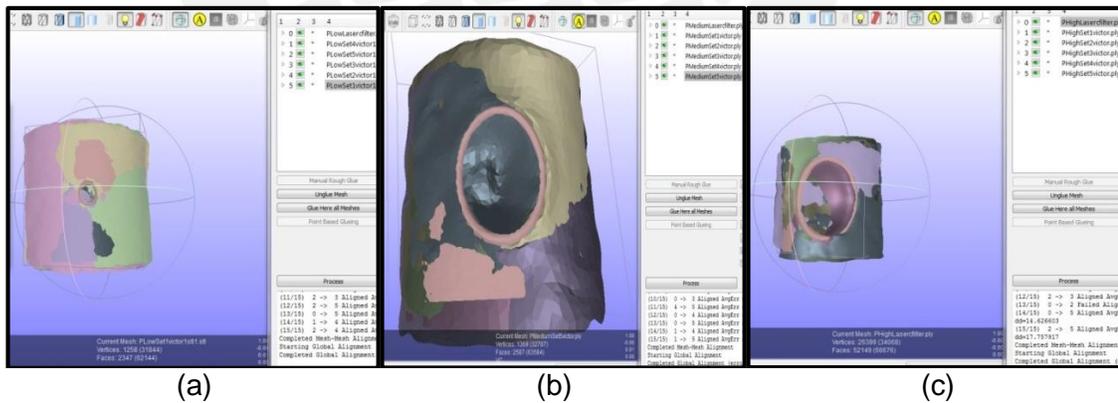


Figura 14. Protocolo Mosaico Mejorado: alineación de los cinco modelos obtenidos en el Agisoft PhotoScan Profesional respecto al modelo del Escáner Láser, en formatos PLY; para los maniqués pequeño (a), mediano (b) y grande (c).

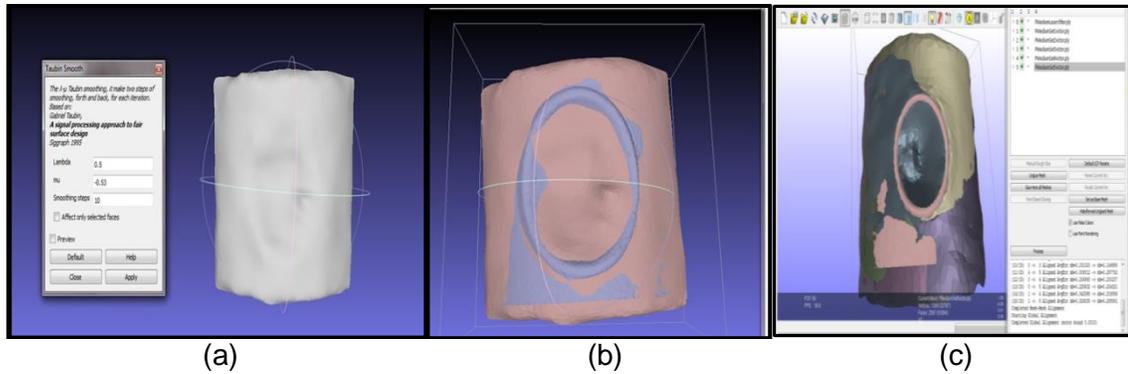


Figura 15. (a) Filtro Taubín para suavizar el modelo de cada maniquí de LC. (b) Alineación de un modelo del Agisoft PhotoScan Profesional (en formato PLY) respecto al modelo del Escáner Láser. (c) Alineación de los cinco modelos del Agisoft PhotoScan Profesional (en formato PLY) respecto al modelo del Escáner Láser y aplicación de la opción “freeze current matrix” para obtener seis archivos sin formato matricial.

Asimismo, los cinco modelos de los maniqués mediano y grande (Protocolo Mosaico y Protocolo Mosaico Mejorado) se realizaron con los siguientes parámetros de alineación en el MeshLab: Sample number=10000, Minimal Starting Distance=0.5, Target Distance=0.5, Max Iteration Num=50, MSD Reduce Factor=0.8 y Sample Cut High=0.75. Por otro lado, para el modelo del maniquí pequeño (Protocolo Mosaico y Protocolo Mosaico Mejorado), se cambia el valor del siguiente parámetro: Sample number=1000 (ver Figura 16); y los demás parámetros se conservan: Minimal Starting Distance=0.5, Target Distance=0.5, Max Iteration Num=50, MSD Reduce Factor=0.8, Sample Cut High=0.75.

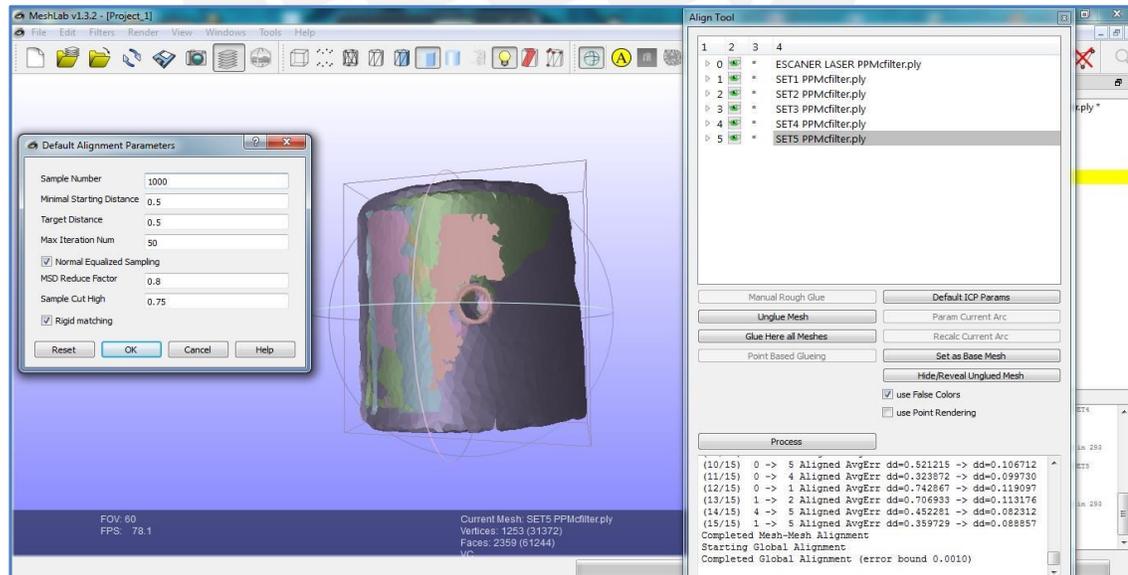


Figura 16. Modelo del maniquí pequeño (Protocolo Mosaico y Protocolo Mosaico Mejorado) con el parámetro: Sample number=1000; y los demás parámetros se conservan: Minimal Starting Distance=0.5, Target Distance=0.5, Max Iteration Num=50, MSD Reduce Factor=0.8, Sample Cut High=0.75.

3.4.4 Etapa de comparación entre el “Protocolo Mosaico” y el “Protocolo Mosaico Mejorado (PMM)” mediante el software CloudCompare

Etapa de comparación entre modelos del “Protocolo Mosaico” respecto al modelo del Escáner Láser para establecer el histograma de colores mediante el cálculo de la desviación estándar inicial, a través de la distancia promedio de la diferencia entre los cinco modelos del Agisoft PhotoScan Profesional y del Escáner Láser.

En esta etapa se compara los modelos de los tres maniqués de LC, generados en el MeshLab (en formato STL), con el modelo generado con el Escáner Láser para escoger si el “Protocolo Mosaico Mejorado (PMM)” es mejor que el “Protocolo Mosaico”. A continuación, se muestra las comparaciones para los maniqués pequeño, mediano y grande (ver Figura 17).

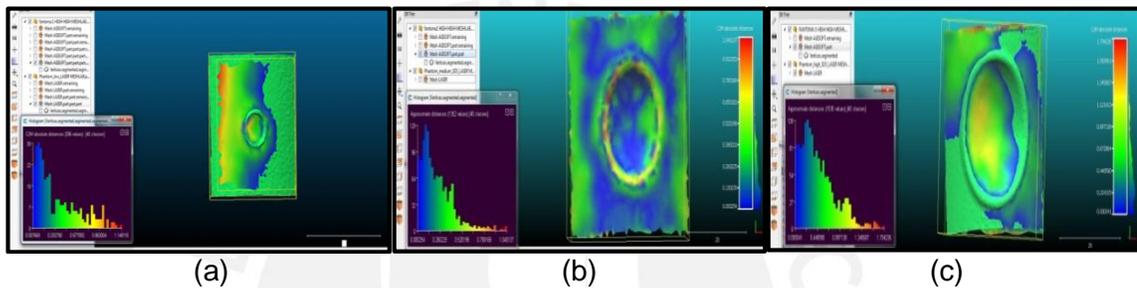


Figura 17. Mediante el CloudCompare también se demuestra que el “Protocolo Mosaico Mejorado (PMM)” es mejor que el “Protocolo Mosaico” por el menor error de desviación estándar para los maniqués pequeño (a), mediano (b) y grande (c) (ver Tabla 5 del Capítulo 4: Pruebas y resultados).

3.4.5 Pre-Procesamiento digital de los modelos en 3D de cada maniqué (pequeño, mediano y grande) mediante una etapa de regularización, para el “Protocolo Mosaico y el Protocolo Mosaico Mejorado (PMM)”

En principio, el modelo de datos está basado en localizaciones espaciales, a cada una de las cuales se le asigna los valores de las variables “x” (pixel de las abscisas) e “y” (pixel de las ordenadas), para la unidad fundamental de superficie en un sistema de coordenada plana (celda). Es decir, una celda puede describirse de forma genérica como una función con dos variables: $z = f(x, y)$; donde “z” representa la altura de la celda en el punto de coordenadas (x, y), y “f” es la función continua que relaciona la variable con su ubicación en el dominio espacial.

Asimismo, la etapa de regularización consiste en converger en una matriz regular, dado un conjunto de puntos con coordenadas (x, y, z) distribuidas irregularmente en los cinco modelos de los maniqués (pequeño, mediano y grande) generados en el Agisoft PhotoScan Profesional, respecto al modelo del Escáner Láser.

Para ello, se realiza un proceso de verificación de valores enteros (sin valores NaN) de los parámetros “X mínimo”, “Y mínimo”, “X máximo” e “Y máximo” para el “Protocolo Mosaico”; cuyo rango de valores deben pertenecer al modelo de referencia del Escáner Láser 3D (ver Figura 18).

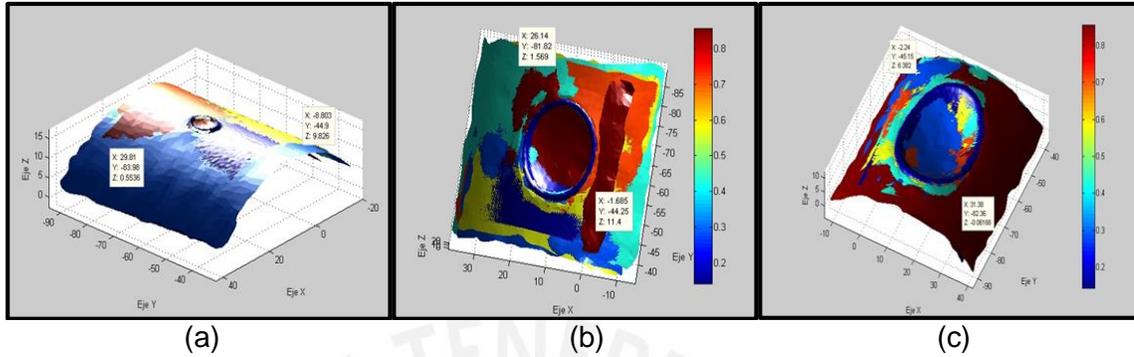


Figura 18. Verificación de valores enteros (sin valores NaN) de los parámetros “X mínimo”, “Y mínimo”, “X máximo” e “Y máximo”, de los maniqués de LC pequeño (a), mediano (b) y grande (c), para el “Protocolo Mosaico”.

Análogamente al “Protocolo Mosaico”, se realiza un proceso de verificación de valores enteros (sin valores NaN) de los parámetros “X mínimo”, “Y mínimo”, “X máximo” e “Y máximo” para el “Protocolo Mosaico Mejorado (PMM)”; cuyo rango de valores deben pertenecer al modelo de referencia del Escáner Láser (ver Figura 19).

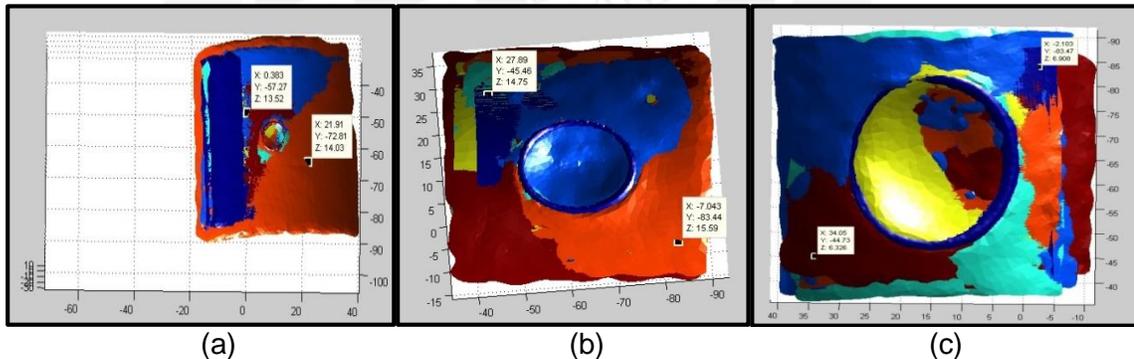


Figura 19. Verificación de valores enteros (sin valores NaN) de los parámetros “X mínimo”, “Y mínimo”, “X máximo” e “Y máximo”, de los maniqués de LC pequeño (a), mediano (b) y grande (c), para el “Protocolo Mosaico Mejorado (PMM)”.

Asimismo, se evalúa la precisión mediante el cálculo del promedio de los 300 valores de la desviación estándar, para los cinco modelos generados en el Agisoft PhotoScan Profesional. Luego, se calcula el promedio de los 300 valores del error de exactitud, mediante la diferencia entre el promedio de los cinco modelos del Agisoft PhotoScan Profesional y del Escáner Láser (en valor absoluto).

Respecto al “Protocolo Mosaico”, se puede visualizar el proceso descrito para los maniqués pequeño, mediano y grande en la Figura 20, Figura 21 y Figura 22; respectivamente. Además, se observa que el color azul significa menor desviación estándar y menor error de exactitud; y el color rojo significa mayor desviación estándar y mayor error de exactitud.

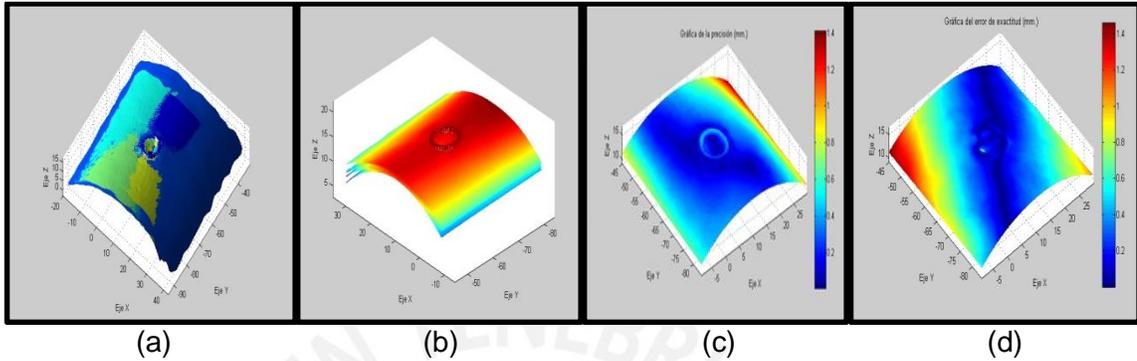


Figura 20. (a) Maniqué pequeño sin etapa de regularización. (b) Maniqué pequeño con etapa de regularización. (c) Gráfica de los valores de la precisión (en mm.) en diagrama de colores. (d) Gráfica de los valores del error de exactitud (en mm.) en diagrama de colores.

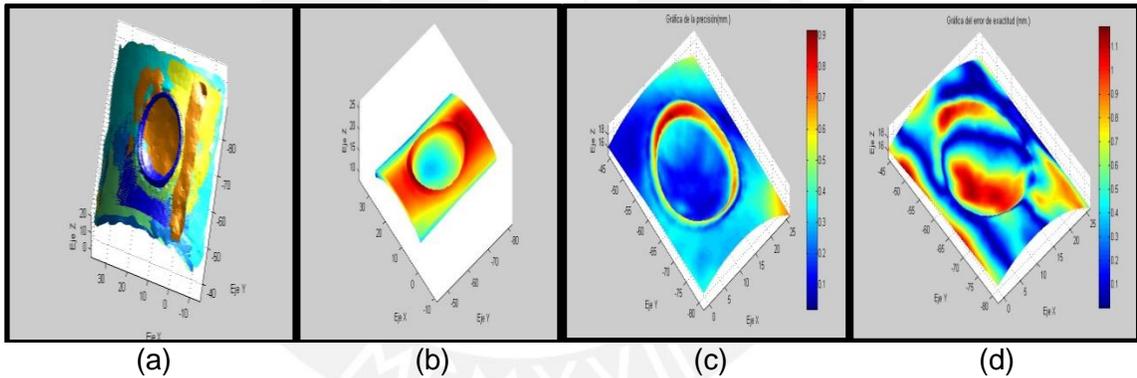


Figura 21. (a) Maniqué mediano sin etapa de regularización. (b) Maniqué mediano con etapa de regularización. (c) Gráfica de los valores de la precisión (en mm.) en diagrama de colores. (d) Gráfica de los valores del error de exactitud (en mm.) en diagrama de colores.

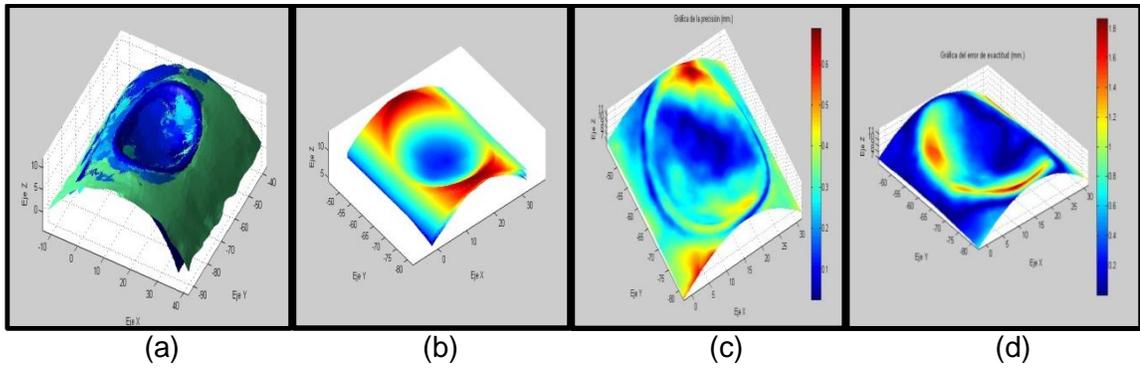


Figura 22. (a) Maniquí grande sin etapa de regularización. (b) Maniquí grande con etapa de regularización. (c) Gráfica de los valores de la precisión (en mm.) en diagrama de colores. (d) Gráfica de los valores del error de exactitud (en mm.) en diagrama de colores.

Además, respecto al “Protocolo Mosaico Mejorador (PMM)”, se puede visualizar el proceso descrito para los maniquíes pequeño, mediano y grande en la Figura 23, Figura 24 y Figura 25; respectivamente. Asimismo, se observa que el color azul significa menor desviación estándar y menor error de exactitud; y el color rojo significa mayor desviación estándar y mayor error de exactitud.

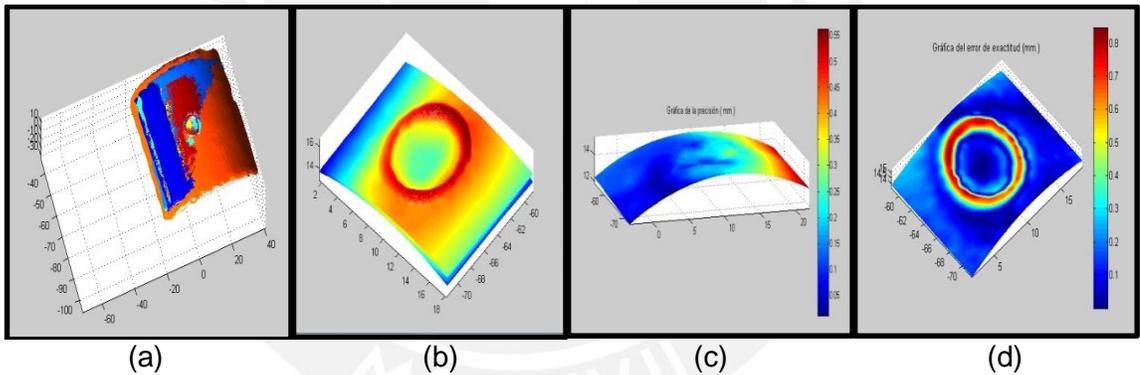


Figura 23. (a) Maniquí pequeño sin etapa de regularización. (b) Maniquí pequeño con etapa de regularización. (c) Gráfica de los valores de la precisión (en mm.) en diagrama de colores. (d) Gráfica de los valores del error de exactitud (en mm.) en diagrama de colores.

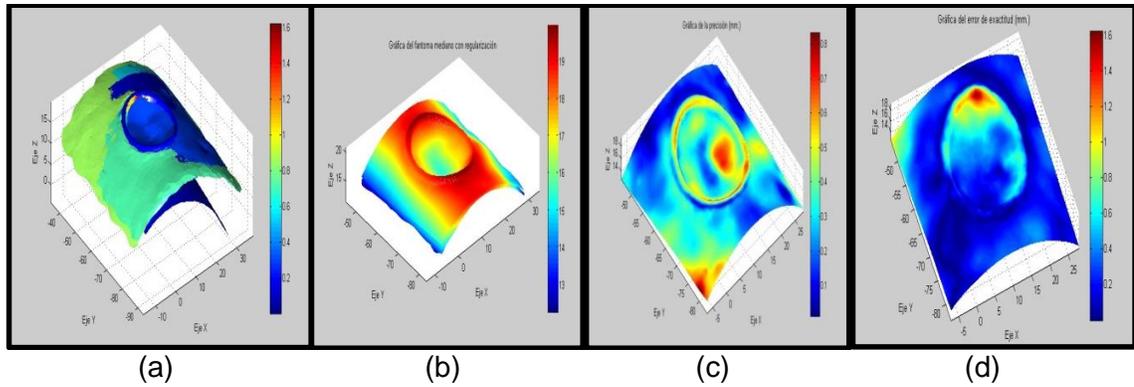


Figura 24. (a) Maniquí mediano sin etapa de regularización. (b) Maniquí mediano con etapa de regularización. (c) Gráfica de los valores de la precisión (en mm.) en diagrama de colores. (d) Gráfica de los valores del error de exactitud (en mm.) en diagrama de colores.

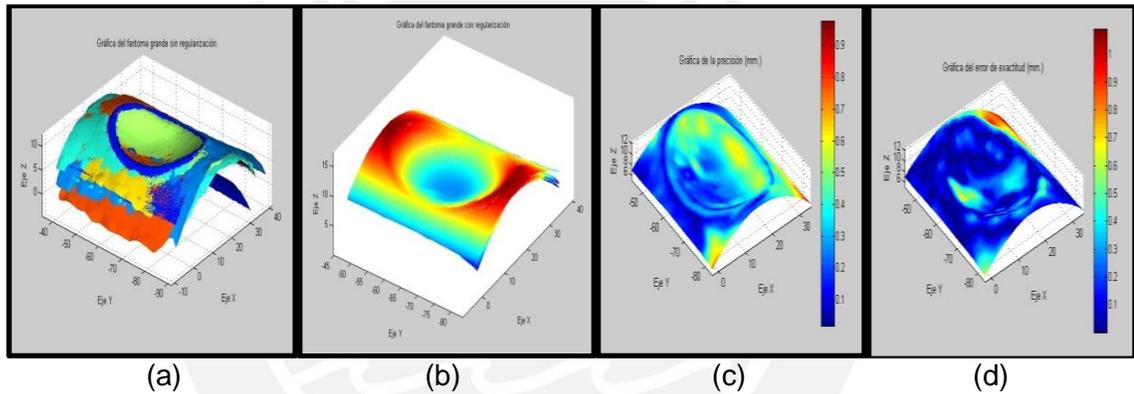


Figura 25. (a) Maniquí grande sin etapa de regularización. (b) Maniquí grande con etapa de regularización. (c) Gráfica de los valores de la precisión (en mm.) en diagrama de colores. (d) Gráfica de los valores del error de exactitud (en mm.) en diagrama de colores.

Asimismo, con respecto a los resultados cuantitativos, para el cálculo de la media de la desviación estándar y la media de la exactitud; se pueden visualizar en la Tabla 6 (Protocolo Mosaico) y Tabla 7 (Protocolo Mosaico Mejorado o PMM) del Capítulo 4.

3.4.6 Etapa final para la reconstrucción del volumen de los maniqués de LC

3.4.6.1 Etapa de segmentación manual

En esta etapa se presenta al usuario una imagen virtual del maniquí de LC el cual representa la profundidad de los puntos respecto a una referencia (píxeles oscuros significan mayor profundidad) en la cual debe realizar un trazado cerrado que contenga a la erosión y depresión de la ulceración (maniqués pequeño, mediano y grande), respecto a la piel sana. Luego del proceso, se genera una máscara con la información del trazado que segmentará de forma preliminar a la ulceración del maniquí de LC [3].

3.4.6.2 Generación de cubierta por interpolación Spline cúbica

De acuerdo a los resultados obtenidos, se escoge la técnica de reconstrucción del volumen por interpolación Spline cúbica ya que se genera una cubierta, tanto para la erosión como para la depresión de la ulceración de los maniqués pequeño, mediano y grande. Por otro lado, la interpolación Spline cúbica trata de aproximar una función, que representa un conjunto de polinomios, al registro de puntos [3]; por lo tanto, se escoge la función Spline cúbica (ya que tiene el menor error de estimación del volumen) y se obtiene el volumen total mediante la suma del volumen de la erosión y del volumen de la depresión (en valor absoluto). Además, la función Spline cúbica se representa para cada tramo mediante un $s(x)$ y es el siguiente:

$$s_i(x) = a_i(x - x_i)^3 + b_i(x - x_i)^2 + c_i(x - x_i)^1 + d_i^1, \text{ para: } i = 1, 2, 3, \dots, n-1.$$

Asimismo, en una Spline cúbica debe cumplirse que $S(x)$ interpolará todos los puntos, $S(x)$ será continua en el rango $[x_1, x_n]$, $S'(x)$ será continua en el rango $[x_1, x_n]$ y $S''(x)$ será continua en el rango $[x_1, x_n]$.

A continuación, se describe la etapa final para la reconstrucción del volumen de las ulceraciones de los maniqués grande, mediano y pequeño.

En principio, se selecciona la zona de la ulceración del maniquí por segmentación manual; en segundo lugar, se genera una máscara de la depresión y erosión de la ulceración; en tercer lugar, se obtiene la máscara recortada de la piel sana de la ulceración; en cuarto lugar, se genera una región de la depresión de la ulceración; en quinto lugar, se genera una región de la erosión de la ulceración del maniquí. Finalmente, se reconstruye el volumen total con la función Spline cúbica, mediante la suma del volumen de la erosión y del volumen de la depresión (en valor absoluto). Para la ulceración del maniquí grande, de los cinco modelos regularizados del Agisoft PhotoScan Profesional, se puede observar el proceso descrito anteriormente en la Figura 26; y para el modelo regularizado del Escáner Láser 3D se puede observar en la Figura 27.

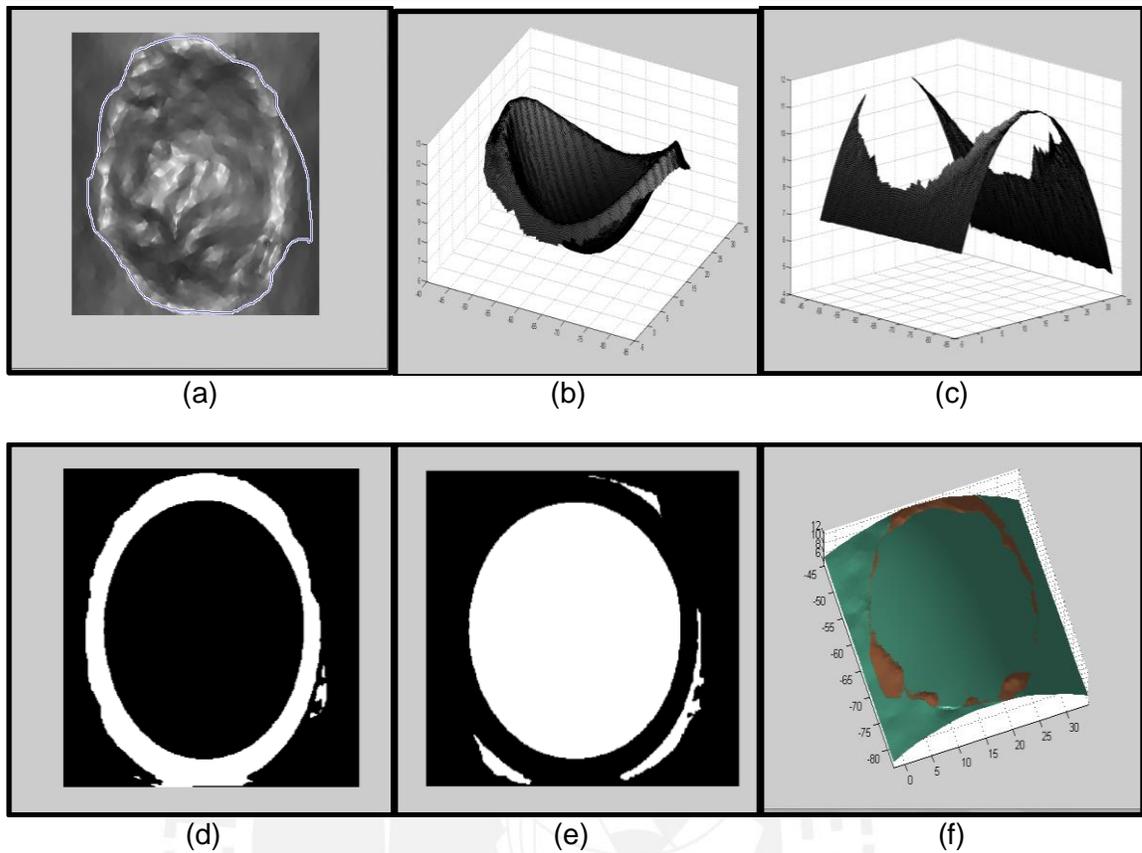


Figura 26. Modelo regularizado del Agisoft PhotoScan Profesional - Maniquí grande. (a) Selección del maniquí grande por segmentación manual. (b) Máscara de la depresión y erosión del maniquí grande de LC. (c) Máscara de la piel sana del maniquí grande. (d) Región generada de la depresión del maniquí grande. (e) Región generada de la erosión del maniquí grande. (f) Reconstrucción por Spline cúbica de la erosión y de la depresión del maniquí grande.

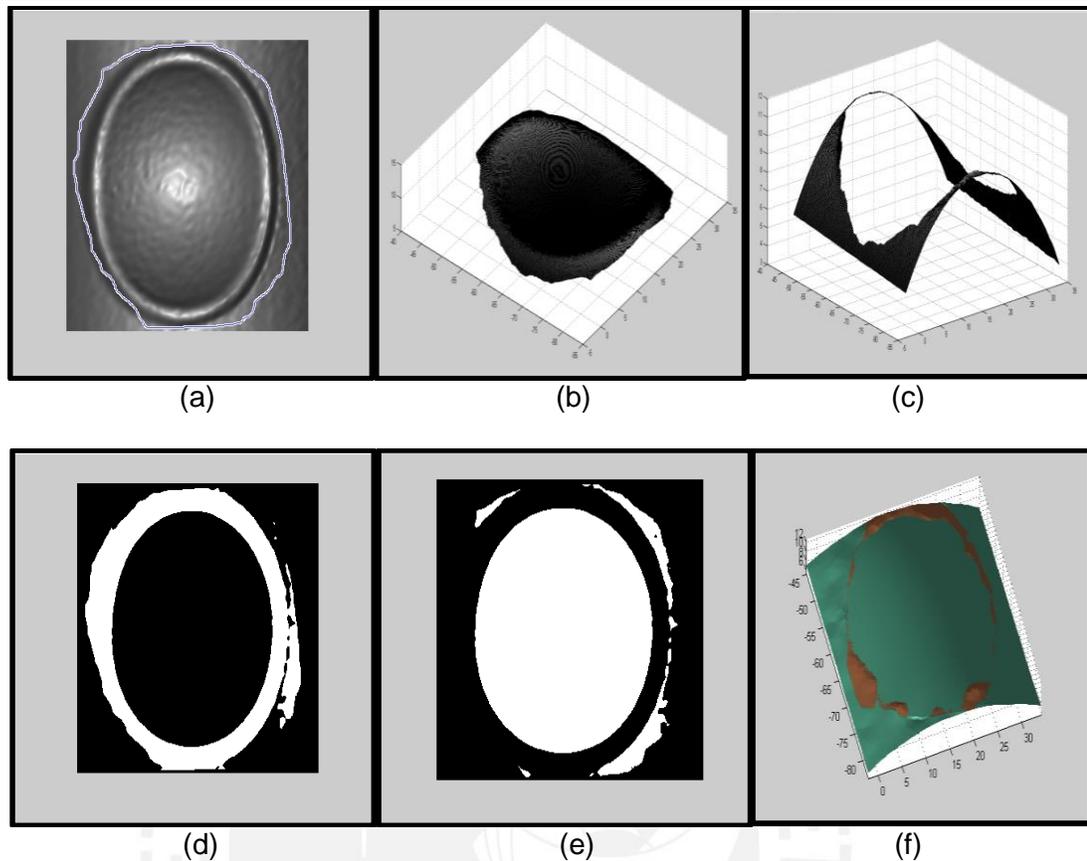


Figura 27. Modelo regularizado del Escáner Láser - Maniquí grande. (a) Selección del maniquí grande por segmentación manual. (b) Máscara de la depresión y erosión del maniquí grande de LC. (c) Máscara de la piel sana del maniquí grande. (d) Región generada de la depresión del maniquí grande. (e) Región generada de la erosión del maniquí grande. (f) Reconstrucción por Spline cúbica de la erosión y de la depresión del maniquí grande.

Análogamente, para la ulceración del maniquí mediano, de los cinco modelos regularizados del Agisoft PhotoScan Profesional, se puede observar el proceso descrito en la Figura 28; y para el modelo regularizado del Escáner Láser se puede observar el proceso en la Figura 29.

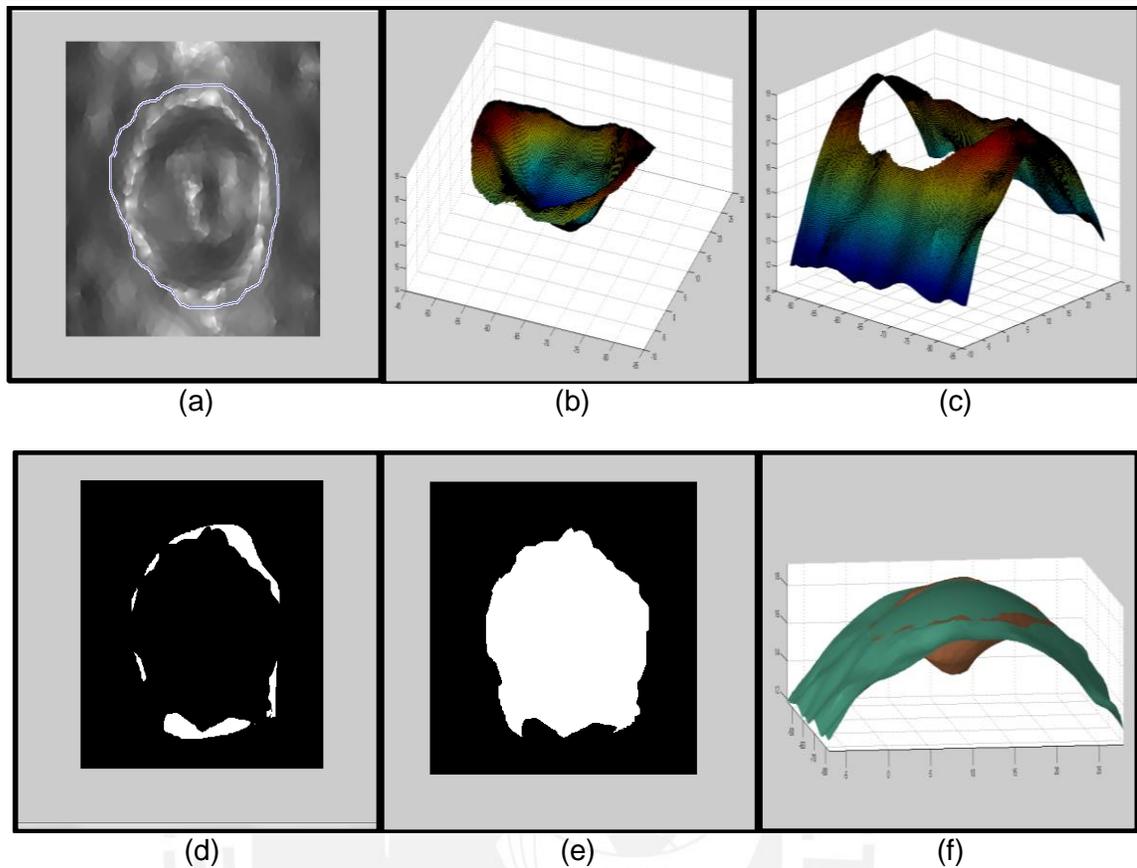


Figura 28. Modelo regularizado del Agisoft PhotoScan Profesional - Maniquí mediano. (a) Selección del maniquí mediano por segmentación manual. (b) Máscara de la depresión y erosión del maniquí mediano de LC. (c) Máscara de la piel sana del maniquí mediano. (d) Región generada de la depresión del maniquí mediano. (e) Región generada de la erosión del maniquí mediano. (f) Reconstrucción por Spline cúbica de la erosión y de la depresión del maniquí mediano.

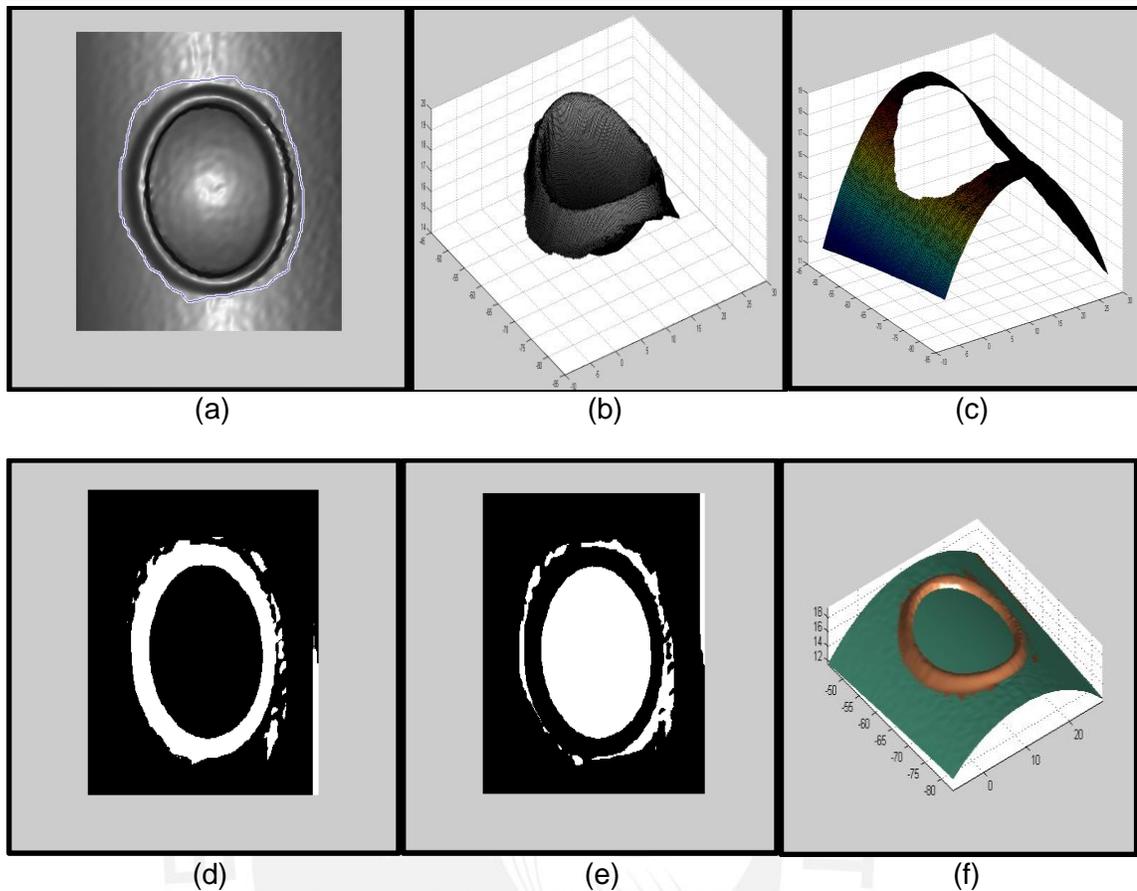


Figura 29. Modelo del Escáner Láser - Maniquí mediano. (a) Selección del maniquí mediano por segmentación manual. (b) Máscara de la depresión y erosión del maniquí mediano de LC. (c) Máscara de la piel sana del maniquí mediano. (d) Región generada de la depresión del maniquí mediano. (e) Región generada de la erosión del maniquí mediano. (f) Reconstrucción por Spline cúbica de la erosión y de la depresión del maniquí mediano.

Finalmente, para la ulceración del maniquí pequeño, con el promedio de los cinco modelos regularizados del Agisoft PhotoScan Profesional, se puede observar el proceso descrito en la Figura 30; y para el modelo regularizado del Escáner Láser se puede observar el proceso en la Figura 31.

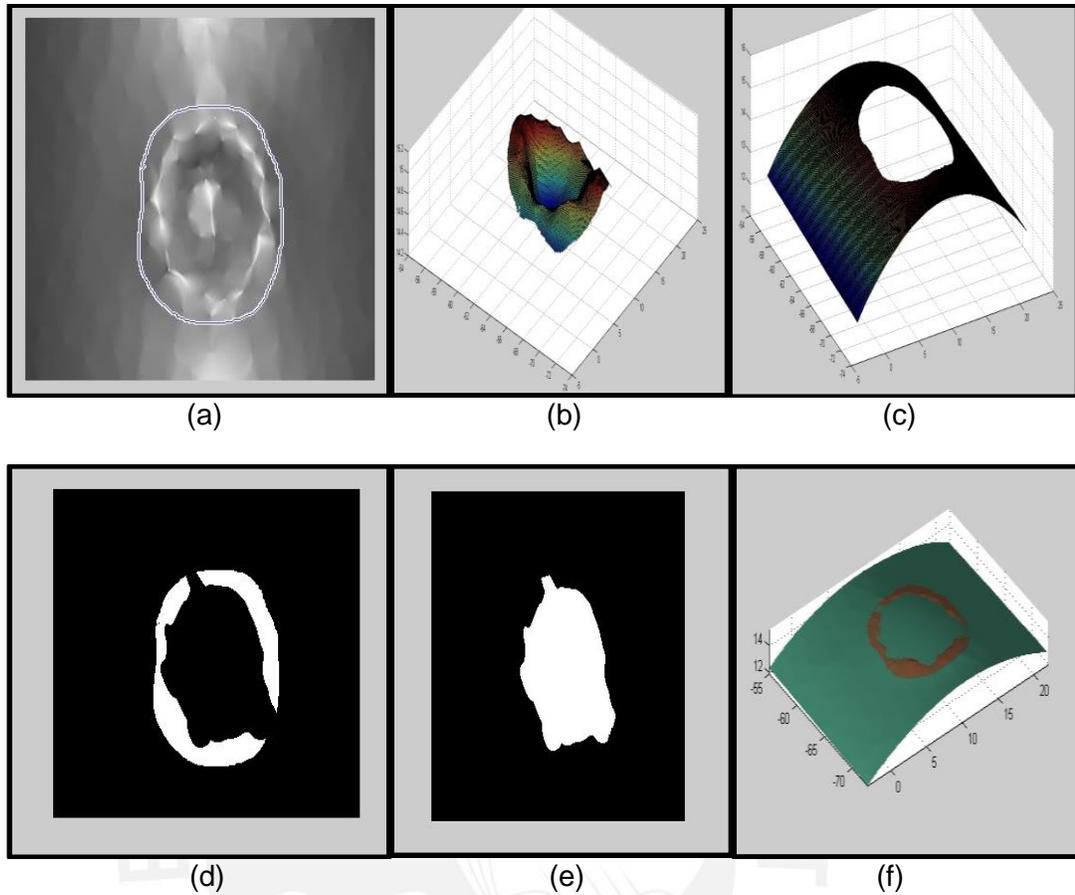


Figura 30. Modelo del Agisoft PhotoScan Profesional - Maniquí pequeño. (a) Selección del maniquí pequeño por segmentación manual. (b) Máscara de la depresión y erosión del maniquí pequeño de LC. (c) Máscara de la piel sana del maniquí pequeño. (d) Región generada de la depresión del maniquí pequeño. (e) Región generada de la erosión del maniquí pequeño. (f) Reconstrucción por Spline cúbica de la erosión y de la depresión del maniquí pequeño.

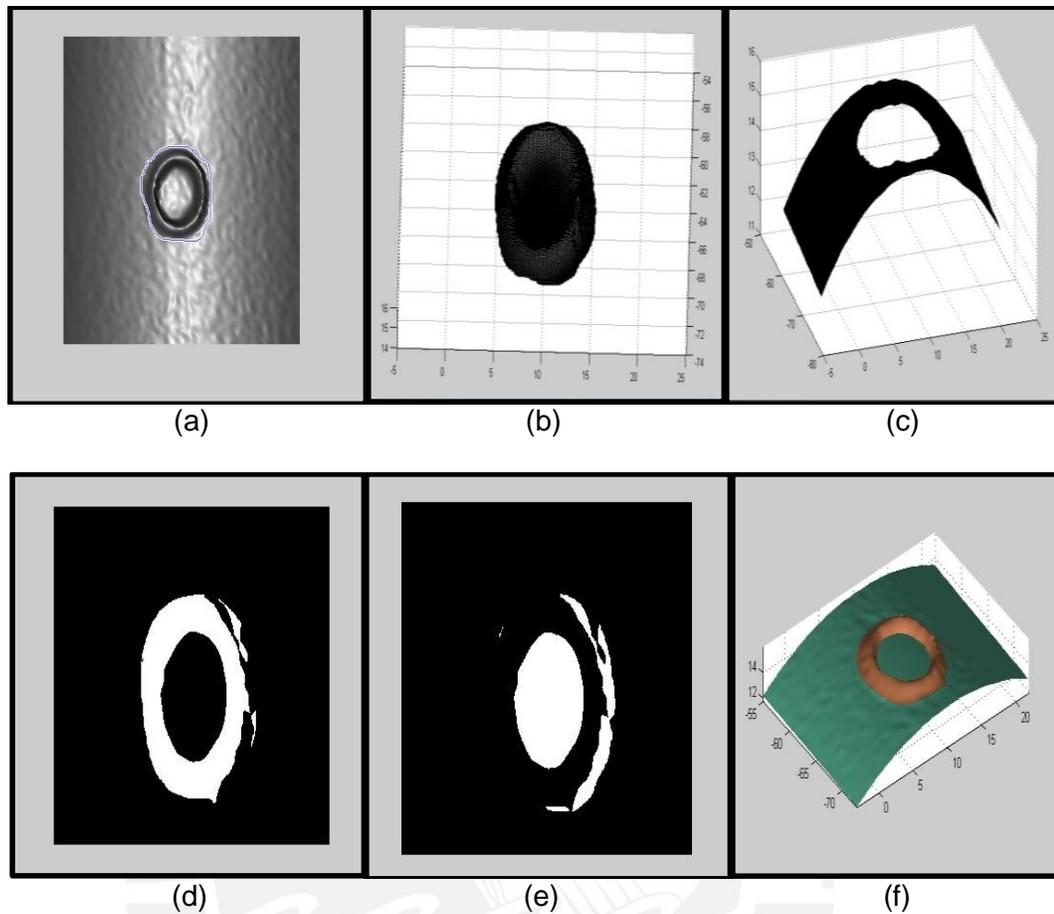


Figura 31. Modelo del Escáner Láser - Maniquí pequeño. (a) Selección del maniquí pequeño por segmentación manual. (b) Máscara de la depresión y erosión del maniquí pequeño de LC. (c) Máscara de la piel sana del maniquí pequeño. (d) Región generada de la depresión del maniquí pequeño. (e) Región generada de la erosión del maniquí pequeño. (f) Reconstrucción por Spline cúbica de la erosión y de la depresión del maniquí pequeño.

Asimismo, los resultados cuantitativos del cálculo del volumen de los maniqués grande, mediano y pequeño; con el Protocolo Mosaico Mejorada (PMM), se encuentra detallado en la Tabla 8 del Capítulo 4.

CAPÍTULO 4: Pruebas y Resultados

4.1 Pruebas y resultados del “Protocolo Mosaico Mejorado (PMM)” como el mejor protocolo de Fotogrametría Digital

En el presente capítulo final, se muestra los resultados de las pruebas realizadas en cinco fases: la primera fase de reconstrucción; la segunda fase de alineación con filtro Taubín; la tercera fase de comparación cualitativa y cuantitativa en el software CloudCompare; la cuarta fase de regularización, comparación cualitativa y cuantitativa en el software MatLab; y la quinta fase de cálculo del volumen, cálculo del error de precisión y error de exactitud del volumen de los maniqués pequeño, mediano y grande. En la primera fase se logró reconstruir y diseñar el “Protocolo Mosaico Mejorado (PMM)” de alineación alta y de geometría alta con el software Agisoft PhotoScan Profesional, mediante el cual se estableció los siguientes tiempos computacionales: 1899.40 segundos (para el maniquí pequeño), 335.42 segundos (para el maniquí mediano) y 1892.58 segundos (para el maniquí grande). Para mejor detalle, se muestra los valores en la Tabla 4.

Tabla 4. Tiempos computacionales del Protocolo Mosaico Mejorado (PMM).

PROTOCOLO		Alineación	Geometría	Alineación y Geometría
PMM		Tiempo computacional (s)	Tiempo computacional (s)	Tiempo computacional Total (s)
Low Low	1	16.87	sin obtener	16.87
Low Medium	2	16.87	sin obtener	16.87
Low High	3	16.87	sin obtener	16.87
Medium Low	4	26.56	543.75	570.32
Medium Medium	5	26.56	595.40	621.97
Medium High	6	26.56	1534.12	1560.68
High Low	7	518.30	461.33	979.63
High Medium	8	518.30	687.43	1205.74
High High	9	518.30	1381.10	1899.40
Low Low	1	697.83	sin obtener	697.83
Low Medium	2	697.83	sin obtener	697.83
Low High	3	697.83	sin obtener	697.83
Medium Low	4	328.60	12.79	341.39
Medium Medium	5	328.60	33.46	362.06
Medium High	6	328.60	167.14	495.74
High Low	7	257.55	32.43	289.98
High Medium	8	257.55	76.94	334.49
High High	9	257.55	77.87	335.42
Low Low	1	728.76	24.72	753.49
Low Medium	2	728.76	66.42	795.19
Low High	3	728.76	226.19	954.96
Medium Low	4	116.91	34.00	150.92
Medium Medium	5	116.91	126.12	243.03
Medium High	6	116.91	260.67	377.58
High Low	7	1051.63	75.15	1126.78
High Medium	8	1051.63	263.01	1314.64
High High	9	1051.63	840.95	1892.58

Asimismo, el dato “sin obtener” en la Tabla 4 significa que no se obtienen cifras numéricas para los modelos generados mediante la reconstrucción en modo “Geometría” del Agisoft PhotoScan Profesional (no se obtiene el tiempo computacional) tanto para el maniquí pequeño y mediano; sin embargo, si se obtiene una alineación baja para ambos maniqués. Además, en la Tabla 5 se logra comprobar, mediante el software CloudCompare, que no se obtienen la “Distancia promedio de la diferencia entre los modelos del Agisoft PhotoScan Profesional respecto al Escáner Láser 3D” ni la “Desviación estándar”, de los maniqués pequeño y mediano.

En la segunda fase se logró realizar la alineación con el filtro Taubín con $\lambda = 0.50$ y $\mu = -0.53$ [19]; mediante el software MeshLab v.1.3.2 ; para obtener los seis modelos en formato PLY y STL de los tres maniqués, tanto para los modelos del Agisoft PhotoScan Profesional como para el modelo del Escáner Láser 3D (ver en el punto 3.4.2 del Capítulo 3).

En la tercera fase se realiza las comparaciones cualitativa y cuantitativa, entre los modelos de las ulceraciones de LC (maniqués pequeño, mediano y grande) obtenidos con el “Protocolo Mosaico Mejorado (PMM)”, respecto al modelo obtenido en el Escáner Láser 3D (pequeño, mediano y grande). En este caso se estableció la menor distancia promedio de la diferencia entre los modelos del Agisoft PhotoScan Profesional respecto al Escáner Láser 3D y la menor desviación estándar en el software CloudCompare, y son los siguientes:

Para el maniquí pequeño: 0.31 mm. y 0.27 mm. , respectivamente.

Para el maniquí mediano: 0.22 mm. y 0.17 mm. , respectivamente.

Para el maniquí grande: 0.45 mm. y 0.34 mm. , respectivamente.

Para mayor detalle, se muestra las descripciones y los valores en la Tabla 5.

Tabla 5. Parámetros de la desviación estándar (mm.) y la distancia promedio de la diferencia entre los modelos del Agisoft PhotoScan Profesional respecto al Escáner Láser 3D (mm.) realizados en el software CloudCompare, con el “Protocolo Mosaico Mejorado (PMM)”.

Protocolo Mosaico Mejorado (PMM)	Modelos	Software CloudCompare	Distancia promedio de la diferencia entre los modelos del Agisoft PhotoScan Pro. respecto al Escáner Láser 3D (mm)	Desviación estándar (mm)
Low Low	1	Maniquí pequeño	sin obtener	sin obtener
Low Medium	2		sin obtener	sin obtener
Low High	3		sin obtener	sin obtener
Medium Low	4		0.80	0.76
Medium Medium	5		0.39	0.55
Medium High	6		0.83	2.76
High Low	7		0.91	0.80
High Medium	8		0.33	0.31
High High	9		0.31	0.27
Low Low	1	Maniquí mediano	sin obtener	sin obtener
Low Medium	2		sin obtener	sin obtener
Low High	3		sin obtener	sin obtener
Medium Low	4		2.09	2.08
Medium Medium	5		0.65	0.44
Medium High	6		0.70	0.67
High Low	7		0.70	0.66
High Medium	8		0.33	0.29
High High	9		0.22	0.17
Low Low	1	Maniquí grande	0.92	0.89
Low Medium	2		0.69	0.60
Low High	3		0.70	1.76
Medium Low	4		0.80	0.86
Medium Medium	5		0.85	0.93
Medium High	6		0.71	0.80
High Low	7		1.30	1.08
High Medium	8		0.78	0.86
High High	9		0.45	0.34

En la cuarta fase, se realiza el proceso de regularización en el software MatLab; la comparación cualitativa (diagrama de colores); la comparación cuantitativa, a través de la media de la desviación estándar (un paso previo para calcular el error de precisión) y la media de la exactitud (procesos descritos al detalle en el punto 3.4.4 del Capítulo 3); y se compara el “Protocolo Mosaico Mejorado (PMM)” (ver Tabla 6) respecto al “Protocolo Mosaico” (ver Tabla 7), para escoger el protocolo que contenga el menor valor de la media de la exactitud.

Tabla 6. Parámetros de la media de desviación estándar y la media de la exactitud realizados en el software Matlab con el “Protocolo Mosaico Mejorado (PMM)”.

Protocolo Mosaico Mejorado (PMM)	Desviación estándar	Media de la desviación estándar	Desviación de la desviación estándar	Exactitud	Media de la exactitud	Desviación de la exactitud
Maniquí Grande	300 valores	0.32	0.14	300 valores	0.24	0.19
Maniquí Mediano	300 valores	0.30	0.14	300 valores	0.23	0.25
Maniquí Pequeño	300 valores	0.17	0.09	300 valores	0.19	0.17

Tabla 7. Parámetros de la media de desviación estándar y la media de la exactitud realizados en el software Matlab con el “Protocolo Mosaico”.

Protocolo Mosaico Mejorado (PMM)	Desviación estándar	Media de la desviación estándar	Desviación de la desviación estándar	Exactitud	Media de la exactitud	Desviación de la exactitud
Maniquí Grande	300 valores	0.27	0.10	300 valores	0.62	0.44
Maniquí Mediano	300 valores	0.29	0.15	300 valores	0.47	0.30
Maniquí Pequeño	300 valores	0.39	0.25	300 valores	0.42	0.30

4.2 Cálculo de la precisión del volumen de cada maniquí de LC

En esta etapa, se utiliza el mejor “Protocolo Mosaico Mejorado (PMM)” para obtener el volumen total mediante la suma del volumen de la erosión y del volumen de la depresión (en valor absoluto), a través de la interpolación Spline en el software Matlab (ver punto 3.4.5 del Capítulo 3).

Asimismo, se calcula la desviación estándar del volumen para cada maniquí de ulceración de LC (pequeño, mediano y grande), mediante la ecuación 4.2.1 ; donde “N” representa a los cinco volúmenes de las ulceraciones de LC, y “ x_i ” representa a cada volumen de los cinco modelos generados en el Agisoft PhotoScan Profesional.

$$\text{Desviación estandar} = \sigma_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}{N - 1}} \quad (4.2.1)$$

Además, la media del volumen (\bar{x}) se representa mediante la ecuación 4.2.2; cuyo cálculo consiste en el promedio de los cinco volúmenes calculados con el “Protocolo Mosaico Mejorado (PMM)” en el Agisoft PhotoScan Profesional, del Set1 al Set5.

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^N x_i}{N} \quad (4.2.2)$$

Por lo tanto, el error de precisión se representa con la siguiente ecuación 4.2.3 :

$$\text{Error de precisión} = \left(\frac{\sigma_x}{\bar{x}} \right) * 100\% \quad (4.2.3)$$

Donde σ_x y \bar{x} , se describen anteriormente en las ecuaciones 4.2.1 y 4.2.2; respectivamente.

4.3 Cálculo del error de la exactitud del volumen de cada maniquí de LC

En esta etapa, el error de exactitud en mm^3 , se representa mediante la ecuación 4.3.1; cuyo cálculo consiste en el valor absoluto de la diferencia entre el valor del volumen que se obtiene en el Escáner Láser 3D (x_{REAL}), y el valor de la media del volumen “ \bar{x} ” (que se obtiene mediante el promedio de los cinco volúmenes calculados con el “Protocolo Mosaico Mejorado (PMM)” en el Agisoft PhotoScan Profesional, del Set1 al Set5).

$$\mathcal{E} = |x_{\text{REAL}} - \bar{x}| \quad (4.3.1)$$

Además, el error de exactitud, en porcentaje, se representa en la ecuación 4.3.2; donde se calcula mediante la división entre el error de exactitud en mm^3 (\mathcal{E}) y el valor del volumen del Escáner Láser 3D “ x_{REAL} ”, mencionado anteriormente.

$$\text{Error de exactitud} = \left(\frac{\mathcal{E}}{x_{\text{REAL}}} \right) * 100\% \quad (4.3.2)$$

4.4 Resultados del Volumen total de cada modelo para cada maniquí de LC

Por último, en la quinta fase se evalúa la precisión mediante el cálculo de la desviación estándar para el volumen de los cinco modelos generados en el Agisoft PhotoScan Profesional (para los maniqués pequeño, mediano y grande); y se calcula el error de exactitud, mediante el valor absoluto de la diferencia entre el valor del volumen que se obtiene en el Escáner Láser 3D, y el valor de la media del volumen “ \bar{x} ” (que se obtiene mediante el promedio de los cinco volúmenes calculados con el Protocolo Mosaico Mejorado o PMM en el Agisoft PhotoScan Profesional, del Set1 al Set5). Para mayor detalle, ver los resultados en la Tabla 8.

Tabla 8. Cálculo del volumen de los maniqués grande, mediano y pequeño; con el “Protocolo Mosaico Mejorado”.

PROTOCOLO MOSAICO MEJORADO (PMM)			
Maniquí Pequeño	Volumen de erosión (mm ³)	Volumen de depresión (mm ³)	Volumen Total (mm ³)
Escáner Láser 3D	0.21	-25.35	25.56
Set1	0.11	-20.48	20.59
Set2	0.14	-23.42	23.56
Set3	0.23	-25.59	25.82
Set4	0.45	-20.61	21.06
Set5	0.07	-25.52	25.59

Maniquí Mediano	Volumen de erosión (mm ³)	Volumen de depresión (mm ³)	Volumen Total (mm ³)
Escáner Láser 3D	115.48	-691.39	806.87
Set1	3.50	-714.81	718.31
Set2	4.12	-847.76	851.88
Set3	11.26	-832.62	843.88
Set4	22.03	-975.33	997.36
Set5	15.78	-972.11	987.89

Maniquí Grande	Volumen de erosión (mm ³)	Volumen de depresión (mm ³)	Volumen Total (mm ³)
Escáner Láser 3D	111.99	-1857.99	1969.98
Set1	15.99	-2143.43	2159.42
Set2	6.59	-2436.99	2443.58
Set3	4.41	-1951.22	1955.63
Set4	30.99	-2158.28	2189.27
Set5	44.16	-2087.15	2131.31

	Maniquí Grande	Maniquí Mediano	Maniquí Pequeño
Media del Set1 al Set5 \bar{x} (mm ³)	2175.84	879.86	23.32
Desviación estándar (mm ³)	175.08	115.82	2.45
Error de precisión (%)	8	13	11
Error de exactitud (mm ³)	205.86	72.99	2.24
Error de exactitud (%)	10	9	9

Finalmente, en los resultados de la tabla 8 se brinda información respecto a la estimación del volumen de maniqués de ulceraciones de LC, mediante el diseño del protocolo de fotogrametría digital PMM (Protocolo Mosaico Mejorado), la cual es comparable con las métricas del volumen obtenidas con el Escáner Láser 3D, considerando los siguientes errores de precisión del volumen para cada maniqué de LC (pequeño, mediano y grande) : 11 %, 13 % y 8 %; respectivamente. Además, se obtuvo los errores de exactitud del volumen para cada maniqué de LC (pequeño, mediano y grande; respecto al valor del volumen del Escáner Láser 3D) y son los siguientes: 9 %, 9 % y 10 %; respectivamente.

CONCLUSIONES

1. En principio, se logró diseñar el mejor protocolo de estimación del volumen de ulceraciones de Leishmaniasis Cutánea utilizando el software Agisoft PhotoScan Profesional en base al “Protocolo Mosaico Mejorado o PMM” (mejor protocolo de Fotogrametría Digital respecto al “Protocolo Treuillet” y “Protocolo Mosaico”), haciendo uso de una cámara digital Sony CyberShot 10.1 MP. , herramientas de procesamiento de imágenes e interpolación Spline alcanzando tres errores de precisión del volumen para cada maniquí de LC (pequeño, mediano y grande): 11 %, 13 % y 8 %, respectivamente.
2. En segundo lugar, se logró obtener tres errores de exactitud aceptables, mediante el Protocolo Mosaico Mejorado (PMM) menores o iguales al 10%, del volumen para cada maniquí de LC (pequeño, mediano y grande; respecto al valor del volumen del Escáner Láser 3D) y son los siguientes: 9 %, 9 % y 10 %, respectivamente.
3. Se concluye que la discretización de los modelos de los maniqués de LC, implica una pérdida de información que incrementa el error del modelo digital; en consecuencia, se propaga a los píxeles próximos. Por tal motivo, se ensayó numerosas opciones y se estableció el “Protocolo Mosaico Mejorado o PMM”, para representar y almacenar la altura “z” ($z = f(x, y)$) que equilibre la pérdida de información y algunos efectos secundarios indeseables como el excesivo tamaño del modelo por reconstruir o la dificultad de regularización.
4. Según la metodología de cuantificación y análisis por comparación en el software CloudCompare para los modelos del Agisoft PhotoScan Profesional, CAD 3D y Escáner Láser 3D, se concluye que el modelo del Escáner Láser 3D es el mejor patrón de referencia en comparación al modelo del CAD 3D ya que la distancia promedio de la diferencia entre los modelos LÁSER3D-CAD3D, y su desviación estándar son: 0.000001 mm.; respectivamente.

RECOMENDACIONES

1. En principio, en el software Agisoft PhotoScan Profesional, se debe tener los parámetros de alineación y geometría más controlables posibles para obtener una mejor reconstrucción respecto a los maniqués pequeño, mediano y grande de ulceraciones de Leishmaniasis Cutánea.
2. Se recomienda decidirse por un protocolo de adquisición concreto de almacenamiento y gestión informática de las imágenes digitales, con mayores ventajas y menores inconvenientes (Protocolo Mosaico Mejorado o PMM).
3. Se recomienda traducir algoritmos del software Matlab a formas concretas, compatibles con el protocolo de adquisición de imágenes digitales elegido (Protocolo Mosaico Mejorado o PMM).
4. Se recomienda utilizar la “Metodología de cuantificación y análisis por comparación de modelos en el software CloudCompare para los modelos del Agisoft PhotoScan Profesional, CAD 3D y Escáner Láser 3D”, para determinar el mejor patrón de referencia de reconstrucción para los maniqués de ulceraciones de LC.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Sánchez Saldaña, Sáenz Anduaga, Pancorbo Mendoza, Zegarra Del Carpio, Garcés Velasco, Regis Roggero, “*Dermatología Peruana: Leishmaniasis*”. Vol. 14, Nro. 82. Consulta 12 de Diciembre del 2012.
<http://sisbib.unmsm.edu.pe/bvrevistas/dermatologia/v14_n2/pdf/a02.pdf>
- [2] Díaz Rojas, Carlos Andrés, *Factibilidad de la medición del volumen de heridas de leishmaniasis cutánea haciendo uso de un Ecógrafo*. (2011). Tesis de licenciatura en Ciencias e Ingeniería con mención en Ingeniería Electrónica. Lima: Pontificia Universidad Católica del Perú, Facultad de Ciencias e Ingeniería.
- [3] Zvietcovich Zegarra, José Fernando, *Estimación de volumen de lesiones producidas por Leishmaniasis Cutánea utilizando un escáner láser de triangulación 3D*. (2011). Tesis de licenciatura en Ciencias e Ingeniería con mención en Ingeniería Electrónica. Lima: Pontificia Universidad Católica del Perú, Facultad de Ciencias e Ingeniería.
- [4] Zvietcovich, Fernando, Castañeda, Benjamín, Valencia, Braulio and Llanos-Cuentas, Alejandro, “A 3D Assessment Tool for Accurate Volume Measurement for Monitoring the Evolution of Cutaneous Leishmaniasis Wounds”. 34th Annual International Conference of the IEEE EMBS San Diego, California: USA. 28 August - 1 September. 2012.
- [5] Albouy, B., Lucas, Y., Treuillet, S., “Finding two optimal positions of a hand-held camera for the best reconstruction”. Conferencia 3DTV, Lyon: France, 2007.
- [6] Albouy, B., Lucas, Y., IEEE, Members, Treuillet, S. , “3D Modeling from Uncalibrated Color Images for a Complete Wound Assessment Tool”.Engineering in Medicine and Biology Society, EMBS 2007.29th Annual International Conference of the IEEE. Cité Internationale, Lyon: France. August 23-26, 2007.
- [7] Wannous, H., Lucas, Y., Treuillet, S., Albouy, B., “A complete 3D wound assessment tool for accurate tissue classification and measurement”. Image Processing, 2008.ICIP 2008. 15th IEEE International Conference on San Diego, CA. October 12-15. 2008.
- [8] Leslie Casas, Benjamín Castañeda, Sylvie Treuillet, “Imaging technologies applied to chronic wounds: a survey”. Author manuscript, published in ISABEL 2011, 4th International Symposium on Applied Sciences in Biomedical and Communication Technologies, Barcelona: Spain.2011.
- [9] Ministerio de Salud (MINSa), “Protocolos de Vigilancia Epidemiológica”. *Parte 1: Oficina General de Epidemiología*. Ministerio de Salud. Consulta 7 de Febrero del 2013. <<http://www.diresalima.gob.pe/descargas/epi/serie/Leishmaniasis.PDF>>
- [10] Lerma García, José Luis, *Fotogrametría moderna: Analítica y digital*. Volumen 1, 1º Edición, Valencia : Universidad Politécnica de Valencia, pp.1-500.2002.

- [11] G. Guidi, F. Remondino, G. Morlando, A. Del Mastio, F. Ucheddu, A. Pelagotti, "Performances Evaluation of a Low Cost Active Sensor for Cultural Heritage Documentation". International Conference on Optical 3-D Measurement Techniques VIII, Zurich, Switzerland, pp.59-69.2007.
- [12] De La Calle, M. , Gómez-Deck, D. , Koehler, O. , Pulido, F. , "Point cloud visualization in an Open Source 3d Glob3". Consulta 13 de Marzo del 2013. <http://igosoftware.files.wordpress.com/2011/02/3d-arch_paper_o1.pdf>
- [13] Zhang, Yan. 2D/3D Image Segmentation Toolbox. Consulta 12 de Abril del 2013. <<http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/24998-2d-3d-image-segmentation-toolbox>>
- [14] González Aguilera, Diego, "Procesamiento de imágenes". Universidad de Salamanca Master de Geotecnologías Cartográficas en Ingeniería y Arquitectura. Consulta 28 de Abril del 2013. <<http://212.128.130.23/eduCommons/enseñanzas-tecnicas/procesamiento-avanzado-de-imagenes-digiales/contenidos/Tema2.pdf>>
- [15] Borja Molero, Alonso, Cabrera Revuelta, Elena, Benavides López, José Antonio, Pino Suárez, Ruth, Barrera Vera, José Antonio, "Capiteles Sevillanos. Técnicas avanzadas para su documentación gráfica". *Departamento de Ingeniería Gráfica de la Universidad de Sevilla*. España. 2013, Volumen 4, Número 8, pp. 117-124. Consulta 02 de Mayo del 2013. <http://varjournal.es/doc/varj04_008_24.pdf>
- [16] Gómez Lahoz, Javier, "Introducción a la fotogrametría digital: El método general de la fotogrametría digital". Universidad de Salamanca Master de Geotecnologías Cartográficas en Ingeniería y Arquitectura. Consulta 17 de Mayo del 2013. <<http://212.128.130.23/eduCommons/enseñanzas-tecnicas/procesamiento-avanzado-de-imagenes-digiales/contenidos/Tema4.pdf>>
- [17] Manual del software CloudCompare V. 2. Consulta 13 de Junio del 2013. <<http://www.danielgm.net/cc/>>
- [18] Manual del software Agisoft PhotoScan Profesional. Consulta 13 de Junio del 2013. <<http://agisoft.ru/products/photoscan/professional>>
- [19] Taubin, Gabriel, "Curve and surface smoothing without shrinkage". IBM T.J.Watson Research Center.1995.
- [20] Manual del MeshLab v. 1.3.2. Consulta 13 de Junio del 2013. <<http://www.cse.iitd.ac.in/~mcs112609/Meshlab%20Tutorial.pdf>>
- [21] Real Academia Española. Consulta 02 de Setiembre del 2013. <<http://www.rae.es/rae.html>>
- [22] Moreno, Daniel, Taubin, Gabriel, "Simple, Accurate, and Robust Projector-Camera Calibration". School of Engineering Brown University Providence, RI, USA. Second Joint 3DIM/3DPVT Conference: 3D Imaging, Modeling, Processing, Visualization & Transmission, USA. 2012.