



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO
FACULTAD DE INGENIERÍA
MAESTRÍA EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA



**HACIA LA DETERMINACIÓN DE LA ASIMETRÍA FACIAL UTILIZANDO
NUBES DE PUNTOS PROVENIENTES DE IMÁGENES RGB-D**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:
MAESTRA EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA

PRESENTA:
DIANA ALEJANDRA MENDOZA MORA

COMITÉ DE TUTORES:
DRA. ADRIANA HERLINDA VILCHIS GONZÁLEZ
DRA. VIANNEY MUÑOZ JIMÉNEZ
DR. JORGE RODRÍGUEZ ARCE

Toluca Estado de México, 2019

Resumen

El presente trabajo de investigación tiene como objetivo general determinar la asimetría del rostro humano utilizando nubes de puntos que provienen de imágenes RGB-D. Para lograr este objetivo se implementó una metodología conformada por dos etapas: la primera consistió en generar una nube de puntos facial densa y la segunda, donde se determinó la asimetría facial de la nube de puntos.

En la primera etapa se evaluaron dos plataformas para la adquisición de la imagen 3D, que pudieran operar en las dimensiones mínimas establecidas para un consultorio médico general. La primera plataforma estuvo conformada por el sensor Kinect para Xbox 360 © (Kinect ©), una computadora y el software Skanect © v 1.91 y la segunda plataforma por el sensor Sense 3D Cubify © (Sense ©), una computadora y el software Sculpt v 1.0.

De las imágenes 3D se extrajo la nube de puntos con la región facial y se incrementó su densidad con interpolación de función de base radial (RBF). Con base en las nubes de puntos faciales resultantes se determinó utilizar la plataforma del sensor Kinect © en la segunda etapa de la metodología.

La adquisición de las imágenes 3D se obtuvieron de los rostros de sujetos sanos que no presentaban una asimetría clínica. Para determinar su asimetría facial, se adquirieron las imágenes 3D de los rostros en reposo y con tres asimetrías simuladas. Las tres asimetrías en los rostros de los sujetos fueron simuladas por medio de una deformación que se realizó colocando tres objetos esféricos de diferentes tamaños en la mejilla derecha. Con esto se logró un incremento en las dimensiones de la mejilla del lado derecho del rostro provocando una diferencia con la mejilla del lado izquierdo.

En la segunda etapa de la metodología se determinó la asimetría facial de cada una de las nubes de puntos densas del rostro en reposo y con las tres asimetrías. Se usó el plano de simetría obtenido de la superposición de la nube de puntos facial y su reflejo, y del cálculo de las distancias existentes entre ambas nubes. De las distancias resultantes se calculó la distancia media absoluta que corresponde al índice de asimetría facial.

Los índices de asimetría facial obtenidos, demuestran de forma cuantitativa las diferencias entre el rostro en reposo y el rostro asimétrico cada sujeto. El índice menor correspondió al rostro en reposo y el índice mayor al del rostro con la tercera asimetría. Considerando estos resultados, se puede concluir que se logró el objetivo buscado.

Publicaciones

Parte de la presente investigación ha sido presentada previamente en:

- *Evaluación de la interpolación RBF en nubes faciales adquiridas por tres diferentes sensores RGB-D*. Póster presentado en el 1^{er} Coloquio de Investigación en Ingeniería y 10^o Curso-Taller Temas Actuales en Ciencias del Agua. Organizado por la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma del Estado de México, Octubre 2018.

Tabla de contenido

Capítulo 1 INTRODUCCIÓN	1
1.1. Planteamiento del problema y justificación.....	3
1.2. Objetivos.....	5
1.3. Meta de ingeniería	5
1.4. Alcances.....	6
1.5. Limitaciones.....	6
1.6. Organización del trabajo.....	7
Capítulo 2 MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE.....	9
2.1. Modelado facial 3D	9
2.1.1. Sensores RGB-D	10
2.1.2. Nube de puntos.....	13
2.3. Métodos de interpolación de datos dispersos.....	14
2.3.1. Interpolación de función de base radial.....	15
2.3.2. Red de función de base radial	18
2.4. Análisis de componente principal (PCA)	19
2.5. Transformación espejo.....	21
2.6. Algoritmo iterativo de puntos más cercanos (ICP).....	22
2.7. Plano de simetría.....	23
2.8. Asimetría facial.....	24
2.8.1. Escalas de evaluación clínica de la asimetría facial	24
2.9. Métodos de cálculo de asimetría facial en imágenes 3D	25
2.10. Métodos de reconstrucción de imágenes faciales 3D	29
Capítulo 3 MARCO METODOLÓGICO	38
3.1. Generación de una nube de puntos densa	40
3.1.1. Setup plataforma de adquisición de la imagen 3D	40
3.1.2. Adquisición de la imagen 3D	48
3.1.3. Extracción de la región facial.....	50

3.1.4. Interpolación RBF	51
3.2. Determinación de la asimetría facial	52
3.2.1. Transformación espejo (PCA).....	52
3.2.2. Registro fino (ICP)	53
3.2.3. Cálculo de distancias entre puntos más cercanos (Kd-tree).....	53
Capítulo 4 PRUEBAS Y RESULTADOS	55
4.1. Generación de una nube de puntos densa	55
4.1.1. Setup plataforma de adquisición de la imagen 3D	56
4.1.2. Adquisición de imágenes 3D.....	58
4.1.3. Extracción de la región facial.....	64
4.1.4. Interpolación RBF	69
4.2. Determinación de la asimetría facial	70
4.2.1. Transformación espejo (PCA).....	71
4.2.2. Registro fino (ICP)	73
4.2.3. Cálculo de distancias entre puntos más cercanos (Kd-tree).....	77
CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO	83
Trabajo futuro	85
Referencias	87
Apéndice A	92
A.1. Carta de consentimiento informado	92
Apéndice B	96
B.1. Generación de una nube de puntos densa.....	96
B.1.1. Adquisición de la imagen 3D	96
B.1.2. Extracción de la región facial	100
B.1.2. Extracción de la región facial	101
B.2. Determinación de la asimetría facial.....	104
B.2.1. Transformación espejo (PCA).....	104
B.2.1. Registro fino (ICP)	106
B.2.3. Cálculo de distancias entre puntos más cercanos (Kd-tree)	108
Apéndice C	113
C.1. Generación de una nube de puntos densa.....	113
C.1.1. Interpolación RBF	113

C.2. Determinación de la asimetría facial.....	115
C.2.1 Transformación espejo (PCA).....	115
C.2.2. Registro fino (ICP)	119
C.2.3. Cálculo de la distancia euclidiana entre los puntos más cercanos (Kd-tree)....	122

Índice de tablas

Tabla 2.1. Clasificación de los sensores RGB-D por su costo [35].....	12
Tabla 2.2. Resumen estado del arte cálculo de asimetría facial.	35
Tabla 2.2. Resumen estado del arte cálculo de asimetría facial, continuación.....	36
Tabla 2.2. Resumen estado del arte cálculo de asimetría facial, continuación.....	37
Tabla 3.1. Características de los sensores RGB-D [53] [54].....	41
Tabla 4.1. Características de los cuatro tipos de calidad de las imágenes 3D plataforma Kinect.	60
Tabla 4.2. Número de puntos de las regiones faciales extraídas de las imágenes 3D de la plataforma Kinect adquiridas con los cuatro tipos de calidad del software Skanect ©.....	65
Tabla 4.3. Plataformas de adquisición de imágenes.....	68
Tabla 4.4. Valores de la asimetría facial definidos por la distancia promedio (DP), distancia máxima (D Máx.), desviación estándar (SD) y distancia media absoluta (DMA) del rostro en reposo y con las tres asimetrías del sujeto 1.....	78
Tabla 4.5. Valores de la asimetría facial definido por la distancia promedio (DP), distancia máxima (D Máx.), desviación estándar (SD) y distancia media absoluta (DMA) del rostro en reposo y con las tres asimetrías de los cinco sujetos.....	80
Tabla 4.6. Error cuadrático medio entre el rostro en reposo y las tres asimetrías generadas en el rostro.....	82
Tabla B.1. Valores de la asimetría facial del rostro en reposo y con las tres asimetrías del sujeto 2.....	108
Tabla B.2. Valores de la asimetría facial del rostro en reposo y con las tres asimetrías del sujeto 3.....	109
Tabla B.3. Valores de la asimetría facial del rostro en reposo y con las tres asimetrías del sujeto 4.....	110
Tabla B.4. Valores de la asimetría facial del rostro en reposo y con las tres asimetrías del sujeto 5.....	111
Tabla C.1. Resultados de la interpolación RBF de las nubes de puntos faciales de los maniquís y de los sujetos sanos.....	115
Tabla C.2. Análisis cuantitativo de la asimetría facial de las nubes de puntos de los maniquís simétricos en comparación de las nubes de puntos de los maniquís asimétricos.....	122
Tabla C.3. Análisis cuantitativo de la asimetría facial del rostro del sujeto sano 1 en reposo en comparación con su rostro en movimiento.....	123
Tabla C.4. Análisis cuantitativo de la asimetría facial del rostro del sujeto sano 2 en reposo en comparación con su rostro en movimiento.....	124

Tabla C.5. Análisis cuantitativo de la asimetría facial del rostro del sujeto sano 3 en reposo en comparación con su rostro en movimiento.....	124
---	-----

Índice de figuras

Figura 1.1. Plano de simetría de una imagen facial 3D [18].	2
Figura 2.1. Principio del sensor de tiempo de vuelo [33].	11
Figura 2.2. Principio del sensor de luz estructurada [33].	12
Figura 2.3. Estructura de red de función de base radial [38].	18
Figura 2.4. Gráfica de 50 observaciones sobre dos variables x_1 y x_2 [44].	20
Figura 2.5. Gráfica de 50 observaciones con respecto a sus componentes principales z_1 y z_2 [44].	20
Figura 2.6. Línea media facial [49].	23
Figura 2.7. Reconstrucción de una imagen facial 3D, Hernandez et al. [28].	30
Figura 2.8. Escenario de adquisición de la imagen del método de Hwang et al. [29]	31
Figura 2.9. Imágenes faciales 3D resultantes de la metodología de Hwang et al. [29].	31
Figura 2.10. Imagen facial 3D resultante del método de Wibowo et al. [27]	32
Figura 2.11. A) Nube de puntos facial inicial, B) Nube de puntos de alta densidad resultado de la interpolación RBF, Zhang et al. [26].	33
Figura 2.12. Imágenes faciales 3D adquiridas con el sensor DI3D [30].	34
Figura 2.13. Imágenes faciales 3D adquiridas con el sensor Kinect para Xbox 360 y Skanect [30].	34
Figura 3.1. Metodología para la determinación de la asimetría facial de nubes de puntos provenientes de una imagen RGB-D.	39
Figura 3.2. Posición del sensor Kinect para Xbox 360 © para la adquisición de imágenes.	43
Figura 3.3. Escenario de adquisición de datos del sensor Kinect para Xbox 360 ©.	44
Figura 3.4. Movimiento de rotación del sujeto para la adquisición a través de la plataforma Kinect ©.	45
Figura 3.5. Escenario de adquisición de datos de la plataforma Sense 3D.	47
Figura 3.6. Rostros del sujeto, A) en reposo, B) primera deformación, C) segunda deformación y D) tercera deformación.	49
Figura 3.7. Extracción región facial, A) medición longitud, B) detección punta de la nariz, C) colocación de elipsoide y D) extracción región.	51
Figura 4.1. Imágenes 3D iniciales plataforma Kinect, A) imagen con ruido y B) imagen sin ruido.	56
Figura 4.2. Imágenes 3D iniciales plataforma Sense 3D, A) imagen con ruido y B) imagen sin ruido.	57
Figura 4.3. Imágenes 3D adquiridas con los cuatro tipos de calidad del software Skanect ©, del sujeto 1.	58

Figura 4.4. Imágenes 3D adquiridas con los cuatro tipos de calidad del software Skanect ©, del sujeto 4.....	59
Figura 4.5. Imágenes faciales 3D plataforma Kinect del sujeto 1, A) en reposo, B) primera asimetría en la mejilla derecha, C) segunda asimetría y D) rostro con la tercera asimetría.	61
Figura 4.6. Imágenes faciales 3D plataforma Kinect del sujeto 4, A) en reposo, B) primera asimetría en la mejilla derecha, C) segunda asimetría y D) rostro con la tercera asimetría.	62
Figura 4.7. Imágenes 3D adquiridas con la plataforma Sense 3D del sujeto1.	63
Figura 4.8. Imágenes 3D adquiridas con la plataforma Sense 3D del sujeto2.	63
Figura 4.9. Imágenes 3D adquiridas con la plataforma Sense 3D del sujeto3.	63
Figura 4.10. A) Medición vertical del rostro, B) Medición horizontal del rostro.	64
Figura 4.11. Nubes de puntos del rostro en reposo del sujeto 1 de la plataforma Kinect, A) Baja calidad, B) Mediana calidad, C) Alta calidad y D) Muy alta calidad.	65
Figura 4.12. Nubes de puntos faciales de alta calidad del sujeto 1 de la plataforma Kinect, A) Rostro en reposo, B) Primer asimetría, C) Segunda asimetría y D) Tercer asimetría.....	67
Figura 4.13. Nubes de puntos faciales en reposo de la plataforma Sense 3D, A) Sujeto 1, B) Sujeto 2 y C) Sujeto 3.....	67
Figura 4.14. Nubes de puntos faciales de la plataforma Sense 3D, de los rostros con la sonrisa con los labios cerrados A) Sujeto 1, B) Sujeto 2 y C) Sujeto 3.....	68
Figura 4.15. Nubes de puntos faciales del rostro en reposo del sujeto 1, A) mediana calidad, B) alta calidad y C) interpolación RBF.	70
Figura 4.16. Componentes principales de las nubes de puntos facial en reposo del sujeto 1.	71
Figura 4.17. Transformación espejo de la nube de puntos facial en reposo del sujeto 1, A) Nube de puntos facial, B) Nube de puntos facial transformada al nuevo sistema de coordenadas, C) Nube de puntos reflejo y D) Primera alineación entre la nube de puntos facial y su nube de puntos reflejo.	71
Figura 4.18. Transformación espejo de la nube de puntos facial de la primera asimetría del sujeto 1, A) Nube de puntos facial, B) Nube de puntos facial transformada al nuevo sistema de coordenadas, C) Nube de puntos reflejo y D) Primera alineación entre la nube de puntos facial y su nube de puntos reflejo.	72
Figura 4.19. Transformación espejo de la nube de puntos facial de la segunda asimetría del sujeto 1, A) Nube de puntos facial, B) Nube de puntos facial transformada al nuevo sistema de coordenadas, C) Nube de puntos reflejo y D) Primera alineación entre la nube de puntos facial y su nube de puntos reflejo.	72
Figura 4.20. Transformación espejo de la nube de puntos facial de la tercera asimetría del sujeto 1, A) Nube de puntos facial, B) Nube de puntos facial transformada al nuevo sistema de coordenadas, C) Nube de puntos reflejo y D) Primera alineación entre la nube de puntos facial y su nube de puntos reflejo.	72
Figura 4.21. Alineación de la nube de puntos facial y su reflejo del rostro en reposo del sujeto 1, A) primera alineación resultado del PCA y B) segunda alineación resultado de ICP.....	74
Figura 4.22. Alineación de la nube de puntos facial y su reflejo del rostro con la primera asimetría del sujeto 1, A) primera alineación resultado del PCA y B) segunda alineación resultado de ICP.	74

Figura 4.23. Alineación de la nube de puntos facial y su reflejo del rostro con la segunda asimetría del sujeto 1, A) primera alineación resultado del PCA y B) segunda alineación resultado de ICP.	74
Figura 4.24. Alineación de la nube de puntos facial y su reflejo del rostro con la tercera asimetría del sujeto 1, A) primera alineación resultado del PCA y B) segunda alineación resultado de ICP.	75
Figura 4.25. ECM (error cuadrático medio) de las iteraciones del algoritmo ICP en las nubes de puntos del sujeto 1, A) Rostro en reposo, B) Primera asimetría, C) Segunda asimetría y D) Tercera asimetría.	76
Figura 4.26. Puntos medios del registro de forma de la nube de puntos facial y su reflejo del rostro en reposo y con sus tres asimetrías del sujeto 1, A) rostro en reposo, B) Asimetría 1, C) Asimetría 2 y D) Asimetría 3.	77

Figura B.1. Imágenes 3D adquiridas con los cuatro tipos de calidad del software Skanect ©, del sujeto 2.....	96
Figura B.2. Imágenes 3D adquiridas con los cuatro tipos de calidad del software Skanect ©, del sujeto 3.....	97
Figura B.3. Imágenes 3D adquiridas con los cuatro tipos de calidad del software Skanect ©, del sujeto 5.....	97
Figura B.4. Imágenes 3D de la plataforma Kinect de alta calidad del sujeto 2, A) rostro en reposo, B) rostro con la primera asimetría en la mejilla derecha, C) rostro con la segunda asimetría y D) rostro con la tercera asimetría.....	98
Figura B.5. Imágenes 3D de la plataforma Kinect de alta calidad del sujeto 3, A) rostro en reposo, B) rostro con la primera asimetría en la mejilla derecha, C) rostro con la segunda asimetría y D) rostro con la tercera asimetría.....	99
Figura B.6. Imágenes 3D de la plataforma Kinect de alta calidad del sujeto 5, A) rostro en reposo, B) rostro con la primera asimetría en la mejilla derecha, C) rostro con la segunda asimetría y D) rostro con la tercera asimetría.....	99
Figura B.7. Nubes de puntos faciales de las imágenes 3D adquiridas con los cuatro tipos de calidad del sujeto 2, A) Baja calidad, B) Mediana calidad, C) Alta calidad y D) Muy alta calidad.....	100
Figura B.8. Nubes de puntos faciales de las imágenes 3D adquiridas con los cuatro tipos de calidad del sujeto 3, A) Baja calidad, B) Mediana calidad, C) Alta calidad y D) Muy alta calidad.....	100
Figura B.9. Nubes de puntos faciales de las imágenes 3D adquiridas con los cuatro tipos de calidad del sujeto 4, A) Baja calidad, B) Mediana calidad, C) Alta calidad y D) Muy alta calidad.....	101
Figura B.10. Nubes de puntos faciales de las imágenes 3D adquiridas con los cuatro tipos de calidad del sujeto 5, A) Baja calidad, B) Mediana calidad, C) Alta calidad y D) Muy alta calidad.....	101
Figura B.11. Nubes de puntos faciales de la interpolación RBF del sujeto 2 de la plataforma Kinect, A) Rostro en reposo, B) Primer asimetría, C) Segunda asimetría y D) Tercer asimetría.	102

Figura B.12. Nubes de puntos faciales de la interpolación RBF del sujeto 3 de la plataforma Kinect, A) Rostro en reposo, B) Primer asimetría, C) Segunda asimetría y D) Tercer asimetría.	102
Figura B.13. Nubes de puntos faciales de la interpolación RBF del sujeto 4 de la plataforma Kinect, A) Rostro en reposo, B) Primer asimetría, C) Segunda asimetría y D) Tercer asimetría.	103
Figura B.14. Nubes de puntos faciales de la interpolación RBF del sujeto 5 de la plataforma Kinect, A) Rostro en reposo, B) Primer asimetría, C) Segunda asimetría y D) Tercer asimetría.	103
Figura B.15. Transformación espejo de la nube de puntos facial en reposo del sujeto 5, A) Nube de puntos facial, B) Nube de puntos facial transformada al nuevo sistema de coordenadas, C) Nube de puntos reflejo y D) Primera alineación entre la nube de puntos facial y su reflejo.	104
Figura B.16. Transformación espejo de la nube de puntos facial de la primera asimetría del sujeto 5, A) Nube de puntos facial, B) Nube de puntos facial transformada al nuevo sistema de coordenadas, C) Nube de puntos reflejo y D) Primera alineación entre la nube de puntos facial y su reflejo.	105
Figura B.17. Transformación espejo de la nube de puntos facial de la segunda asimetría del sujeto 5, A) Nube de puntos facial, B) Nube de puntos facial transformada al nuevo sistema de coordenadas, C) Nube de puntos reflejo y D) Primera alineación entre la nube de puntos facial y su reflejo.	105
Figura B.18. Transformación espejo de la nube de puntos facial de la tercera asimetría del sujeto 1, A) Nube de puntos facial, B) Nube de puntos facial transformada al nuevo sistema de coordenadas, C) Nube de puntos reflejo y D) Primera alineación entre la nube de puntos facial y su reflejo.	106
Figura B.19. Puntos medios del registro de forma de la nube de puntos facial y su reflejo del rostro en reposo y con sus tres asimetrías del sujeto 2, A) rostro en reposo, B) Asimetría 1, C) Asimetría 2 y D) Asimetría 3.	106
Figura B.20. Puntos medios del registro de forma de la nube de puntos facial y su reflejo del rostro en reposo y con sus tres asimetrías del sujeto 3, A) rostro en reposo, B) Asimetría 1, C) Asimetría 2 y D) Asimetría 3.	107
Figura B.21. Puntos medios del registro de forma de la nube de puntos facial y su reflejo del rostro en reposo y con sus tres asimetrías del sujeto 4, A) rostro en reposo, B) Asimetría 1, C) Asimetría 2 y D) Asimetría 3.	107
Figura B.22. Puntos medios del registro de forma de la nube de puntos facial y su reflejo del rostro en reposo y con sus tres asimetrías del sujeto 5, A) rostro en reposo, B) Asimetría 1, C) Asimetría 2 y D) Asimetría 3.	107
Figura C.1. Interpolación RBF Sujeto 1, A) Nube de puntos facial inicial, B) Interpolación del 100%, C) Interpolación del 1,000% y D) Interpolación de 2,000%.....	114
Figura C.2. Interpolación RBF Sujeto 2, A) Nube de puntos facial inicial, B) Interpolación del 100%, C) Interpolación del 1,000% y D) Interpolación de 2,000%.....	114

Figura C.3. Interpolación RBF Sujeto 3, A) Nube de puntos facial inicial, B) Interpolación del 100%, C) Interpolación del 1,000% y D) Interpolación de 2,000%.....	114
Figura C.4. Nuevo sistema de coordenadas resultante de PCA del Sujeto 1.....	116
Figura C.5. Nuevo sistema de coordenadas resultante de PCA del Sujeto 2.....	116
Figura C.6. Nuevo sistema de coordenadas resultante de PCA del Sujeto 3.....	117
Figura C.7. Sujeto 1, A) Nube de puntos facial transformada al sistema de coordenadas resultante de PCA, B) Nube de puntos reflejo, C) Primer alineación entre la nube de puntos facial y su reflejo.	117
Figura C.8. Sujeto 2, A) Nube de puntos facial transformada al sistema de coordenadas resultante de PCA, B) Nube de puntos reflejo, C) Primer alineación entre la nube de puntos facial y su reflejo.	118
Figura C.9. Sujeto 3, A) Nube de puntos facial transformada al sistema de coordenadas resultante de PCA, B) Nube de puntos reflejo, C) Primer alineación entre la nube de puntos facial y su reflejo.	118
Figura C.10. A) Primer plano de simetría, sujeto 1, B) Primer plano de simetría, sujeto 2, C) Primer plano de simetría, sujeto 3.	119
Figura C.11. Registro de forma algoritmo ICP, sujeto 1.....	120
Figura C.12. Registro de forma algoritmo ICP, sujeto 2.....	120
Figura C.13. Registro de forma algoritmo ICP, sujeto 3.....	121
Figura C.14. A) Plano de simetría, sujeto 1, B) Plano de simetría, sujeto 2, C) Plano de simetría, sujeto 3.....	121

Capítulo 1

INTRODUCCIÓN

El rostro humano tiene la capacidad de reflejar emociones, la personalidad, el estado de conciencia y el bienestar de un individuo. El interés por el análisis de las formas faciales es un área de investigación activa en el campo de las ciencias computacionales y de la visión computacional, debido al impacto en aplicaciones como la biometría, la interacción hombre máquina, la animación 3D, el reconocimiento de expresiones, la cirugía facial y el diagnóstico médico [1] [2].

Un rostro sano generalmente no tiene una simetría perfecta y es común que presente un grado de asimetría el cual es mayor en sujetos no sanos, esto debido al crecimiento irregular en los tejidos óseos, los tejidos blandos y los dentales a lo largo del desarrollo del individuo [3]. Una asimetría facial también puede ser provocada por padecimientos como la parálisis facial o enfermedades neurológicas [4] [5] y es determinada a través de escalas subjetivas o de procesos que requieren mediciones laboriosas y que necesitan de la colocación de puntos antropométricos en el rostro [6] [7] [8]. El uso de estos métodos para determinar la asimetría facial no permiten la obtención de datos cuantificables o no logran percibir cambios sutiles en ésta [9], [10], [11], [12]. Por tal motivo, el análisis de asimetría facial computarizado busca adquirir datos cuantificables con el objetivo de ser una herramienta para el diagnóstico y

tratamientos de recuperación, que estén relacionados con padecimientos que provoquen una asimetría facial [13] [14] [15] [16] [17] [18].

Los métodos para el análisis de asimetría facial computarizado, han sido desarrollados a través del uso de imágenes bidimensionales (2D) [12] [17] [14] e imágenes tridimensionales (3D) [15] [18] [1] [13]. El uso de imágenes faciales 2D, presenta limitantes debido a que son sensibles a las condiciones de iluminación, orientación de la cabeza, expresiones faciales y maquillaje [19]. El rostro humano es una forma 3D, por lo tanto, una imagen 3D representa su verdadera estructura y no presenta las limitantes de una imagen facial 2D.

La evaluación para determinar la asimetría facial, se realiza a través del uso de la línea media facial, la cual divide al rostro en dos mitades: lado derecho y lado izquierdo. Si ambas mitades son parecidas se puede considerar que el rostro es simétrico, una simetría del rostro no indica que ambas mitades sean iguales debido a que en un rostro sano pueden existir diferencias. Estas diferencias se consideran normales siempre y cuando la asimetría que presenta el rostro no sea detectable por el sujeto y su entorno.

Dada la forma simétrica del rostro, este se puede considerar en términos de transformaciones como la reflexión, la traslación y la rotación [20]. La simetría de reflexión considera que una media parte del rostro es un espejo de la otra mitad, a través de esta se puede obtener un plano de simetría, el cual representaría la línea media facial que es ilustrada en la Figura 1.1.

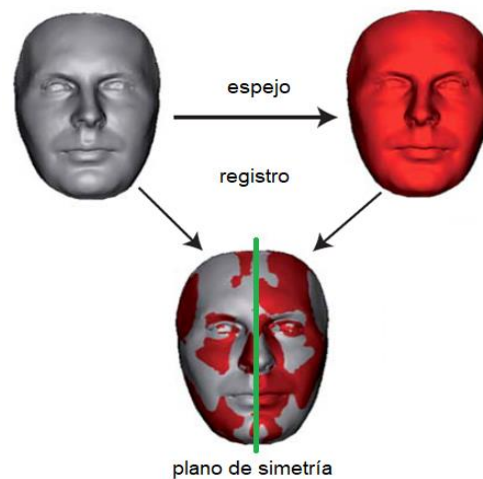


Figura 1.1. Plano de simetría de una imagen facial 3D [18].

Un método para obtener el plano de simetría y cuantificar la asimetría de una imagen facial 3D, es el desarrollado por Benz et al. en 2002 [13], quienes para comparar ambas mitades del rostro realizaron un registro de forma entre la imagen facial y su reflejo, el cálculo de la asimetría fue obtenido a través de las distancias entre ambas mallas alineadas. Este método ha sido usado en aplicaciones para determinar la posición del globo ocular para la cirugía en la reparación del desplazamiento del mismo [13], la percepción de la asimetría facial en pacientes con cirugía de labio paladar hendido [18], en sistemas de reconocimiento facial en imágenes 3D [21] y para la detección y cuantificación de disfunciones faciales en imágenes 3D dinámicas de rostro humanos [1].

Los resultados que se han obtenido del cálculo de la asimetría facial a través del método de la obtención del plano de simetría de una imagen facial 3D [13], son capaces de detectar asimetrías que no son perceptibles para el ojo humano (< 1 mm) desde asimetrías muy marcadas [13], [18], [21], [22], [23].

1.1. Planteamiento del problema y justificación

El cálculo de asimetría de una imagen facial RGB-D (Red, Green, Blue – Depth por sus siglas en inglés) o 3D se obtiene a través de la superposición de la imagen inicial y su reflejo, de esta forma se puede realizar una comparación entre ambas mitades del rostro, considerando las distancias que existen entre estas. Esta metodología desarrollada por Benz et al. [13] ofrece como ventaja evitar el uso de puntos antropométricos en el rostro, que requieran ser colocados por un experto. Además la metodología de Benz et al. [13] permite realizar una evaluación de la asimetría facial de forma global, debido a que al sobreponer la mitad derecha del rostro sobre la mitad izquierda se pueden detectar las asimetrías que existen entre cada una de las formas de ambos lados del rostro.

La imagen facial RGB-D, juega un rol importante dentro de la metodología de Benz et al. [13], debido a que son sus formas las que brindan detalles sobre su asimetría. Tras una revisión a la literatura, se pudo observar que las imágenes faciales 3D empleadas para el cálculo de la asimetría facial fueron adquiridas a través de plataformas que involucraron

sensores RGB-D especializados o de alto costo (superior a 25,000 dólares), los cuales requieren de sistemas de iluminación, configuraciones complejas, equipos robustos y sistemas para su procesamiento [24] [18] [13] [16]. Estas plataformas no pueden ser empleadas en espacios como un consultorio médico general con características tales como las que indica la norma NOM-005-SSA3-2010 [25], donde las dimensiones mínimas deben ser de 3.30 m de ancho por 4.25 m de largo.

Por otro lado se ha realizado la adquisición de imágenes faciales 3D, a través de sensores RGB-D de bajo costo (menor a 1,000 dólares) y usando diferentes metodologías para su procesamiento, como la interpolación RBF [26] [27]; el registro de varias imágenes de rango fusionadas en una representación canónica [28]; el uso de un modelo de cara 3D deformable [29] y la combinación de un sensor de bajo costo y un software de procesamiento y reconstrucción de una imagen 3D [30]. Estos métodos representan una opción para realizar la adquisición de una imagen facial 3D, en un espacio con características antes mencionadas, para determinar su asimetría facial a través del cálculo de las distancias entre la imagen facial y su reflejo superpuestas a un menor costo.

El uso de sensores de gama alta y especializados para la adquisición de imágenes faciales 3D, generalmente no resultan asequibles para un consultorio médico general. Pero se puede realizar la adquisición de las imágenes faciales 3D a través del uso de plataformas de bajo costo, para aplicar el método de asimetría facial a través del cálculo de la distancia entre la imagen facial 3D y su imagen espejo superpuestas, cuyas ventajas ofrecen datos de la asimetría facial general y en zonas específicas como ojos, boca y nariz, los cuales representan un apoyo en el diagnóstico de padecimientos relacionados con la asimetría facial. Por tal motivo el presente trabajo de investigación busca determinar la asimetría facial de una imagen 3D adquirida a través de una plataforma de bajo costo que pueda ser operable en las dimensiones mínimas establecidas para un consultorio médico general.

1.2. Objetivos

General

Determinar la asimetría del rostro humano utilizando nubes de puntos provenientes de imágenes RGB-D adquiridos a través de una plataforma de bajo costo y que se pueda operar en las dimensiones mínimas establecidas para un consultorio médico general.

Particulares

Los objetivos particulares que permiten alcanzar el objetivo general de este trabajo de investigación son:

- Determinar la configuración correcta de la plataforma de adquisición de la imagen RGB-D.
- Desarrollar un algoritmo para el preprocesamiento de la imagen RGB-D y extraer correctamente la región facial.
- Interpolar la nube de puntos de la región facial.
- Calcular la asimetría de la nube de puntos facial a través de la obtención del plano de simetría.

1.3. Meta de ingeniería

El presente trabajo de tesis, tiene como meta de ingeniería determinar la asimetría facial por su plano de simetría de las nubes de puntos provenientes de una imagen RGB-D, adquirida a través de una plataforma que emplea un sensor de bajo costo y un software para adquisición, tratamiento y análisis de imágenes RGB-D.

1.4. Alcances

En la presente tesis, se determina la asimetría facial de las nubes de puntos provenientes de una imagen RGB-D y tendrá los siguientes alcances:

- La adquisición de la imagen RGB-D, se realizará a través de una plataforma de adquisición de imagen que está conformada por un sensor RGB-D de bajo costo, una computadora y un software de adquisición y procesamiento de imágenes RGB-D.
- La determinación de la asimetría, se realizará sobre las nubes de puntos faciales de cinco sujetos sanos cuyos rostros serán modificados para generar tres distintas asimetrías entre el lado izquierdo y derecho del rostro, a través de la colocación de esferas de distintos tamaños en la parte interna de la mejilla derecha. Los autores de los siguientes artículos [16] [31], han realizado modificaciones en las imágenes faciales 3D a través de la colocación de bolas de materiales moldeables para generar asimetrías en el rostro.
- Se realizará una comparación de la asimetría obtenida del rostro original del sujeto y de las tres asimetrías realizadas, sin realizar una clasificación del grado de asimetría que presenta en cada rostro.

1.5. Limitaciones

Esta tesis presenta las siguientes limitaciones:

- El espacio de operación de la plataforma de adquisición de la imagen RGB-D, será limitado por las dimensiones de un consultorio médico general, cuyas dimensiones del área de entrevistas varían en un espacio de 3.30 m de ancho y 2.45 m de largo aproximadamente.
- No se usarán los rostros de pacientes que presenten asimetrías causadas por alguna patología o malformación, los rostros utilizados serán de sujetos sanos con deformaciones simuladas.

- Las condiciones de iluminación no están controladas, se limita la filtración de luz natural que podría afectar a la proyección y detección de los puntos infrarrojos del sensor RGB-D durante la adquisición.
- Los sensores RGB-D de bajo costo, utilizados en la plataforma de adquisición serán el Kinect para Xbox 360 © y el Sense 3D Cubify © v1.
- El software para adquisición de imágenes RGB-D que se utilizará para el sensor Kinect para Xbox 360 © será el Skanect © v1.9 y para el sensor Sense 3D Cubify © el software Sculpt © que trae de fábrica.
- El desarrollo de los algoritmos para la interpolación RBF y la determinación de la asimetría se realizarán en Matlab © v R2015a.

1.6. Organización del trabajo

El contenido de esta tesis, comienza con el presente capítulo de introducción donde se mencionan los antecedentes que llevan al planteamiento del problema, que hace surgir al objetivo principal que se persigue.

En el segundo capítulo se presentan conceptos teóricos para el entendimiento de la presente tesis, donde se abordan temas como la asimetría facial, los métodos para el cálculo de la asimetría facial, los conceptos de sensores RGB-D, el modelado de imágenes faciales RGB-D, la estructura de una nube de puntos, el algoritmo iterativo de puntos más cercanos (ICP) y el análisis de componente principal (PCA). Además, también se presentan trabajos encontrados en la literatura referentes a la interpolación de función de base radial (RBF) y el cálculo de la asimetría de imágenes RGB-D faciales, que permitieron el desarrollo de esta tesis.

El tercer capítulo presenta la metodología propuesta para determinar la asimetría facial utilizando nubes de puntos que provienen de una imagen RGB-D. Esta metodología consta de dos etapas principales: la primera que consiste en la generación de una nube de puntos facial de alta densidad y la segunda en la cual se determina la asimetría facial de la nube de puntos.

En el cuarto capítulo se muestra el desarrollo de la metodología y los resultados obtenidos en cada una de sus etapas, así como una discusión de los mismos.

Finalmente se presentan las conclusiones obtenidas, las cuales están basadas en los resultados del trabajo de investigación y se plantean trabajos futuros para la continuación del trabajo de investigación.

Capítulo 2

MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE

En el presente capítulo, se describen los elementos teóricos necesarios para el entendimiento del lector sobre imágenes faciales RGB-D, los conceptos y ecuaciones necesarias para determinar el plano de simetría de un rostro y los métodos de interpolación de datos dispersos. También se realiza una revisión del estado del arte relacionado con los métodos para el cálculo de la asimetría de una imagen 3D y los métodos de reconstrucción de imágenes faciales 3D.

2.1. Modelado facial 3D

Una imagen facial 3D busca obtener la geometría del rostro humano, por lo tanto, los métodos de adquisición y procesamiento deben ser capaces de recuperar las formas de éste. La calidad de la adquisición de los datos está relacionada con la resolución y precisión del dispositivo de adquisición para obtener la coordenada Z , llamada profundidad. Sin embargo, en la práctica se consideran dos factores que pueden influir en la adquisición de una imagen 3D:

- Factores extrínsecos: se relacionan con las condiciones del ambiente como las condiciones de luz y los cambios de pose de la cabeza. Otro factor es la forma del rostro, características como ojos, boca, nariz, color de piel y las deformaciones de la superficie por las expresiones faciales.
- Factores intrínsecos: se relacionan con el costo del sensor, la manera de uso del sensor, la resolución espacial y temporal, y si este permite la adquisición de rostros estáticos y en movimiento.

2.1.1. Sensores RGB-D

Un sensor RGB-D es un dispositivo que permite realizar la digitalización de una escena u objeto capturando una imagen RGB y los datos de profundidad. Para recrearlos en su forma 3D, existen diferentes técnicas para realizar la adquisición de los datos de profundidad algunas de estas son: tiempo de vuelo, triangulación, luz estructurada, etc. [32].

Sensores de tiempo de vuelo

El principio de un sensor de tiempo de vuelo se basa en la detección de la luz activa, esto significa que, si se puede medir el tiempo de vuelo de una señal de longitud de onda fija emitida desde un sensor y reflejada en la superficie del objeto, se puede calcular la distancia del objeto al sensor basado en la velocidad de la luz. No es simple medir el tiempo de vuelo directamente en cada píxel, pero se puede medir el retardo de fase en la distancia. Las cámaras de tiempo de vuelo miden el retardo de fase de la señal emitida por el infrarrojo en cada píxel y calculan la distancia desde el sensor como se ilustra en la Figura 2.1. [33]. Un ejemplo de un sensor que trabaja con esta tecnología es el FARO 3D X30 © con una resolución de profundidad de 2 mm [34].

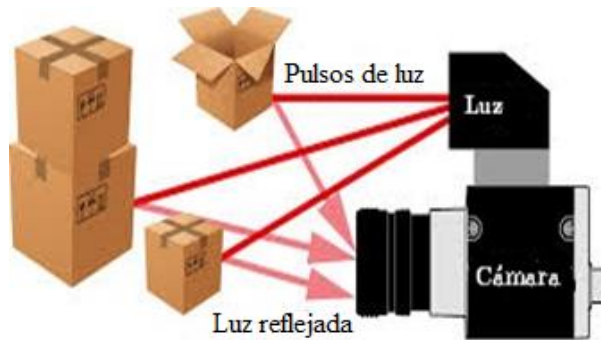


Figura 2.1. Principio del sensor de tiempo de vuelo [33].

Triangulación

La técnica de triangulación utiliza un láser y un sensor de imagen con una distancia entre sí. El láser proyecta un patrón de líneas sobre el objeto y el sensor de imagen captura su desplazamiento, esta técnica es llamada triangulación porque el punto láser, el sensor de imagen y el emisor láser forman un triángulo. Al combinar el desplazamiento con la distancia focal entre el sensor de imagen y el objetivo, se puede calcular la distancia. La triangulación es utilizada cuando se requieren mediciones con alta precisión y de corto alcance, como en la verificación de piezas mecánicas. Un ejemplo de un sensor de triangulación es el HandySCAN300 © con una resolución de profundidad de 0.040 mm [34].

Sensores luz de estructurada

El principio del funcionamiento de un sensor de luz estructurada es por medio de la emisión de un patrón de luz infrarroja sobre el objeto, este patrón puede ser una cuadrícula rectangular o un conjunto de puntos aleatorios. El sensor de infrarrojos calibrado lee el patrón reflejado desde la superficie del objeto, pero este patrón no es el original, es un patrón distorsionado debido a la variación geométrica del objeto o escena. Esto permite obtener información sobre la correspondencia en píxeles entre el emisor de infrarrojos y el sensor. La triangulación de cada punto entre los patrones de la luz infrarroja proyectados y observados permite calcular la distancia desde el sensor este principio se ilustra en la Figura 2.2. [33]. Con este principio se puede escanear rápidamente objetos, pero es más sensible a

la luz ambiental, reflejos y sombras. Un ejemplo de un sensor de luz estructurada es el Go!SCAN 3D © con una resolución de 0.100 mm [34].

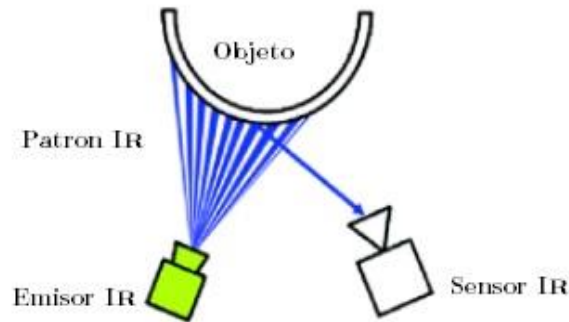


Figura 2.2. Principio del sensor de luz estructurada [33].

Actualmente existe una amplia gama de sensores RGB-D que trabajan bajo distintas técnicas y su costo puede variar dependiendo su precisión y su resolución, considerando este factor, los sensores se pueden ser clasificados en tres grupos como se muestra en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1. Clasificación de los sensores RGB-D por su costo [35].

Gama	Costo	Ejemplo
Baja	< 1,000.00 dólares	Kinect para Xbox 360 ©, Kinect v2, Sense 3D Cubify ©, Structure Sensor Occipital ©, etc.
Alta	> 1,000.00<25,000.00 dólares	Artec EVA ©, Go!Scan 3D ©, zSnapper Portable ©, etc.
Especiales de gama alta	>25,000.00 dólares	Faro 3D X 30 ©, HandySCAN300, DID3 FCS-100 ©, ATOS Core 135 ©.

Los sensores RGB-D de gama baja son fáciles de usar y asequibles, estos pueden ser utilizados con software de procesamiento de imágenes 3D que mejoran su resolución como por ejemplo el sensor Kinect para Xbox 360 © y el software Skanect ©. Los sensores de gama alta tienen una precisión más alta durante el escaneo de un objeto en comparación con los de gama baja, pero su costo representa una limitante para su uso. Un sensor especializado de alta calidad como el caso del DI3D FCS-100 ©, tiene la capacidad de escanear el rostro a través de la sincronización de cuatro cámaras digitales que capturan simultáneamente uno o más pares de imágenes estéreo, estas son procesadas a través del software DID3capture © para generar una nube de puntos densa con la cual se forma una imagen 3D de alta definición y sin fisuras que puede ser procesada con el software DID3view ©. La operación del sensor DI3D FCS-100 para la adquisición de una imagen facial 3D requiere de conocimiento técnico en la herramienta además que su costo no lo hace asequible para su uso en un consultorio médico general.

2.1.2. Nube de puntos

Una imagen 3D es adquirida a través de un sensor RGB-D, sin embargo, se requiere de un procesamiento para recuperar sus formas, esto se realiza a través de técnicas o herramientas de modelado de entidades 3D (nubes de puntos, mallas, volumen, etc.).

Los datos de profundidad se convierten en puntos 3D con coordenadas $p = (x, y, z)^T$ que forman una nube de puntos densa, de la cual se genera una malla triangular para la reconstrucción de la imagen 3D. Una nube de puntos puede ser representada como una matriz P compuesta por P_n puntos, donde n es el número de puntos o coordenadas $P = [p_1 \dots p_n]$, [2].

La nube de puntos de un sensor RGB-D se consigue relacionando a cada punto 3D con los índices r, g, b que indican los valores del mapa de color, de esta forma cada punto tendrá seis valores representados por $p = (x, y, z, r, g, b) \in \mathcal{R}^6$.

Durante la manipulación de una nube de puntos, ésta puede sufrir transformaciones rígidas y las coordenadas x, y, z de los puntos 3D sufren cambios, sin embargo, los valores r, g, b

permanecen fijos, por tal motivo es necesario separar los datos de profundidad $s = (x, y, z)^T$ en la matriz $S = [s_1 \dots s_n]$ y los datos de color $t = (r, g, b)^T$ en la matriz $T = [t_1 \dots t_n]$.

Con esta separación las transformaciones geométricas se realizarán sobre la matriz S , mientras la matriz T seguirá manteniendo su correspondencia uno a uno con los puntos 3D.

2.3. Métodos de interpolación de datos dispersos

Una nube de puntos es un conjunto de datos dispersos, para generar una interpolación de estos datos existen diferentes métodos y se clasifican en los siguientes cuatro grupos [36]:

- a) **Métodos basados en triangulación:** requieren de un preproceso para triangular el conjunto de datos dispersos y posteriormente lograr la interpolación encontrando el punto central de cada triángulo, esto representa un alto costo computacional cuando se realizan interpolaciones densas. Pero los métodos basados en triangulación, presentan problemas en los bordes debido a que se pueden producir triángulos que estén total o parcialmente fuera del dominio generando, interpolaciones sin sentido.
- b) **Métodos ponderados por distancia inversa:** son globales, es decir usan todos los puntos para calcular cada punto interpolado. Los valores más cercanos deben influir más en el valor interpolado que los valores más alejados. Debido a esta situación la precisión de los resultados se ve afectada por la sobreponderación de los grupos de datos. Estos métodos sufren de algunos problemas relacionados a los esquemas basados en la distancia, debido a que cada punto tiene una influencia radialmente simétrica y, por lo tanto, las características de los datos tales como planos, crestas y valles son oscurecidas por esta isotropía forzada alrededor de los puntos de muestra.
- c) **Métodos de función de base radial:** son otro ejemplo de métodos de interpolación global, se pueden caracterizar por cada punto (x_i, y_i) de un conjunto de datos se elige una función $h_i(x, y)$ y luego determinar los coeficientes a_i de forma que $f(x, y) = \sum_i a_i h_i(x, y)$ realice la interpolación de los datos. Estos métodos regularmente funcionan bien y un punto que resaltar es su capacidad adaptación y suavidad visual.

- d) **Métodos de interpolación de vecinos naturales:** tienen un enfoque local y están basados en la Teselación de Voronoi o Diagramas de Voronoi [36] de un conjunto de puntos dispersos dado. Estos métodos tienen ventajas sobre los de triangulación referente a la continuidad en los bordes, sin embargo, tienen un alto costo computacional y es más lento que los otros métodos y más en dimensiones de datos grandes.

El método de interpolación de datos dispersos empleado en el presente trabajo de investigación, para la reconstrucción o incremento en la densidad de una nube de puntos es el de la función de base radial, debido a que no requiere de una triangulación y se pueden reconstruir formas complejas, la descripción detallada de este método se menciona en la subsección 2.3.1.

2.3.1. Interpolación de función de base radial

La interpolación de función de base radial, es un método ampliamente usado en tareas de interpolación de datos dispersos en varias dimensiones [37]. Está formada por funciones continuas de una variable escalar con un comportamiento radial con respecto a un punto llamado centro. Una nube de puntos está conformada por las coordenadas (x, y, z) , donde (x, y) representan las coordenadas 2D y z es un conjunto de escalares que corresponden a los datos de profundidad. El escenario de interpolación es encontrar el valor de z en un conjunto de coordenadas (x, y) . El problema de interpolación en su sentido estricto puede afirmarse como: dado un conjunto de N puntos diferentes $\{x_i, y_i \in \mathbb{R}^{m_0} | i = 1, 2, \dots, N\}$ y un correspondiente conjunto de N números reales $\{d_i \in \mathbb{R}^2 | i = 1, 2, \dots, N\}$ encontrar $F: \mathbb{R}^N \rightarrow \mathbb{R}^2$ que satisfaga la condición de interpolación:

$$F(x, y)_i = d(x, y)_i \quad (1)$$

Una interpolación RBF de f , es una función F que tiene la forma que se indica en la Ecuación (2):

$$F_i(x, y) = \sum_{i=1}^N \omega_i \varphi_i(\|(x, y) - (x_i, y_i)\|) \quad (2)$$

Donde, $\varphi_i(\|(x, y) - (x_i, y_i)\|)$ $i = 1, 2, \dots, N$ es un conjunto de N funciones arbitrarias llamadas funciones de base radial y $\|\cdot\|$ denota la norma que regularmente es la Euclidiana, ω es el conjunto de pesos de los centros; (x, y) es la posición del punto, (x_i, y_i) es el centro de interpolación [38].

Insertando las condiciones de interpolación de la Ecuación (2) en la Ecuación (3) se obtiene un conjunto de ecuaciones lineales simultáneas para los coeficientes desconocidos (pesos) de la expansión $\{\omega_i\}$ dada por:

$$\begin{bmatrix} \varphi_{11} & \varphi_{12} & \cdots & \varphi_{1N} \\ \varphi_{21} & \varphi_{22} & \cdots & \varphi_{2N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \varphi_{N1} & \varphi_{N2} & \cdots & \varphi_{NN} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \\ \vdots \\ \omega_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_1 \\ d_2 \\ \vdots \\ d_N \end{bmatrix} \quad (3)$$

Donde $\varphi_i = \varphi_i(\|(x, y) - (x_i, y_i)\|)$, $i, j = 1, 2, \dots, N$

Dejando $d = [d_1, d_2, \dots, d_N]^T$, $w = [\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_N]^T$

Los vectores de $N \times 1$ d y w representan a la salida deseada y al vector de pesos respectivamente, donde N es el tamaño de la muestra de entrenamiento. Siendo Φ denotada por una matriz de $N \times N$ con elementos φ_{ij} : $\Phi = \{\varphi_{ij}\}_{i,j=1}^N$

La matriz Φ también llamada matriz de interpolación y reescribiendo la Ecuación (3) en su forma compacta, obtenemos la Ecuación (4):

$$\Phi w = F \quad (4)$$

A que Φ es una matriz no singular y por lo tanto existe la matriz inversa, la Ecuación (4) se puede resolver por:

$$w = \Phi^{-1} F \quad (5)$$

La función de base φ proporciona un valor para cada punto interpolado en el sistema de coordenadas de acuerdo con los valores de los centroides vecinos (x_i, y_i) y las distancias entre este punto interpolado y sus centroides vecinos.

Las funciones de base φ más empleadas incluyen el spline de placa delgada [39] [40] usado para ajustar funciones suaves de dos variables y se expresa en la Ecuación (6):

$$\varphi(\mathbf{r}) = r^2 \ln(r) \quad (6)$$

Donde $r = \|x - x_i\|$

La función de base *gaussiana*, se usa principalmente en redes neuronales [41] y se expresa en la Ecuación (7):

$$\varphi(\mathbf{r}) = e^{\frac{-r^2}{2\sigma^2}} \quad (7)$$

Donde $r = \|(x, y) - (x_i, y_i)\|$ y σ representa la desviación estándar.

La función multicuadrática es usada en diversas aplicaciones principalmente en datos topográficos [42] [43] y es expresada en la Ecuación (8):

$$\varphi(\mathbf{r}) = (1 + r^2)^{1/2} \quad (8)$$

Donde $r = \|(x, y) - (x_i, y_i)\|$

La función *biarmónica* es usada para el ajuste de tres variables [40] [27] y se expresa en la Ecuación (9):

$$\varphi(\mathbf{r}) = r \quad (9)$$

Donde $r = \|(x, y, z) - (x_i, y_i, z_i)\|$

La función de base radial gaussiana es localizada y compacta, lo que significa que el valor del punto interpolado solo es sensible a los puntos centroides adyacentes, esto debido a que utiliza la distancia euclidiana entre las distancias de los datos de entrada y los centroides como medida de similitud. El valor de σ controla las propiedades de regularidad de la función interpelante, como un parámetro ajustable que indica la amplitud de la curva de cada función para generar la reconstrucción de una superficie. Considerando las diferentes curvaturas que presenta un rostro y el parámetro de ajuste de la función de base radial gaussiana, esta es

considerada como para realizar el incremento de densidad de una nube de puntos facial a través de la interpolación RBF.

2.3.2. Red de función de base radial

Si se consideran las Ecuaciones (1) y (5) se visualiza una red de función de base radial con una estructura compuesta de tres capas [38], las cuales se describen a continuación:

1. Capa de entrada: está compuesta por el vector de entrada x con dimensión m .
2. Capa oculta: tiene el mismo tamaño de la muestra de entrenamiento y cada unidad que la compone se describe por medio de una función radial.

$$\varphi(x, y) = \varphi(\|(x, y) - (x_j, y_j)\|) \quad j = 1, 2, \dots, N \quad (10)$$

3. Capa de salida: consiste en una sola unidad computacional como se ilustra en la Figura 2.3.

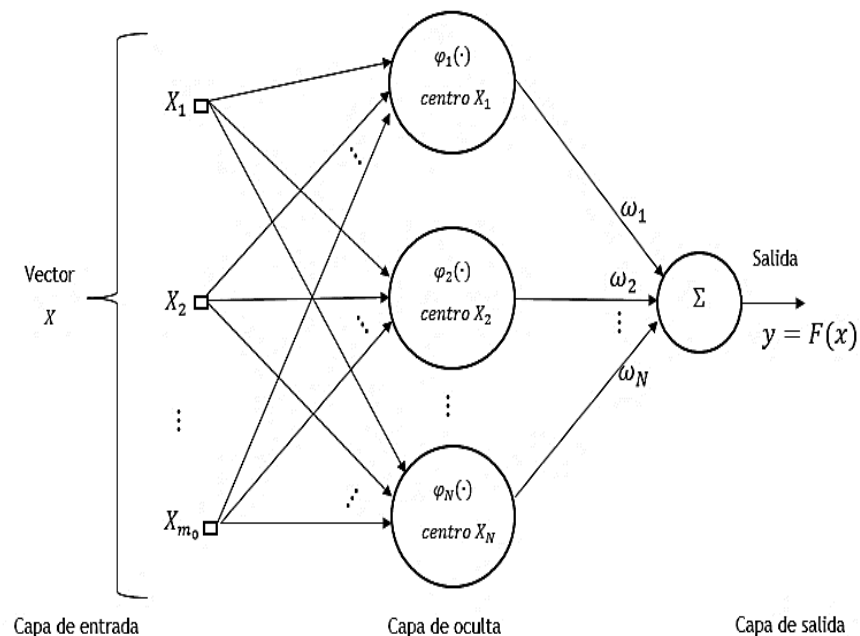


Figura 2.3. Estructura de red de función de base radial [38].

Cada una de las capas de la red RBF realiza diferentes funciones: la capa de entrada relaciona a la red con su entorno a través de los datos de entrada, la capa oculta aplica una transformación no lineal a estos datos y la tercera capa es lineal y da respuesta a los estímulos recibidos del entorno.

2.4. Análisis de componente principal (PCA)

Técnica estadística que tiene como idea central reducir la dimensión (número de variables) de un conjunto de datos, conservando la mayor cantidad posible de la variación presente en el conjunto de datos. Esto se logra a través de la transformación de un espacio dimensional superior R^M a un espacio dimensional menor R^k [44]. Los componentes principales (PC), son ortogonales, no correlacionados y están ordenados de manera que los primeros conservan la mayor parte de la variación presente en todas las variables originales. El componente principal del espacio PCA representa la dirección de la varianza máxima, la segunda componente tiene la segunda varianza más grande y así sucesivamente. La Figura 2.4. ilustra la gráfica de 50 observaciones que se encuentran sobre dos variables correlacionadas x_1 y x_2 . Existe una variación entre ambas variables la cual es mayor en la variable x_2 [44]. Al realizar una transformación a los PC z_1 y z_2 se obtiene una gráfica con la distribución como la que se ilustra en la Figura 2.5.

El método consiste en dos pasos para calcular los PC del espacio PCA. En el primer paso se calcula la matriz de covarianza (X) . En el segundo paso los eigenvalores y los eigenvectores de la matriz de covarianza son calculados. Los eigenvectores son vectores distintos a cero que representan los componentes principales. El vector propio con el valor propio más alto es el primer componente principal [45].

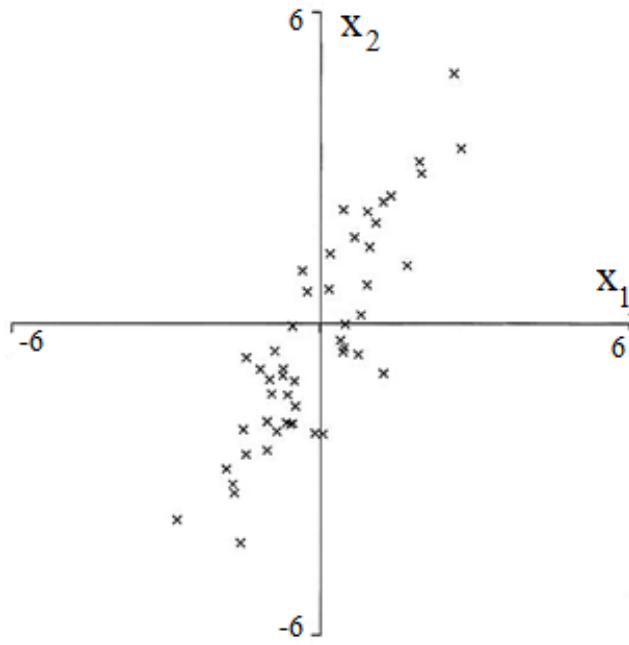


Figura 2.4. Gráfica de 50 observaciones sobre dos variables x_1 y x_2 [44].

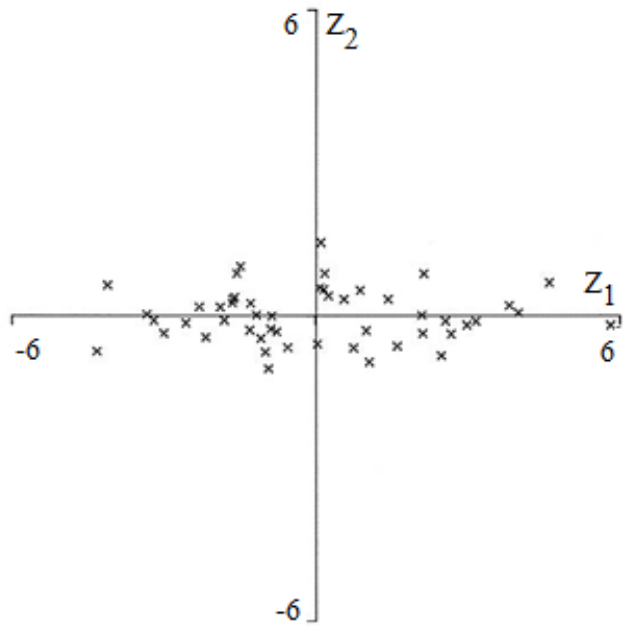


Figura 2.5. Gráfica de 50 observaciones con respecto a sus componentes principales z_1 y z_2 [44].

2.5. Transformación espejo

La transformación espejo tiene como objetivo estimar una posición inicial para el plano donde se realizará el reflejo de la nube facial, de esta forma se obtiene una primera alineación entre la nube facial y su reflejo. La transformación espejo se puede obtener por medio del análisis de componentes principal [1].

Si consideramos a $Q(P, K)$ como una superficie facial 3D, donde P es un conjunto de N posiciones de puntos $q_i(x_i, y_i, z_i) \in R^3, 1 \leq i \leq N$ y K contiene información de la adyacencia de vértices de la malla de la superficie. Considerando que el vector columna m es el centroide de la superficie facial 3D $Q(P, K)$. Se puede definir la matriz de covarianza (C) de la distribución de los puntos a través de la Ecuación (11):

$$C = \sum_{i=1}^N (q_i - m)(q_i - m)^T \quad (11)$$

Al aplicar PCA se obtienen tres eigenvalores λ_1, λ_2 y λ_3 con sus tres eigenvectores v_1, v_2 y v_3 correspondientes. La superficie facial con frecuencia [46] es más larga que ancha, por lo tanto, la dimensión vertical es más grande que la dimensión horizontal. El eigenvector v_1 representa la dimensión vertical del rostro, v_2 representa la dimensión horizontal y v_3 representa la normal de un plano del rostro.

Tomando al centroide m como el origen, la imagen facial 3D puede ser representada en un nuevo sistema de coordenadas tridimensional, donde el eje y está relacionado al eigenvector v_1 , el eje x al v_2 y el eje z al v_3 . Este sistema de coordenadas puede representar la posición del rostro dependiendo de la distribución de datos de éste. Después de obtener el nuevo sistema de coordenadas la imagen facial 3D original es transformada a éste. El plano con coordenadas yz se considera como el plano para obtener la imagen espejo de Q . Este procedimiento se puede describir con las Ecuaciones (12), (13) y (14):

$$q_{ni} = A \cdot (q_i - m) \quad (12)$$

$$q_{mi} = R.A.(q_i - m) \quad (13)$$

$$A = \begin{bmatrix} v_2^x & v_1^x & v_3^x \\ v_2^y & v_1^y & v_3^y \\ v_2^z & v_1^z & v_3^z \end{bmatrix} \quad R = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (14)$$

Donde q_{ni} son los puntos de los datos originales de la imagen facial 3D que fue transformado al nuevo sistema de coordenadas tridimensional y q_{mi} son los datos reflejados, A es la matriz de rotación y R la matriz de reflexión con respecto al plano.

2.6. Algoritmo iterativo de puntos más cercanos (ICP)

El algoritmo iterativo de puntos más cercanos (ICP) [47], es el algoritmo utilizado para alinear geoméricamente imágenes tridimensionales cuando se conoce una estimación inicial de la pose relativa. El algoritmo es usado para registrar las salidas de los escáneres 3D, que solo escanean un objeto de una dirección a la vez. El algoritmo ICP tiene como primer punto dos mallas y una alineación inicial para su transformación relativa de cuerpo rígido, el algoritmo refina iterativamente la transformación generando repetidamente pares de puntos correspondientes en las mallas y minimizando una métrica de error, algunas de las métricas que han sido usadas son: a) la suma de las distancias cuadradas entre los puntos correspondientes, b) la métrica punto a punto y c) la suma de las distancias cuadradas desde cada punto de origen hasta el plano que contiene el punto de destino. Si se tienen dos conjuntos de puntos q_i y q_{mi} que corresponden a dos nubes de puntos, los principales pasos del algoritmo ICP son los siguientes:

1. Para todo punto en q_{mi} se calculan los puntos más cercanos en q_i .
2. Con respecto a una transformación de cuerpo rígido se minimiza la distancia cuadrada media de los pares de puntos más cercanos.
3. Se aplica la transformación a q_{mi} (con la matriz de rotación R y el vector de traslación t).

4. Si el cambio en la distancia media cuadrada cae por debajo del umbral establecido se termina la iteración, en caso contrario regresa al paso 1.

2.7. Plano de simetría

Un análisis de un rostro se realiza considerando tres factores como son la simetría, la proporción y el alineamiento facial [48]. La asimetría facial se determina a través de una línea central que es trazada en el rostro, cuyo nombre es línea media facial y permite dividir al rostro en dos partes iguales. Esta línea pasa por el puente nasal, la punta de la nariz, el *filtrum* y el mentón [49], como se ilustra en la Figura 2.6. La línea marcada en el rostro de la Figura 2.6. permite realizar una comparación visual entre ambas mitades del rostro, permitiendo observar que tan parecidas son una de la otra. Sin embargo, una evaluación visual representa un método subjetivo, debido a que requiere de la experiencia del observador, por tal motivo se han desarrollado métodos que permiten la obtención de datos cuantitativos referentes a la asimetría facial que son discutidos en la siguiente subsección.



Figura 2.6. Línea media facial [49].

Después de que la nube de puntos facial y su reflejo fueron registradas se puede extraer un plano de simetría denotado por Π_s , por medio del ajuste de los puntos medios, definido por la Ecuación (15).

$$q_{ci} = \frac{1}{2}(q_i + q'_{mi}), i = 1, 2, \dots, N \quad (15)$$

Donde N es el número de puntos de la imagen facial 3D, el conjunto de puntos q_i corresponden a la imagen facial 3D y el conjunto de puntos q_{mi} corresponden a la imagen reflejo, q_{ci} son los puntos medios que se emplean para ajustar un plano de mínimos cuadrados, que corresponde al plano de simetría final Π_S .

2.8. Asimetría facial

Los seres humanos presentan un cierto grado de asimetría, la cual está presente desde la etapa perinatal, pero esta puede incrementarse debido al desarrollo irregular en los tejidos óseos, los tejidos blandos y los dentales a lo largo del desarrollo de un individuo. Un estudio realizado por Ferrario et al. [3], demostró que la asimetría facial subclínica es común, ellos realizaron un estudio de la asimetría de sujetos sin alteraciones faciales y como resultado obtuvieron que existían asimetrías en los tejidos blandos de ambos lados del rostro. La asimetría facial también es provocada por padecimientos que afectan al funcionamiento de los tejidos blandos como es el caso de la parálisis facial y otras enfermedades neurológicas [4] [5].

2.8.1. Escalas de evaluación clínica de la asimetría facial

Burres en 1986 [50], desarrolla el sistema Burres-Fisch, que es un sistema objetivo de cuantificación del movimiento facial que emplea la medición lineal, la cual es una técnica para medir distancias faciales desde puntos antropométricos. Se evaluaron 7 expresiones faciales a través de ecuaciones que emplean el porcentaje de desplazamiento de los puntos, en el rostro en movimiento comparado con el rostro en reposo. El sistema de Burres-Fisch da como resultado un porcentaje de las mediciones lineales, sin embargo, el proceso de medición es laborioso, complejo y requiere de un tiempo de 20 min aproximado por sujeto.

El sistema Nottingham se desarrolló en 1994 [6], con el objetivo de proporcionar una medición objetiva y rápida en comparación al sistema Burres-Fisch. Este consiste en medir distancias del punto supraorbitario al infraorbitario y del canto externo al ángulo de la boca, estas mediciones se realizan de forma bilateral con el rostro en reposo y ejecutando tres movimientos faciales: elevación de las cejas, cerrar los ojos y sonreír. Como resultado se obtiene un porcentaje entre las diferencias del lado izquierdo y el lado derecho donde el 100% indica un rostro normal y el 0% una asimetría total.

El cálculo de la asimetría facial de una imagen 2D, requiere de la colocación de puntos antropométricos para el cálculo de los porcentajes propuestos por el sistema Nottingham, sin embargo, la colocación de estos puntos representa una problemática debido a que esta debe ser realizada por un experto, además de cuidar que estos no sean cubiertos por los pliegues de la piel al realizar algún gesto [12]. Como solución a este problema, se han desarrollado aplicaciones computacionales basadas en el sistema Nottingham como las de Garber et al. en 2015 [17] y Carro et al. en 2016 [14]. Estos sistemas hacen uso de imágenes 2D y de puntos antropométricos automáticos obtenidos a través de los datos 3D del sensor Kinect 2 de Microsoft © y de las librerías FaceTracking que están contenidas en su SDK (por sus siglas en inglés, Software Development Kit).

Estos sistemas tienen como desventajas el uso de las imágenes faciales 2D, las cuales tienen como limitante los problemas de pose e iluminación, además de que el sistema Nottingham no permite realizar un análisis global del rostro.

2.9. Métodos de cálculo de asimetría facial en imágenes 3D

La asimetría facial ha sido evaluada utilizando imágenes faciales 3D, debido a que estas ofrecen la estructura del rostro y las características de su superficie. Por este motivo se han desarrollado distintos métodos para evaluar la asimetría facial provocada por diversos padecimientos como el trabajo que desarrollaron Benz et al. en el 2002 [13], donde presentan un método por medio del cual se realiza un análisis de asimetría para indicar la posición 3D del globo ocular, como apoyo en la cirugía de reparación de desplazamiento del globo ocular. Su método considera al rostro humano como un cuerpo simétrico y calcula un plano de

simetría del rostro a través del registro de la malla original y su malla reflejada en un plano arbitrario, de una imagen facial 3D adquirida con el sensor 3D-SHAPE GmbH. El registro está compuesto de dos pasos: en el primer paso realizan una alineación de forma manual de ambas mallas para aproximarlas. El segundo paso consiste en una alineación fina por medio del algoritmo iterativo de puntos más cercanos (ICP). Con ambas mallas registradas, se calcula el plano de simetría con los centros de los pares de puntos de ambas mallas. El método permite obtener de forma cuantitativa cambios sutiles en la asimetría del rostro hasta asimetrías muy marcadas, sin la necesidad del uso de puntos antropométricos. Este método permite realizar la comparación de ambas mitades del rostro divididas por un plano de simetría en una imagen 3D. La distancia media y la desviación estándar son criterios para determinar si la malla reflejada se ajusta a la malla original. El método tiene como ventajas que no es invasivo y puede repetirse tantas veces se desee, este puede automatizarse completamente y los resultados son independientes del médico que realiza la evaluación. La primera alineación entre ambas mallas se realiza de forma manual, a diferencia de lo realizado en la presente tesis, en la cual la primera alineación es de forma automática, esto debido a que la extracción de la región facial está delimitada por una elipse y no contiene bordes.

En 2006 Zhang et al. [21] proponen un método para un sistema de autenticación de rostros 3D, que se basa en la suposición de que el rostro humano es bilateralmente simétrico. La adquisición de las imágenes 3D, fue realizada a través del sistema de escaneo 3Q inc., el cual ésta compuesto por cuatro cámaras de profundidad. El método extrae un plano de simetría de forma automatizada, sin la necesidad de conocer el sistema de coordenadas del escáner y de la pose de la cabeza. Antes de aplicar el registro fino por medio del algoritmo ICP, entre la malla original y la malla reflejada, usan una transformación espejo, donde determinan la posición del plano espejo por medio del análisis de componentes principal de modo que la malla original y la malla reflejada estén aproximadamente alineadas. La ubicación inicial del plano espejo obtenido de PCA no solo proporciona un registro inicial, sino que contribuye a una rápida convergencia del algoritmo ICP. La metodología de Zhang et al. [21], realiza el cálculo del plano de simetría para una autenticación de rostros, en la cual se puede resaltar el uso de PCA para generar una primera alineación entre ambas nubes de puntos, para propósitos de este trabajo, esto permite realizar una alineación gruesa o primer superposición

de la nube de puntos facial y su reflejo de forma automática y de esta forma obtener un primer plano de simetría.

Meyer-Marcotty et al. en 2010 [18] realizan un análisis de asimetría facial de pacientes con cirugías de labio leporino y paladar hendido, para evaluar el impacto en la percepción de sus rostros. Sus imágenes 3D fueron adquiridas por medio del sensor 3D óptico FaceScan (3D-Shape GmbH) que está basado en un método de triangulación de medición de fase. También se requirió de una estructura de dos espejos colocados en ambas partes laterales del sujeto. La reconstrucción de las imágenes 3D se realizó a través del software Silm3D. Para realizar el análisis de asimetría como primer punto calcularon el plano de simetría tomando como base, el método desarrollado por Benz et al. [13]. El cálculo de la asimetría facial se obtuvo de la distancia entre la imagen original y la imagen reflejada por medio de un análisis cuantitativo. Las distancias absolutas medias, se calcularon a partir de todas las distancias de los puntos locales entre las imágenes originales y las imágenes reflejo. Cuanto mayor sea la asimetría de la cara, mayor será la distancia absoluta media, la cual es definida como índice de asimetría. El análisis de asimetría fue dividido en tres partes del rostro como: la cara completa, la cara media y la cara inferior. Los resultados que obtuvieron fue una distancia absoluta media de 0.87 mm en pacientes y de 0.59 mm en sujetos de control en el análisis del rostro completo y una desviación estándar de 0.26 mm en pacientes y 0.11 mm en sujetos de control. El análisis realizado por Meyer-Marcotty et al. [18], proporciona datos de referencias de rostros de sujetos sanos en comparación con rostros de sujetos que presentan una asimetría, las cuales serán empleadas para la comparación de los resultados en la presente tesis.

Wein Quan et al. en 2012 [1], presentaron un método para medir la asimetría facial en imágenes faciales 3D que es invariante a las poses y a las expresiones faciales. Las imágenes faciales 3D fueron obtenidas de la base de datos Hi4D-ADSIP, la cual contiene una recopilación de imágenes tridimensionales de sujetos sanos, pacientes con parálisis facial y mal de Parkinson y fueron adquiridas a través de un sistema de dos arreglos que contenían tres cámaras en cada uno, que tenían una resolución de 4 megapíxeles. Cada arreglo estaba conformado por dos cámaras de profundidad y una RGB. La adquisición y el procesamiento de la imagen 3D, se realizaron de forma paralela a través de seis computadoras [24]. La

imagen es preprocesada para extraer la región facial por medio de la detección de la punta de la nariz en la cual colocaron una esfera de un radio determinado, con la cual abarcaron la superficie facial para eliminar elementos como orejas y cabello. Su método calcula un plano de simetría del rostro basado en el método de Benz et al. en 2002 [13] y la transformación espejo de Zhang et al. [21]. La asimetría facial se obtuvo del cálculo de la distancia euclidiana entre los puntos de la malla original y la malla reflejada. Esta metodología evalúa la asimetría facial en segmentos de videos de sujetos sanos y pacientes con padecimientos de parálisis, mal de Parkinson y derrame cerebral. La evaluación fue realizada en secuencias de video donde los sujetos sanos y pacientes pronunciaban una frase. Los autores encontraron que los pacientes no solo tienen una asimetría mayor a los sujetos sanos, sino que presentan cambios significativos en la asimetría durante la pronunciación de la frase. Como resultado, el método propuesto fue capaz de reconocer el nivel de disfunción facial y detección de cambios menores en la asimetría que los médicos no pudieron notar durante el examen de rutina. El trabajo de Wein Quan et al. [1], hace uso de secuencias de video 3D faciales adquiridas por un sistema de varias cámaras de profundidad y RGB. El presente trabajo de investigación utiliza una nube de puntos facial de una imagen 3D, cuya plataforma está conformada por un solo sensor RGB-D de bajo costo una pc y un software de procesamiento y reconstrucción de imágenes 3D.

Martin Schätz et al. [23] en 2016, hacen uso de la máscara facial automática de 1,347 puntos que genera la herramienta de seguimiento del rostro del SDK del sensor Kinect v2 ©. De los 1,347 puntos, 650 aproximadamente corresponden a cada mitad del rostro, basado en este dato se establece un plano de simetría obtenido a través de un plano de mínimos cuadrados. Después de obtener el plano de simetría, realizan una rotación y una traslación para sobreponer el lado sano sobre el lado afectado. Cuando ambas partes están sobrepuestas se realiza una sustracción entre ambas para la obtención de la asimetría. El método está limitado debido al número de puntos que contiene la máscara facial que proporciona la librería del SDK del Kinect v2 ©, además de presentar problemas con la distancia, debido a que si el sensor se encuentra más alejado de la persona provoca un error mayor en los datos de profundidad.

En los trabajos revisados se puede observar que la obtención de la asimetría de una imagen 3D, es obtenida a través del cálculo de la distancia entre las nubes de puntos de la imagen inicial y su reflejo superpuestas, por medio de su registro de forma. Los resultados obtenidos muestran diferencias entre sujetos sanos y pacientes con alguna asimetría. Sin embargo, estos trabajos han sido realizados con el uso de imágenes 3D cuya adquisición se realizó a través de sensores RGB-D especializados o por medio de arreglos de sensores RGB y de profundidad y que requirieron un conjunto de computadoras para su procesamiento. En la literatura no hay registro del uso de una plataforma que este conformada por un sensor RGB-D de bajo costo y una herramienta computacional, para la adquisición de la imagen facial 3D, la cual sea utilizada para determinar la asimetría facial a través de la metodología mencionada, como se realiza en la presente tesis.

Los trabajos relacionados con la adquisición y reconstrucción de una imagen 3D, utilizando sensores de bajo costo se discuten en la subsección 2.10.

2.10. Métodos de reconstrucción de imágenes faciales 3D

Se han desarrollado diferentes métodos para la adquisición y reconstrucción de imágenes faciales 3D, uno de ellos es el presentado por Hernandez et al. [28], quienes desarrollaron una metodología compuesta por tres etapas, para reconstruir una imagen facial 3D, a través de una representación cilíndrica de imágenes de rango. La primera etapa consiste en la adquisición de dos imágenes de profundidad utilizando el sensor PrimeSense, de las imágenes adquiridas se realiza una detección y extracción de la región facial incisos A) y B) de la Figura 2.7., considerando al mentón como una discontinuidad en el mapa de profundidad y partiendo de este punto se busca el punto más alto para delimitar la región facial. La segunda etapa de la metodología consiste en realizar un registro de forma entre ambas imágenes de rango ilustrada en el inciso C) de la Figura 2.7., a la imagen resultante se le coloca un cilindro alrededor de la cara, cuyo eje es el eje vertical que atraviesa la cabeza, de esta forma se obtiene un mapa cilíndrico de profundidad, esta representación permite transformar datos 3D en datos 2D, ilustrado en el inciso D) de la Figura 2.7. Para la obtención

de un modelo suave eliminaron el ruido de los datos de entrada y el error en la estimación de pose mediante la combinación de integración temporal y filtrado espacial que se ilustra en el inciso E) de la Figura 2.7. La última etapa consiste en la generación de una malla utilizando los píxeles vecinos de la imagen cilíndrica 2-D, la textura es obtenida a través de la proyección del modelo a los datos de la imagen RGB, la imagen resultante se ilustra en el inciso F) de la Figura 2.7.

El trabajo presenta limitantes como la capacidad de la representación cilíndrica la cual no puede reconstruir algunas partes no convexas, como las orejas o las fosas nasales, además de que la posición del eje del cilindro se ve afectada por la posición inicial de la cabeza disminuyendo su precisión. El método solo está diseñado para reconstruir rostros sin cambio de expresión, lo que representa una limitante en el caso de la determinación de la asimetría de rostros que no se encuentren en reposo.

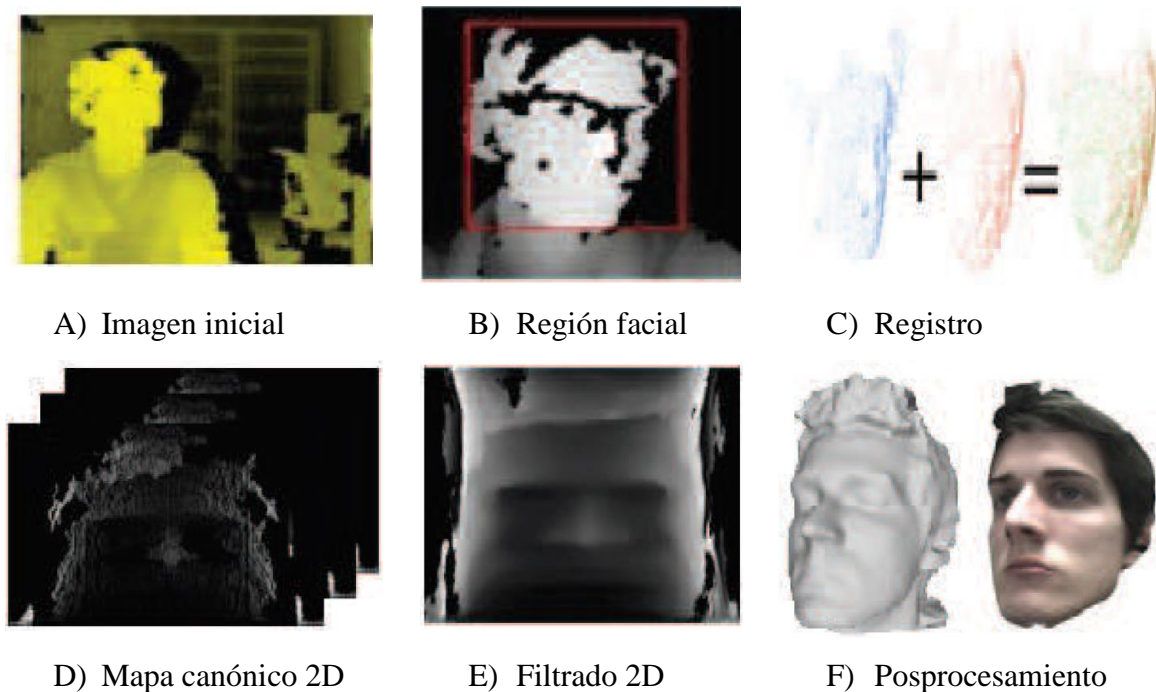


Figura 2.7. Reconstrucción de una imagen facial 3D, Hernandez et al. [28].

Otro método es el desarrollado por Hwang et al. [29], quienes realizan una reconstrucción por medio de un modelo de cara 3D deformable, basado en modelos estadísticos, la

adquisición de los datos se realizó por medio de un sistema conformado por dos espejos y una cámara, que se ilustra en la Figura 2.8. Su método está compuesto por dos etapas principales: la primera consiste en la estimación de la forma facial 3D utilizando un modelo deformable de caras 3D y la segunda en el mapeo de texturas utilizando clonación sin fisuras que es un tipo de mezcla de gradiente-dominio. En la primera etapa se realiza una adquisición de imágenes 2D frontales y laterales con el apoyo de los espejos laterales, el cálculo de la forma de la cara 3D se realiza ajustando varios modelos de forma de cara en 3D a las imágenes del rostro en las tres vistas.

La textura se obtiene de la imagen 2D capturada, proyectando los vértices de la malla triangular sobre el plano de la imagen generando un mapa de texturas con las tres vistas del rostro para crear un mapa de toda la cara. Las imágenes resultantes se ilustran en la Figura 2.9. Esta metodología tiene como limitante el escenario que se emplea para la adquisición de los datos, ya que depende de espejos y tableros de ajedrez para su calibración, además de presentar problemas en la vista lateral del rostro.



Figura 2.8. Escenario de adquisición de la imagen del método de Hwang et al. [29]



Figura 2.9. Imágenes faciales 3D resultantes de la metodología de Hwang et al. [29].

La función de base radial ofrece una descripción funcional compacta de un conjunto de datos de una superficie y tiene la capacidad de modelar grandes conjuntos de datos complicados con alta precisión, como lo realizaron Carr et al. [51], quienes usan funciones de base radial poliarmónicas para reconstruir superficies lisas y múltiples a partir de datos de nubes de puntos y para reparar mallas incompletas. Como resultado una superficie facial de 14,806 puntos fue interpolada a 29,074 puntos con un total de 3,564 centroides.

Wibowo et al. [27] presentan una reconstrucción a través de la interpolación RBF de una imagen facial adquirida con el sensor Kinect para Xbox 360 ©, la imagen inicial presentaba ruido y agujeros en su superficie. La función de base radial utilizada en la interpolación RBF, fue la función biarmónica, para suavizar la superficie de la imagen utilizaron un filtro de difusión anisotrópica. Aunque lograron el objetivo de rellenar los agujeros de la superficie de la imagen facial, después de la aplicación del filtro de suavizado esta no presenta detalles sobre las formas de regiones como ojos, boca y nariz, como se ilustra en la Figura 2.10., por lo que no ofrece detalles del rostro para poder determinar su asimetría facial, a través de la superposición de la imagen inicial y su reflejo.

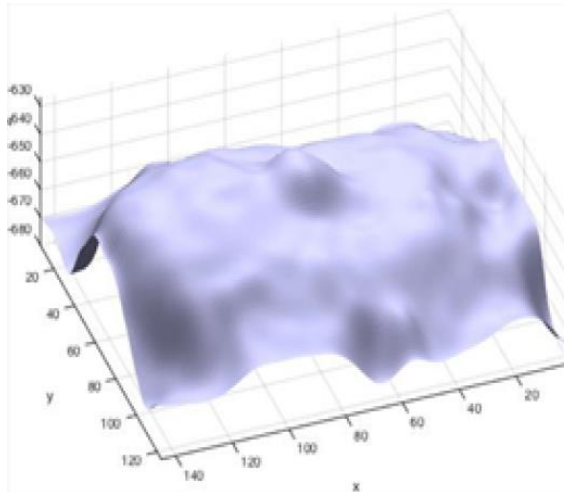


Figura 2.10. Imagen facial 3D resultante del método de Wibowo et al. [27]

Zhang et al. [26], reconstruyen una nube de puntos facial 3D densa aplicando una interpolación RBF. La metodología se divide en dos etapas: la primera que consiste en adquirir los datos de profundidad y RGB a través del sensor Kinect para Xbox 360 ©.

Después de capturar ambas imágenes realizan una alineación entre ambas y a través del reconocimiento facial en la imagen RGB extraen los puntos correspondientes en el mapa de profundidad, de esta forma obtienen una nube de puntos facial. En la segunda etapa a la nube de puntos facial se le aplica una interpolación RBF, cuyo kernel es la función de base radial gaussiana. El valor de la desviación estándar de la ecuación de la función de base radial en la capa oculta, es obtenida a través del cálculo de la distancia entre los puntos más cercanos de la nube de puntos de entrada y los centroides, esta distancia es calculada por medio del algoritmo Kd-tree. La nube de puntos facial resultante obtuvo un incremento de 1,000% en la densidad de puntos. En la Figura 2.11. se visualizan la nube de puntos facial inicial y la nube de puntos densa obtenida de la interpolación RBF. En los resultados mostrados se percibe una nube de puntos sin huecos, con una distribución uniforme entre los puntos de la superficie y una mayor densidad de estos. Sin embargo, no se muestra una reconstrucción 3D en la cual se pueda percibir las formas en las regiones de ojos y boca, necesarias para determinar la asimetría facial a través del registro de forma entre la imagen inicial y su reflejo.

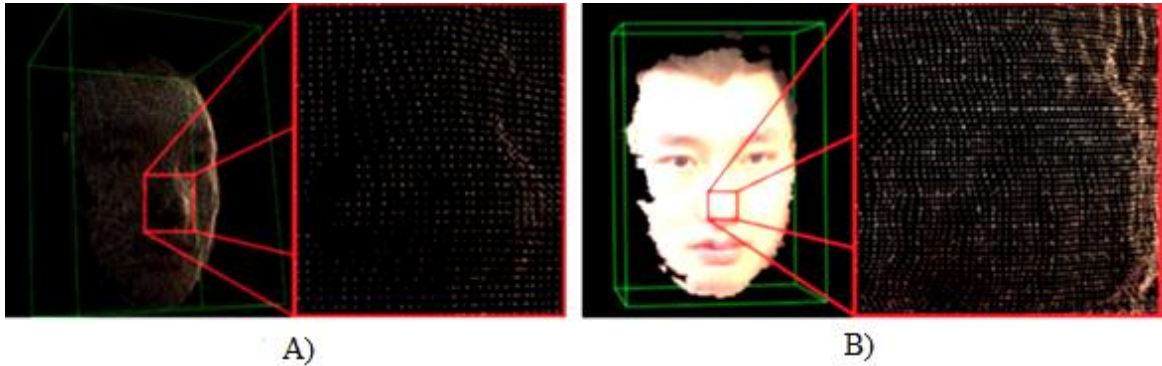


Figura 2.11. A) Nube de puntos facial inicial, B) Nube de puntos de alta densidad resultado de la interpolación RBF, Zhang et al. [26].

Manués et al., en 2018 [30] realizan un estudio para determinar si la precisión y exactitud del sensor Kinect para Xbox 360 © (sensor de bajo costo) son similares a las del sensor DI3D (sensor especializado). El estudio se realizó comparando las imágenes faciales 3D adquiridas con el sensor Kinect y procesadas usando el software Skanect v 1.7, con las imágenes faciales 3D adquiridas con el sensor DI3D y procesadas con el software DI3D versión 5.2.3.1859.

Las imágenes faciales 3D fueron de cinco sujetos femeninos y cinco sujetos masculinos. La adquisición de la imagen, se realizó colocando el sensor de frente al usuario y se movió en una trayectoria de arco hacia el lado izquierdo del sujeto y después hacia el lado derecho pasando de nuevo de frente al sujeto, este procedimiento se repitió con ambos sensores. Un ejemplo de las imágenes adquiridas con ambos sensores se ilustra en las Figuras 2.12. y 2.13. La comparación se realizó superponiendo las imágenes de ambos sensores a través del método de registro. Los resultados obtenidos muestran diferencias estadísticas en el error medio de algunas regiones de la imagen entre el sensor Kinect y el DI3D, sin embargo, las diferencias fueron menores de 2 mm, esta diferencia se considera aceptable en el tratamiento de pacientes clínicos [30]. El sensor Kinect no pudo reproducir la calidad de las imágenes 3D del sensor DI3D, pero se puede considerar una opción asequible para la adquisición de imágenes faciales 3D considerando sus limitaciones. Un punto que resaltar es la portabilidad del sensor Kinect en comparación de otros sensores o sistemas, que para su traslado requerirían de una nueva calibración o podrían sufrir daños.



Figura 2.12. Imágenes faciales 3D adquiridas con el sensor DI3D [30].

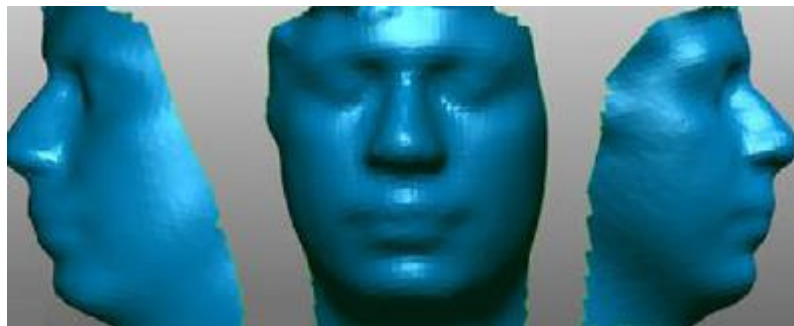


Figura 2.13. Imágenes faciales 3D adquiridas con el sensor Kinect para Xbox 360 y Skanect [30].

Un breve resumen del estado del arte de las metodologías para el cálculo de la asimetría facial se presenta en la Tabla 2.2

Tabla 2.2. Resumen estado del arte cálculo de asimetría facial.

Autor	Año	Parámetros	Técnicas	Resultados
Benz et al. [13]	2002	3D-SHAPE GmbH	Cálculo del plano de simetría de una imagen facial 3D. Cálculo de las distancias entre la imagen facial inicial y su imagen reflejo. La distancia media y la desviación estándar son los criterios para determinar la asimetría del rostro.	Método para calcular el plano de simetría de una imagen facial 3D, para determinar la asimetría del rostro, está basado en algoritmos de registro y no depende de puntos antropométricos.
Zhang et al. [21]	2006	Sistema de escaneo 3Q inc ©.	Cálculo del plano de simetría de una imagen facial 3D. Primera alineación entre la imagen facial y su reflejo a través de PCA.	Método de plano de simetría automatizado sin la necesidad de conocer el sistema de coordenadas del escáner y de la pose de la cabeza.
Meyer-Marcotty et al. [18]	2010	Sensor 3D óptico FaceScan (3D-Shape GmbH) ©. Estructura de dos espejos. Software reconstrucción de imágenes 3D Silm3D	Cálculo de asimetría facial a través de la distancia entre la imagen original y la imagen reflejada por medio de un análisis cuantitativo. La distancia absoluta media, corresponde al índice de asimetría. Evaluación de las tres regiones del rostro superior, medio e inferior.	Detección de asimetrías de sujetos postoperatorios de labio paladar hendido. Identificación de regiones asimétricas sin perder la morfología completa del rostro.

Tabla 2.3. Resumen estado del arte cálculo de asimetría facial, continuación.

Autor	Año	Parámetros	Técnicas	Resultados
Wein Quan et al. [1].	2012	base de datos Hi4D-ADSIP	Cálculo del plano de simetría de una imagen 3D. Primera alineación a través PCA. Evaluación de asimetría en secuencias de videos 3D faciales. Medición de asimetría a través de la distancia euclidiana entre los puntos más cercanos de la imagen inicial y su reflejo.	Reconocimiento del nivel de disfunción facial y detección de cambios menores en la asimetría que los médicos no pudieron notar durante el examen de rutina.
Garber et al. [17].	2015	Kinect v 2 © SDK de Kinect v2.0 Visual Studio 2013 © Librería FaceTracking	Distancias lineales entre puntos antropométricos, automáticos en imágenes faciales 2D. El cálculo de las distancia está basado en el sistema Nottingham.	Eliminación de marcadores manuales en el rostro. No requiere algoritmos de reconocimiento facial. Automatización del sistema Nottingham. Presenta limitaciones en la precisión de los puntos de referencia.
Carro et al. [4].	2016	Kinect para Windows © SDK de Kinect para Windows © SDK de seguimiento facial	Calculo de distancia entre puntos antropométricos automáticos en imágenes 2D del rostro en reposo y realizando cuatro ejercicios.	Desarrollo de un sistema simple y accesible basado en el sistema Nottingham.

Tabla 2.4. Resumen estado del arte cálculo de asimetría facial, continuación.

Autor	Año	Parámetros	Técnicas	Resultados
Martin Schätz et al. [23].	2016	Kinect v 2 © SDK de Kinect v2.0	Mascara facial del sensor Kinect v2 de 1,347 puntos. Interpolación con el algoritmo vecino natural. Cálculo del plano de simetría a través del método de registro de forma.	Método para el cálculo de asimetría de un rostro en reposo y cuatro movimientos faciales para evaluar los ojos, boca y nariz. Presenta limitantes para la adquisición de la imagen como la distancia, el número de puntos y al iluminación.

Como resultado de la revisión de la literatura, donde se presentaron diversas metodologías para la adquisición de una imagen facial 3D, se puede concluir que el sensor Kinect para Xbox 360 © en combinación con el software Skanect ofrece una solución al requerimiento de la plataforma de adquisición de datos, del presente trabajo de tesis. Lo anterior se concluye debido a la calidad de imagen facial 3D obtenida a través de la combinación del sensor y el software de procesamiento en comparación con los otros métodos revisados. Además de considerar la opción de portabilidad que ofrece el sensor Kinect para Xbox 360 ©, la cual cumple el requisito para ser desplazado a un consultorio médico. Otro punto a considerar es la interpolación RBF, la cual sería empleada para el incremento en la densidad de la nube de puntos facial para obtener una distribución de puntos uniforme entre la nube inicial y su reflejo, esto provocaría una reducción en las distancias de los puntos más cercanos entre ambas nubes, mostrando las distancias provocadas por la asimetría existente en la superficie facial.

Después de haber realizado una revisión al estado del arte referente al tema de investigación y de establecer los conceptos necesarios para el entendimiento de la misma, en el siguiente capítulo se realiza la descripción de la metodología para la determinación de la asimetría facial de nubes de puntos provenientes de imágenes de sensores RGB-D.

Capítulo 3

MARCO METODOLÓGICO

En el presente capítulo, se describe la metodología que permite realizar la adquisición de una imagen RGB-D usando una plataforma portable y de bajo costo, con el objetivo de obtener la asimetría de la misma. Los sensores seleccionados para la plataforma de adquisición de imágenes 3D, son el Kinect para Xbox 360 © y el Sense 3D Cubify ©, estos pertenecen a la gama de sensores de bajo costo y su forma de operación es simple con la combinación de un software de procesamiento y reconstrucción de imágenes 3D. La metodología está compuesta por las dos etapas principales siguientes:

1. Generación de una nube de puntos facial densa.
2. Determinación de asimetría facial.

Los pasos que conforman las dos etapas principales de la metodología se ilustran en el diagrama de flujo de la Figura 3.1. y serán explicados en las siguientes subsecciones.

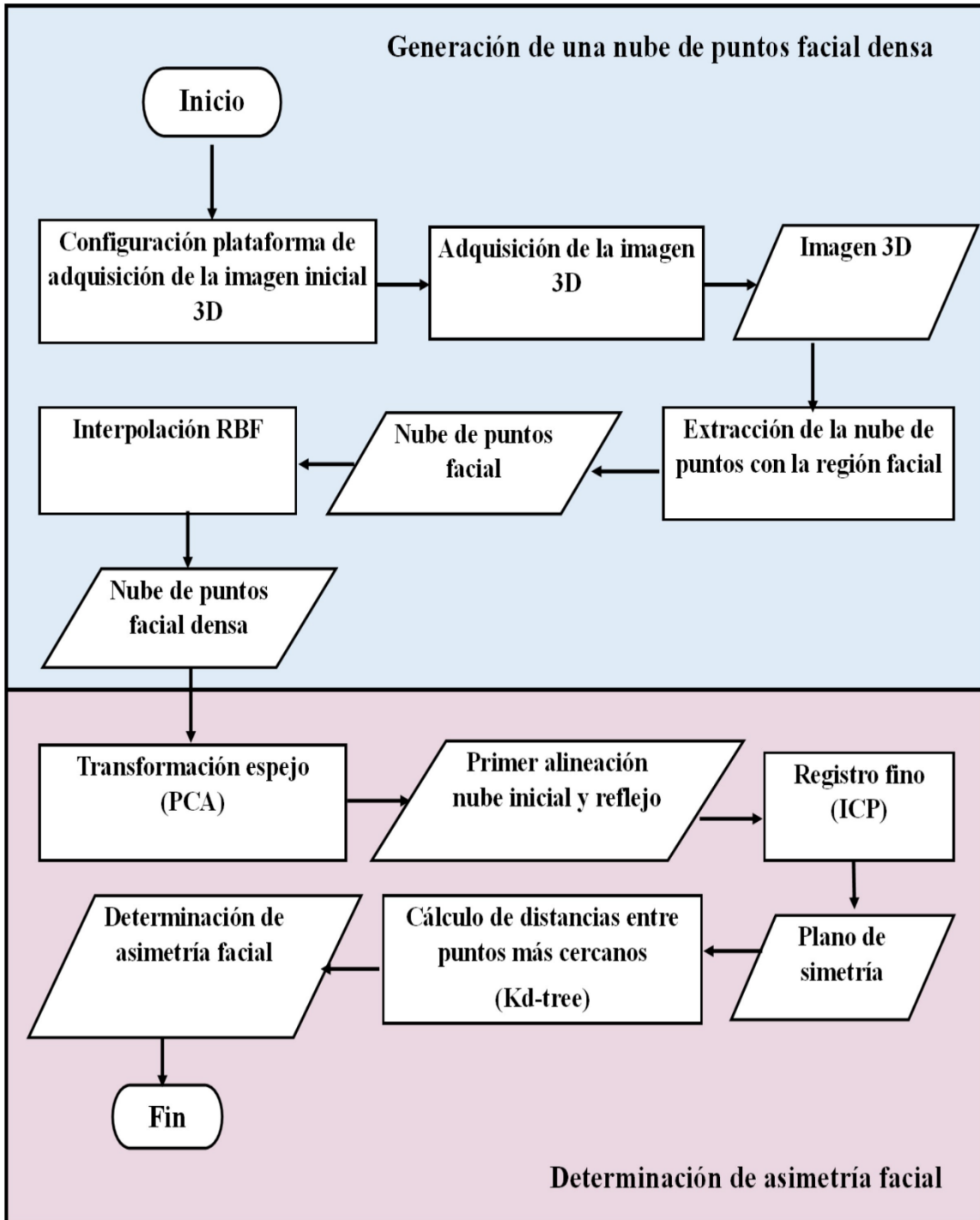


Figura 3.1. Metodología para la determinación de la asimetría facial de nubes de puntos provenientes de una imagen RGB-D.

3.1. Generación de una nube de puntos densa

En esta primera etapa de la metodología el objetivo es obtener una nube de puntos densa, para lograr esto se realizan los siguientes pasos:

1. Configuración plataforma de adquisición de la imagen inicial 3D.
2. Adquisición de la imagen 3D.
3. Extracción de la nube de puntos con la región facial.
4. Interpolación RBF.

3.1.1. Configuración plataforma de adquisición de la imagen 3D



En este paso se presentan dos plataformas a través de las cuales se realiza la adquisición de la imagen 3D inicial, cada plataforma está conformada por un escenario de adquisición de datos, un sensor RGB-D de bajo costo (Kinect para Xbox 360 © y Sense 3D Cubify v1 ©), una computadora y un software de procesamiento y reconstrucción de imágenes 3D, estas plataformas se enuncian a continuación:

1. Plataforma Kinect.
2. Plataforma Sense 3D.

La selección del sensor Kinect para Xbox 360 © fue basada en sus características como precio y portabilidad, que se describen en la Tabla 3.1. Este sensor tiene un SDK para el desarrollo de aplicaciones para la adquisición de los datos de profundidad y RGB, pero es necesario desarrollar un software utilizando sus librerías para obtener una imagen 3D. Por tal motivo para el presente trabajo de investigación la adquisición de la imagen 3D, se realizará a través de la herramienta computacional Skanect © versión 1.9.1 (Software Skanect 3D Scanning por Occipital, San Francisco, CA, EUA) [52], que realiza la adquisición de los datos RGB y de profundidad, además del procesamiento y la reconstrucción de la imagen. El Software Skanect © realiza una fusión de varias tomas de imágenes de profundidad en tiempo real para posteriormente generar una malla triangular y reconstruir una imagen 3D.

El sensor Sense 3D Cubify v1 © es de bajo costo y tiene una estructura similar al Kinect para Xbox 360 ©, ambos trabajan con la tecnología de luz estructurada y están compuestos por un láser y dos cámaras: una RGB y una de profundidad. El sensor Sense 3D Cubify © es un sensor de tipo manual y sus características de resolución, rango de operación, costo, etc., se describen en la Tabla 3.1. El sensor viene con un software llamado Sculpt v1 ©, por medio del cual se realiza la adquisición de datos RGB y de profundidad y estos son procesados para generar la reconstrucción de la imagen 3D.

Tabla 3.1. Características de los sensores RGB-D [53] [54].

	Sensor Kinect para Xbox 360 (Microsoft ©)	Sense 3D v1 (Cubify ©)
		
Tecnología	Luz estructurada	Luz estructurada
Categoría	Fijo, motor de inclinación	Portátil
Resolución espacial	3 mm	0.9 mm
Máx. precisión	3 mm	1 mm
Rango de operación	0.80 – 3.25 m	0.35 - 3 m
Área de escaneo cercano	0.80 m x 0.80 m	0.2 m x 0.2 m
Área de escaneo lejano	3.25 m x 3.25m	3 m x 3m
Conectividad	USB 2.0	USB 2.0
Precio (USD)	\$ 136	\$ 419
Gama sensor	Baja	Baja

Las pruebas para la adquisición de la imagen 3D con ambas plataformas fueron realizadas en un espacio con dimensiones de 4 m por 4 m iluminado con dos lámparas Tecno Lite ®

modelo LTL-3240 con tres tubos fluorescentes de 14 W y un flujo luminoso de 3600 lm cada una. El espacio no permitía la filtración directa de luz natural y tenía un fondo blanco, las dimensiones del espacio son considerando los requerimientos mínimos establecidos en la norma NOM-005-SSA3-2010 [25] para un consultorio médico general.

Plataforma Kinect

La plataforma Kinect está compuesta por:

1. Sensor Kinect para Xbox 360 ©.
2. Computadora de escritorio con las siguientes características:
 - Memoria RAM: 16 GB.
 - Procesador: Intel Core i7-4790 3.60GHz.
 - Tarjeta de gráficos: NVIDIA GTX 650.
3. Software Skanect © v 1.9.1.

La adquisición de la imagen 3D se hizo de acuerdo con los siguientes parámetros del software Skanect ©:

- Calidad de escaneo: se adquirieron cuatro imágenes 3D en cada proceso de adquisición, para cada una se seleccionó una de las cuatro opciones de calidad que brinda el software (baja, mediana, alta y muy alta).
- Modo: se tienen tres opciones de configuración para el modo de adquisición de la imagen 3D (datos de profundidad, datos de profundidad con datos RGB y datos de profundidad con datos RGB de alta resolución). La configuración seleccionada fue los datos de profundidad, ya que los datos RGB no son necesarios para la etapa de la determinación de la asimetría facial.
- Cuadro: 0.8 x 0.8 x 0.8 metros, debido a que la distancia seleccionada entre el sensor Kinect para Xbox 360 © y la punta de la nariz del sujeto fue de 0.80 m.
- Tiempo de espera para comenzar la adquisición: 5 segundos.

- Tiempo de adquisición: 90 segundos, este tiempo es configurable.
- Escala para exportar modelo: milímetros
- Formato para exportar archivo: .ply, formato configurable.

Diseño experimental

El sensor Kinect para Xbox 360 © fue colocado fijo en un tripié para cámara como se ilustra en la Figura 3.2. y se utilizó una silla giratoria donde el sujeto fue sentado con el rostro de frente al sensor. El sensor fue colocado a la altura de la nariz del sujeto a una distancia de 80 cm, esta distancia fue medida a través de una cinta métrica colocada debajo del sensor en la parte central de este, el escenario montado para la adquisición de la imagen se ilustra en la Figura 3.3. El espacio requerido para montar la plataforma Kinect fue de 1.30 m de ancho por 2.50 m de largo.



Figura 3.2. Posición del sensor Kinect para Xbox 360 © para la adquisición de imágenes.



Figura 3.3. Escenario de adquisición de datos del sensor Kinect para Xbox 360 ©.

La distancia de 80 cm para la adquisición de la imagen 3D, se seleccionó a través de pruebas de captura de imágenes considerando los rangos de operación establecidos para el sensor Kinect para Xbox 360 © [53], los resultados obtenidos mostraron que las imágenes adquiridas a una distancia mayor a 80 cm contenían datos suavizados en las regiones de interés como ojos, boca y nariz, por lo tanto, no eran funcionales para determinar su asimetría.

El sujeto realizó una rotación de 180°, con apoyo de la silla giratoria, de esta forma su rostro fue adquirido desde la oreja izquierda hasta la oreja derecha. Los movimientos de rotación se ilustran en la Figura 3.4., donde el primer movimiento fue en un ángulo de 90° hacia la derecha (indicado con el número 1 en la Figura 3.4.) y después regresó a la posición inicial (indicado con el número 2 en la Figura 3.4.); cuando el sujeto quedó de nuevo frente al sensor se realizó el mismo movimiento, pero ahora hacia el lado izquierdo, estos movimientos son indicados con los números 3 y 4 en la Figura 3.4.

El movimiento de rotación realizado por el sujeto fue dando cuatro pasos hacia cada lado, entre cada paso se tomó un tiempo de 3 seg. El tiempo de adquisición configurado en el software Skanect © fue de 90 seg, lo que permitió realizar dos rotaciones de 180°. Con las características de hardware de la computadora utilizada, la adquisición de la imagen 3D se realizó a 30 fps (cuadros por segundo).

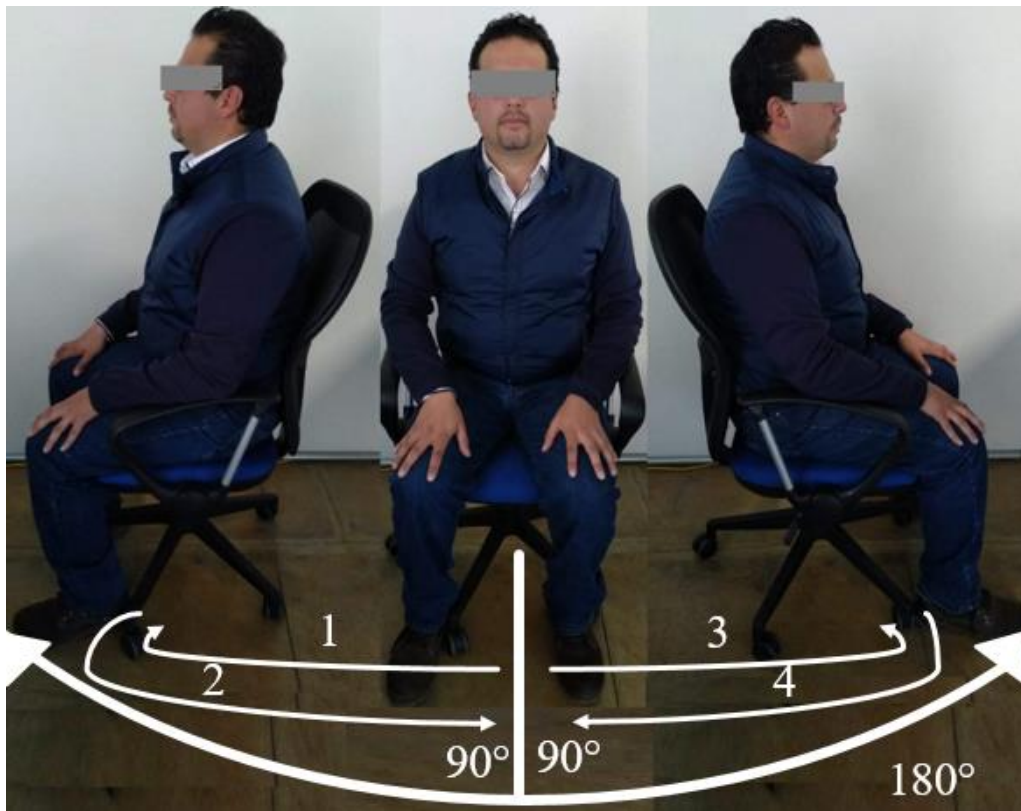


Figura 3.4. Movimiento de rotación del sujeto para la adquisición a través de la plataforma Kinect ©.

La posición fija del sensor Kinect para Xbox 360 © fue determinada después de haber realizado pruebas de adquisición de imágenes 3D con el sensor fijo y en movimiento. Los resultados obtenidos de estas pruebas mostraron que, al realizar la adquisición con el sensor en movimiento, este debería ser rotado a una distancia constante del sujeto ya que si esta sufría variaciones el software Skanect © indicaba que el objeto escaneado se había perdido, cuando esto sucedía era necesario regresar el sensor a la posición anterior antes de la variación en la distancia. Esta situación provocó que se volviera a reiniciar el proceso de adquisición de la imagen 3D, debido a que en ocasiones no fue posible regresar al sensor a

la posición anterior o la imagen 3D resultante contenía superficies irregulares en la zona de la nariz. Por el contrario, la imagen adquirida con el sensor fijo y el sujeto en movimiento no presento deformaciones en las regiones del rostro, puesto que el movimiento del sujeto no provoco que la toma se perdiera en el software.

Plataforma Sense 3D

La plataforma Sense 3D está conformada por:

1. Sense 3D Cubify v1 ©.
2. Computadora de escritorio con las siguientes características:
 - Memoria RAM: 16 GB.
 - Procesador: Intel Core i7-4790 3.60GHz.
3. Software Sculpt v1 ©.

La adquisición de la imagen 3D se hizo de acuerdo con los siguientes parámetros del software Sculpt ©:

- Calidad de escaneo: Alta.
- Modo: datos de profundidad con datos RGB (opción por default del software y no permite cambios).
- Cuadro: No se cuenta con la opción para seleccionar dimensiones, en su lugar se tiene la opción de escanear cabeza.
- Tiempo de espera para comenzar la adquisición: 3 segundos (opción por default, no configurable).
- Tiempo de adquisición: 50 segundos
- Escala para exportar modelo: milímetros (opción por default, no configurable).
- Formato para exportar archivo: .obj (opción por default, no configurable).

Diseño experimental

El sujeto fue sentado en una silla giratoria y el sensor Sense 3D Cubify v1 © fue sostenido manualmente, éste se colocó en una posición inicial de frente al sujeto a la altura de su rostro a una distancia de 40 cm, la distancia fue seleccionada por el cuadro de escaneo definido para la opción escanear cabeza en el software de adquisición. El escaneo del rostro se realizó moviendo al sensor, debido a que, al colocarlo fijo y al rotar al sujeto el software Sculpt © generó una imagen con las texturas y formas de la superficie facial mezcladas.

El sujeto fue sentado en la silla y después de colocar el sensor de frente a él, este fue rotado de forma manual hacia la derecha en un ángulo de 90° y después regresando a la posición inicial; el movimiento fue repetido hacia el lado izquierdo como se ilustra en la Figura 3.5. Durante el escaneo del rostro, también se realizaron acercamientos a las regiones boca, nariz y ojos a 35 cm, que es la distancia más cercana a la cual opera el sensor. El tiempo total de escaneo del rostro fue de 50 segundos, por lo que varias veces se movió el sensor

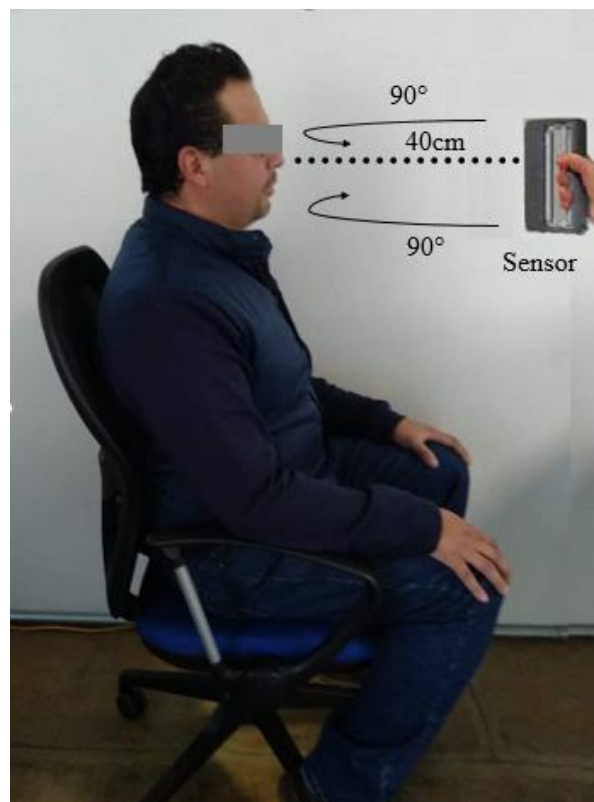


Figura 3.5. Escenario de adquisición de datos de la plataforma Sense 3D.

3.1.2. Adquisición de la imagen 3D

La adquisición de las imágenes 3D con las dos plataformas se realizaron con un total de ocho sujetos sanos de ambos géneros en un rango de edad de 20 a 40 años, quienes firmaron el formato de consentimiento informado del Apéndice A. Como parte del experimento a cada sujeto se le dio la indicación de retirar elementos como anteojos y cabello de su rostro antes de comenzar. Los sujetos de género femenino tenían el cabello recogido lo que permitió que la región facial estuviera descubierta, en el caso de los sujetos de género masculino se condicionó al no uso de barba y bigote grandes o que abarcara la región de la mejilla. En ambas plataformas la cabeza del sujeto se colocó en una posición de frente al sensor y se le solicitó mantenerla firme sin movimiento.

Plataforma Kinect

Con la plataforma Kinect se escanearon los rostros de cinco sujetos a los cuales se les indicó que se realizarían cuatro escaneos de su rostro a través de la plataforma. Las características de los cuatro escaneos son las siguientes:

- El primer escaneo consistió en mantener el rostro en reposo y con una expresión neutra y se ilustra en la Figura 3.6.A.
- El segundo escaneo se realizó provocando una primera asimetría en el rostro del sujeto a través de la colocación de un caramelo de forma esférica cuyo diámetro era de 2 cm, en la parte interior de su mejilla derecha y se ilustra en la Figura 3.6.B.
- El tercer y cuarto escaneo se realizaron provocando otras dos asimetrías con caramelos con un diámetro de 3 cm y 4 cm respectivamente y son ilustradas en las Figuras 3.6.C y 3.6.D.

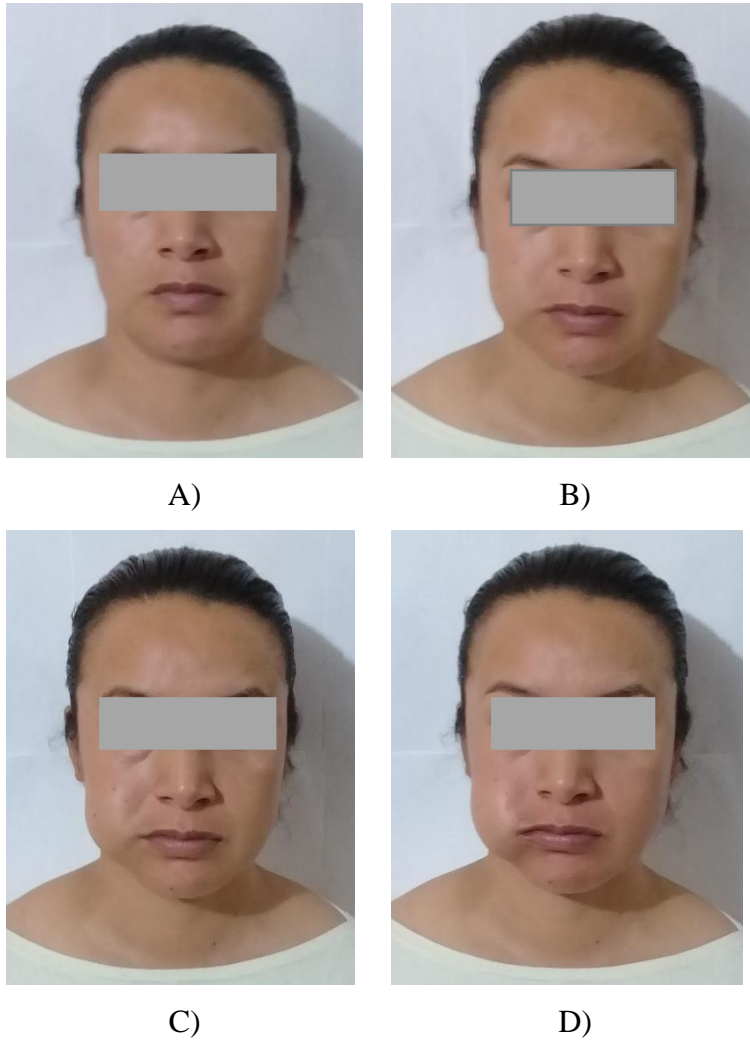


Figura 3.6. Rostros del sujeto, A) en reposo, B) primera deformación, C) segunda deformación y D) tercera deformación.

Plataforma Sense 3D

Con la plataforma Sense 3D, se realizó la adquisición de rostro de tres sujetos a quienes se les indicó que se realizarían dos escaneos: el primero consistía en una posición del rostro en reposo y con una expresión neutra y el segundo sería realizando una sonrisa con la boca cerrada.

3.1.3. Extracción de la región facial

Las imágenes 3D adquiridas con ambas plataformas contienen regiones de la parte superior del cuerpo, cuello y la cabeza del sujeto, el área de interés para el método es la región facial, por lo tanto, es necesario detectarla en la imagen de profundidad. Un método para el reconocimiento de la región facial, es el de la detección de la punta de la nariz [1], éste estima que dicho punto es el más cercano a la cámara, sin embargo, en algunos casos este punto puede coincidir con la punta de la barbilla. Para evitar esta problemática se considera la relación geométrica que existe entre la barbilla y la nariz tomando a la nariz como el centro del rostro, y como el punto más alto en el eje z y el punto medio en el eje y .

Después de obtener las coordenadas de la punta de la nariz, se coloca un elipsoide que abarque la región del rostro con el eje mayor en y , el eje menor en x y el eje z que pasa por la punta de la nariz. De esta forma se eliminan elementos como orejas, cabello y cuello, y como resultado se obtiene una nube de puntos con región facial. Las longitudes de los semiejes del elipsoide con respecto a los ejes x, y, z , se determinan de la medición de las longitud vertical y horizontal del rostro, esta es realizada en el software Meshmixer versión 3.5.474.1., colocando una línea horizontal y vertical en el rostro. La Figura 3.7 ilustra el procedimiento para la extracción de la región facial de la nube de puntos inicial.

Las nubes de puntos faciales resultantes, obtenidas de cada plataforma son analizadas considerando si estas contienen datos faciales en las regiones de ojos, boca y nariz que proporcionen información para determinar su asimetría, además de su portabilidad y que su uso no resulte nocivo para el sujeto.

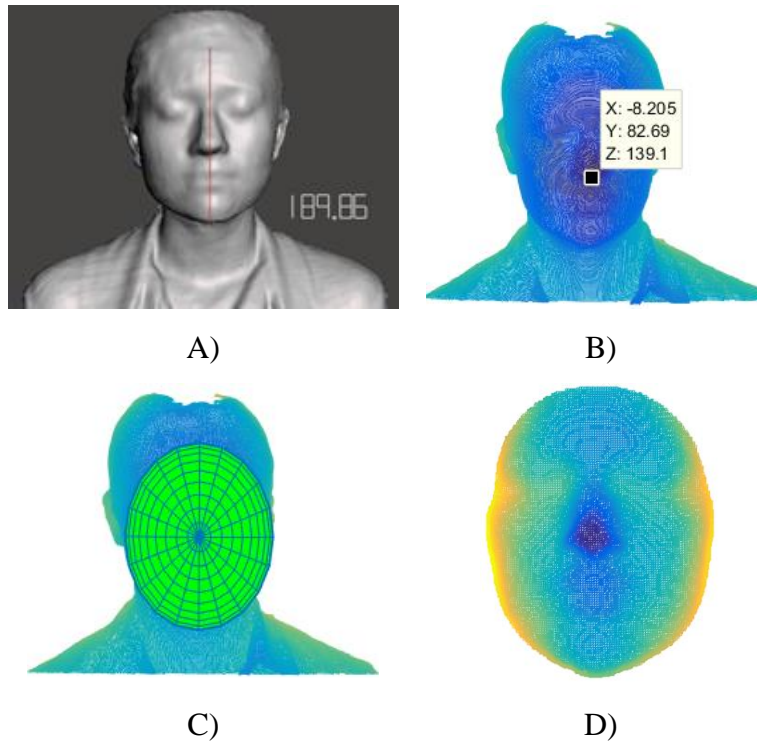


Figura 3.7. Extracción región facial, A) medición longitud, B) detección punta de la nariz, C) colocación de elipsoide y D) extracción región.

3.1.4. Interpolación RBF

Las nubes de puntos faciales resultantes son procesadas a través de una interpolación RBF para incrementar su densidad de puntos. El incremento en la densidad de la nube de puntos, se realiza ajustando la interpolación RBF a esta, sobre una matriz de dimensión $N \times N$, donde N corresponde al número de puntos a interpolar. La matriz está conformada por valores aleatorios que se encuentran en el rango de los valores máximos y mínimos de la nube de puntos facial. Se desarrolló una red RBF en Matlab versión R2015a © y en la etapa de entrenamiento se enviaron como centroides de la capa oculta la nube de puntos facial completa. Este ajuste da como resultado la generación de una nube de puntos de alta densidad.

3.2. Determinación de la asimetría facial

La metodología propuesta considera al rostro humano como un cuerpo simétrico. Un objeto 3D, se considera simétrico si existe un plano donde el objeto sea invariante si éste es reflejado en el mismo [21]. Esta etapa tiene como objetivo la extracción del plano de simetría del rostro, obtenido por medio de una transformación espejo y un procedimiento de registro de forma como lo realizan [13] [21] [1]. La determinación de la asimetría facial está conformada por las siguientes etapas:

1. Transformación espejo (PCA).
2. Registro fino (ICP).
3. Cálculo de distancias ente punto más cercanos (KD-tree).

Los algoritmos empleados para esta parte de la metodología fueron desarrollados en el sistema Matlab © versión R2015a.

3.2.1. Transformación espejo (PCA)

De la nube de puntos facial densa resultante de la interpolación RBF, se obtiene su transformación espejo. El primer paso consiste en obtener los componentes principales de la nube de puntos facial a través de PCA, con los componentes principales obtenidos se genera un nuevo sistema de coordenadas donde el vector propio del componente principal representa al eje y y el segundo y tercer componente principal al eje x y al eje z respectivamente. La nube de puntos facial densa es transformada al nuevo sistema de coordenadas y se realiza su reflexión en el plano yz para obtener la nube de puntos reflejo. Como ambas nubes se encuentran en el mismo sistema de coordenadas existe una primera alineación entre estas, de esta forma se obtiene un primer plano de simetría de sus puntos centrales.

Este plano de simetría se encuentra en el centro de la nube de puntos facial y en ocasiones no coincide con el centro del rostro, esto debido a las irregularidades en los bordes de la nube de puntos.

3.2.2. Registro fino (ICP)

Considerando los resultados obtenidos de la primera alineación, es necesario realizar un registro fino entre ambas nubes de puntos para asegurar que el plano de simetría se encuentre en el centro del rostro. Este registro es considerado como un problema de registro de forma, por tal motivo se emplea el algoritmo ICP. El algoritmo ICP fue implementado como un algoritmo de fuerza bruta, esto indica que se emplean todos los puntos de la nube de puntos facial y su reflejo para buscar sus puntos más cercanos y realizar la rotación y traslación correspondiente.

La convergencia del algoritmo ICP se obtuvo realizando 50 iteraciones del mismo, este número de iteraciones fue definido a través de pruebas realizadas para obtener el registro de forma de la nube de puntos del rostro de un maniquí y su reflejo, este rostro presentaba una simetría debido a que es producido en serie. Los resultados de las pruebas mostraron que el error cuadrático medio (ECM) del algoritmo ICP tiene un comportamiento de un decremento exponencial, el cual después de la iteración 50 mantiene un comportamiento lineal que no presenta cambios bruscos y que indica que ambas superficies se encuentran alineadas.

El resultado del registro de forma a través del algoritmo ICP, son las dos nubes superpuestas, de las cuales se consideraron los puntos medios de ambas para la obtención del plano de simetría (Π_s).

3.2.3. Cálculo de distancias entre puntos más cercanos (Kd-tree)

Al obtener el plano de simetría del registro de forma de la nube de puntos facial y su reflejo, el cálculo de la asimetría facial se obtiene de las distancias euclidianas entre los puntos más cercanos de la nube de puntos facial y su reflejo. Los puntos más cercanos son obtenidos a través del algoritmo Kd-tree [55], en donde para cada punto de la nube de puntos facial se determina el punto más cercano en la nube de puntos reflejo. Como resultado las

distancias entre los puntos de la nube de puntos facial y su reflejo se reducen al mínimo. La distancia Euclidiana fue calculada por medio de:

$$d(q_i, q_{mi}) = \sqrt{(x_i - x_{mi})^2 + (y_i - y_{mi})^2 + (z_i - z_{mi})^2} \quad (16)$$

Donde $q_i(x, y, z)$ son los puntos de la imagen facial 3D original y $q_{mi}(x, y, z)$ son los puntos de la cara reflejada.

De los resultados de las distancias euclidianas calculadas entre los puntos más cercanos de la imagen facial 3D y su reflejo, se obtuvieron las distancias medias absolutas. Entre mayor asimetría presente el rostro mayor será la distancia media absoluta (DMA), por lo tanto, el DMA fue definido como el índice de asimetría facial [18].

En el presente capítulo se ha presentado la descripción teórica de la metodología para la determinación de la asimetría facial de una nube de puntos facial adquirida a través de una plataforma que usa un sensor RGB-D de bajo costo. En el capítulo 4 se describen los resultados obtenidos durante el desarrollo de la metodología.

Capítulo 4

PRUEBAS Y RESULTADOS

En el presente capítulo se describen los resultados obtenidos durante las pruebas realizadas en la aplicación de la metodología para determinar la asimetría facial en una nube de puntos proveniente de una imagen RGB-D. Los resultados mostrados corresponden a las dos plataformas (Kinect y Sense 3D), pero en el caso de la plataforma Kinect se presentan los resultados de dos sujetos en la etapa de la adquisición de la imagen 3D y los de un sujeto en la determinación de la asimetría facial. En el Apéndice B se muestran los resultados del resto de los sujetos.

4.1. Generación de una nube de puntos densa

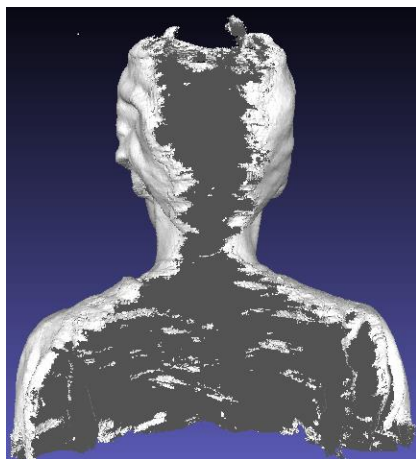
Los resultados obtenidos en el desarrollo de la primera etapa de la metodología, cuyo objetivo es obtener una nube de puntos facial densa se muestran en las subsecciones siguientes. También se realiza una discusión de las nubes de puntos resultantes de las dos plataformas utilizadas para la adquisición de las imágenes iniciales, que será empleada en la segunda etapa de la metodología.

4.1.1. Configuración plataforma de adquisición de la imagen 3D

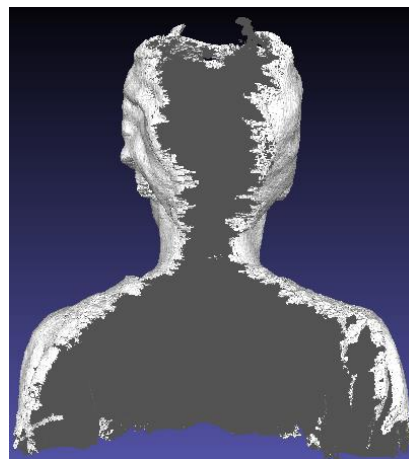
Plataforma Kinect

El sujeto fue sentado en la silla giratoria y se le dio una capacitación para realizar las rotaciones indicadas en la metodología, durante esta se realizaron tres ensayos de práctica de los movimientos antes de comenzar el escaneo del rostro.

Al finalizar el escaneo el software Skanect © realizó una reconstrucción automática de la imagen 3D. Esta imagen contenía ruido y fue eliminado con el uso de la opción de “remove partes” del software a un porcentaje de 10%, con esto se logró eliminar el ruido sin afectar los datos faciales. En la Figura 4.1.A se ilustra la parte de atrás de la imagen 3D inicial donde se puede visualizar la existencia de ruido y en la Figura 4.1.B ilustra la parte de atrás de la imagen 3D resultante del proceso de eliminación del ruido. La imagen 3D final fue almacenada con un nombre de archivo que contenía datos como el número de sujeto, la fecha y el tipo de escaneo.



A)

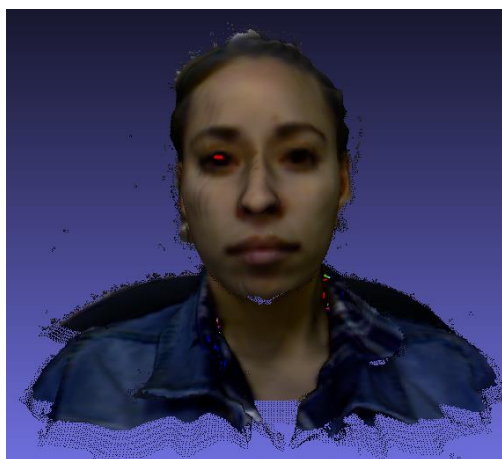


B)

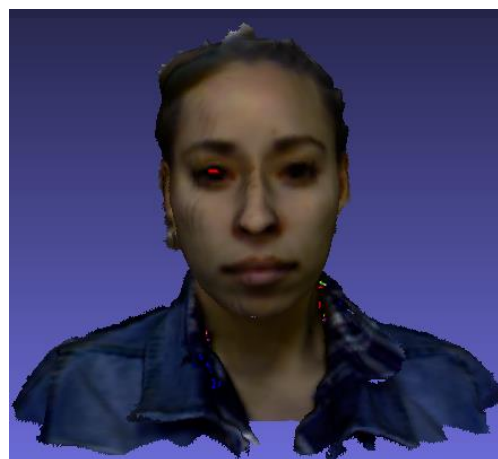
Figura 4.1. Imágenes 3D iniciales plataforma Kinect, A) imagen con ruido y B) imagen sin ruido.

Plataforma Sense 3D

El sujeto fue sentado en la silla y el sensor fue colocado frente a él, después se le dio una indicación verbal que a la cuenta de tres comenzaría el escaneo del rostro que mantuviera la cabeza sin movimiento, no parpadeara y mantuviera la expresión. Después de finalizar el escaneo del rostro del sujeto, se realizó la reconstrucción automática de la imagen 3D en el software Sculpt © y fue almacenada con un nombre de archivo que indicara el número del sujeto la fecha de almacenamiento y el tipo de movimiento realizado. El movimiento manual del escaneo provocó la adquisición de ruido, este ruido fue eliminado utilizando la opción eliminar vértices no referenciados del software de procesamiento de imágenes 3D MeshLab versión 2016.12., esto debido a que el software Sculpt no proporciona herramientas para realizar esta acción, la Figura 4.2.A y 4.2.B ilustra la imagen 3D inicial con ruido de la plataforma Sense 3D y la imagen 3D sin ruido.



A)



B)

Figura 4.2. Imágenes 3D iniciales plataforma Sense 3D, A) imagen con ruido y B) imagen sin ruido.

4.1.2. Adquisición de imágenes 3D

Plataforma Kinect

Se realizó la adquisición de las imágenes 3D de dos sujetos de género masculino y tres sujetos de género femenino con la plataforma Kinect, estos fueron capturados con los cuatro tipos de calidad que ofrece el software Skanect © (baja, mediana, alta y muy alta). Las imágenes fueron reconstruidas a través de la fusión de varias imágenes de profundidad capturadas durante el tiempo de adquisición por el software. En las Figuras 4.3 y 4.4 se ilustra el rostro en reposo de uno de los sujetos masculinos y uno de los sujetos femeninos con los distintos tipos de calidad.

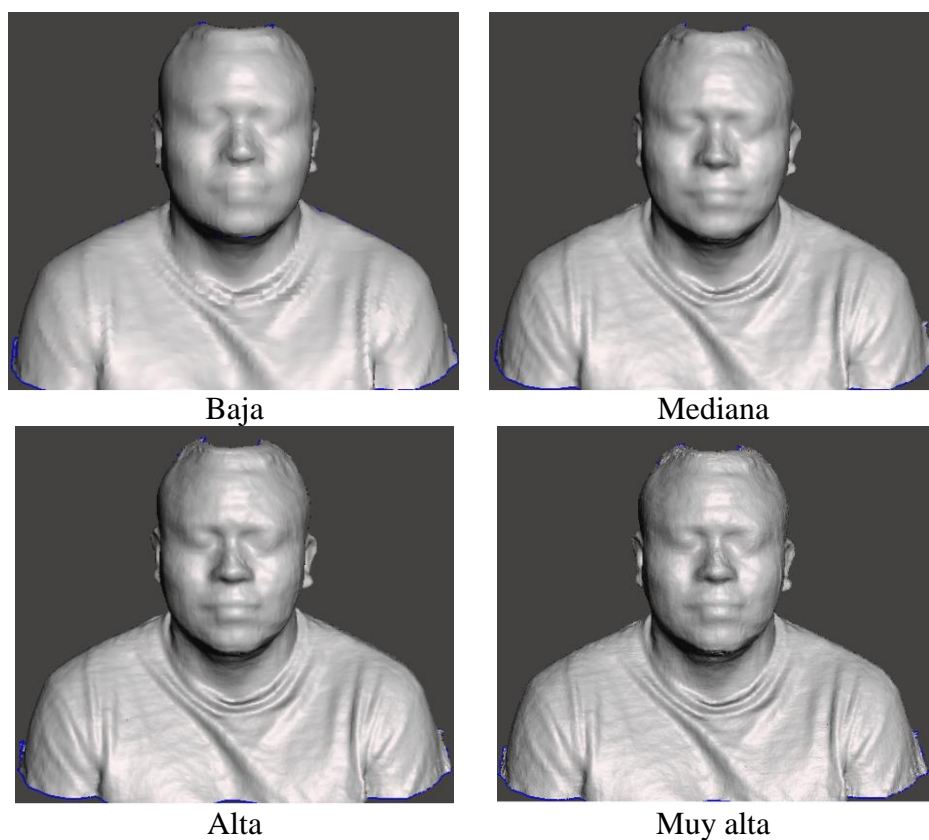


Figura 4.3. Imágenes 3D adquiridas con los cuatro tipos de calidad del software Skanect ©, del sujeto 1.

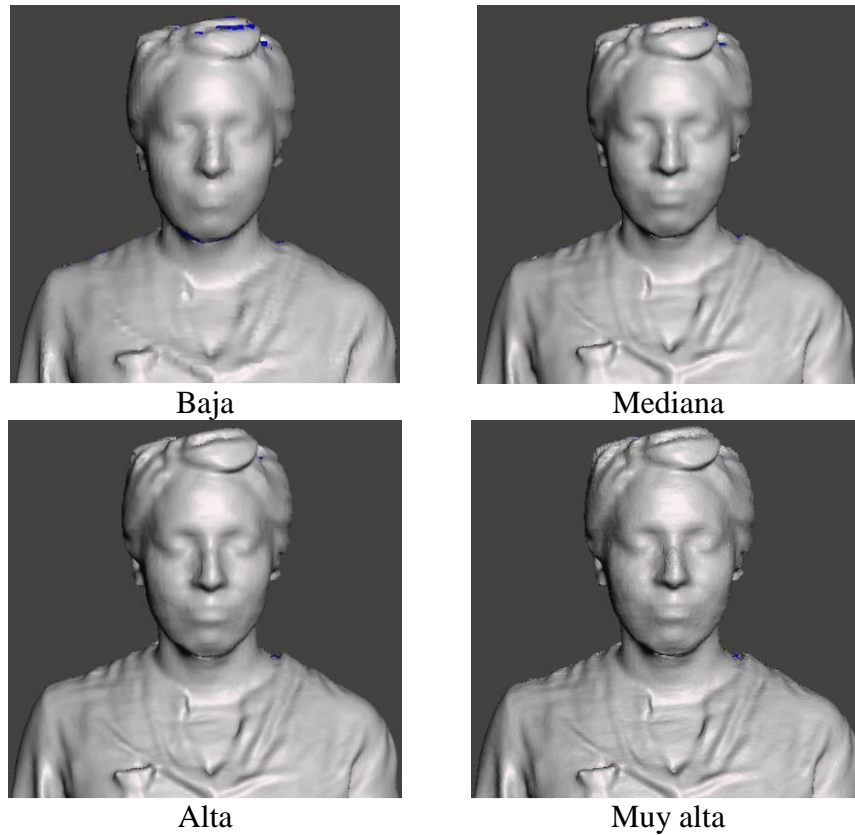


Figura 4.4. Imágenes 3D adquiridas con los cuatro tipos de calidad del software Skanect ©, del sujeto 4.

Los tipos de calidad del software Skanect © que representan la resolución con la que se adquiere la imagen 3D, dependen de las características del hardware de la computadora con la cual se realiza la adquisición, esto debido a que una calidad muy alta en la imagen 3D requiere de una tarjeta de gráficos (Nvidia GTX 1080 o Titan) y en caso de no contar con esta el software envía un error de adquisición de datos, esta situación no se presenta en los tipos de calidad baja, mediana y alta. Con las características del hardware de la computadora utilizada en el presente trabajo, las imágenes 3D adquiridas con cada uno de los tipos de calidad contenían diferencias en los datos faciales, estas se muestran en la Tabla 4.1.

Tabla 4.1. Características de los cuatro tipos de calidad de las imágenes 3D plataforma Kinect.

Calidad	Tarjeta gráficos	Tiempo proces. (seg)	Tamaño archivo (KB)	Fps	Rasgos faciales
					Ojos, Boca y Nariz
Baja	×	42	1,520	30	Suavizado o sin presencia
Mediana	×	49	6,405	28-30	Definidos
Alta	×	95	27,828	26-30	Definidos
Muy alta	✓	1,335	62,572	8-10	Saturado

✓ si requiere × no requiere

Las imágenes 3D de baja calidad contienen rasgos faciales suavizados y en algunos casos estos no se distinguen como sucedió con la boca de algunos sujetos de género femenino. La imagen de mediana calidad contiene rasgos con más detalles en comparación con la imagen de baja calidad, sin embargo, no se observan diferencias gráficas considerables entre la imagen de mediana calidad y la imagen de calidad alta.

Durante el proceso el rendimiento de la computadora se redujo de 30 fps a 8 fps, teniendo como consecuencia que la rotación del sujeto durante el proceso de adquisición de la imagen 3D se realizara con movimientos lentos, esto debido a que fue necesario incrementar de 3 seg a 6 seg el cambio de posición provocando que el número de rotaciones se redujera a la mitad en comparación con los otros tres tipos de calidad. Como resultado se obtuvieron imágenes 3D con una sobresaturación que en ocasiones provocaron deformaciones en la superficie.

En las Figuras 4.5 y 4.6 se ilustran las imágenes 3D de alta calidad de uno de los sujetos masculinos y uno de los sujetos femeninos con el rostro en reposo y las tres asimetrías que se realizaron en el rostro. En los incisos del B) al D) de las Figuras 4.5 y 4.6, se puede observar cómo se va incrementando la deformación en la mejilla del sujeto. Las imágenes del sujeto masculino que se ilustran en la Figura 4.5, muestran que la primera asimetría no

genera un cambio notable en la mejilla derecha en comparación con la del rostro en reposo, esto debido a su complexión. En el caso contrario, el rostro del sujeto femenino ilustrado en la Figura 4.6, muestra que la primera asimetría genera una diferencia en el tamaño de la mejilla derecha ilustrada en la Figura 4.6.B, en comparación con la mejilla del rostro en reposo Figura 4.6.A.

De las imágenes 3D adquiridas con cada uno de los tipos de calidad, se extraerá su región facial obteniendo como resultado una nube de puntos, con la cual se podrá visualizar las diferencias que existen entre la densidad de sus puntos.

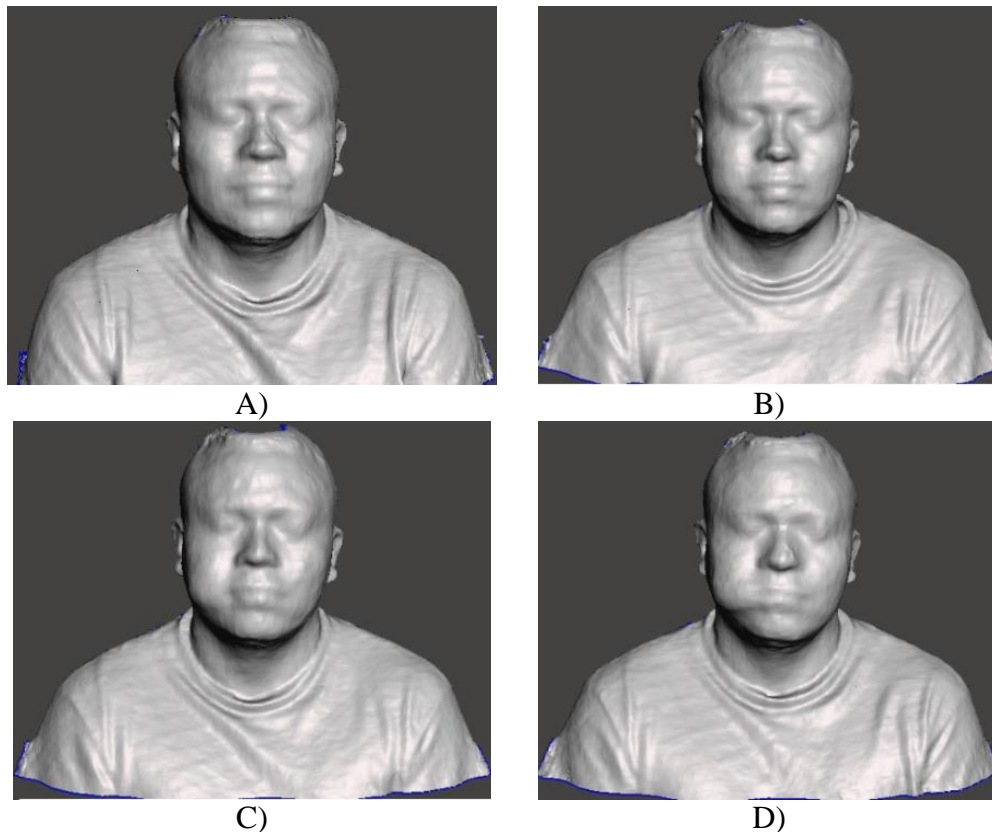


Figura 4 5. Imágenes faciales 3D plataforma Kinect del sujeto 1, A) en reposo, B) primera asimetría en la mejilla derecha, C) segunda asimetría y D) rostro con la tercera asimetría.

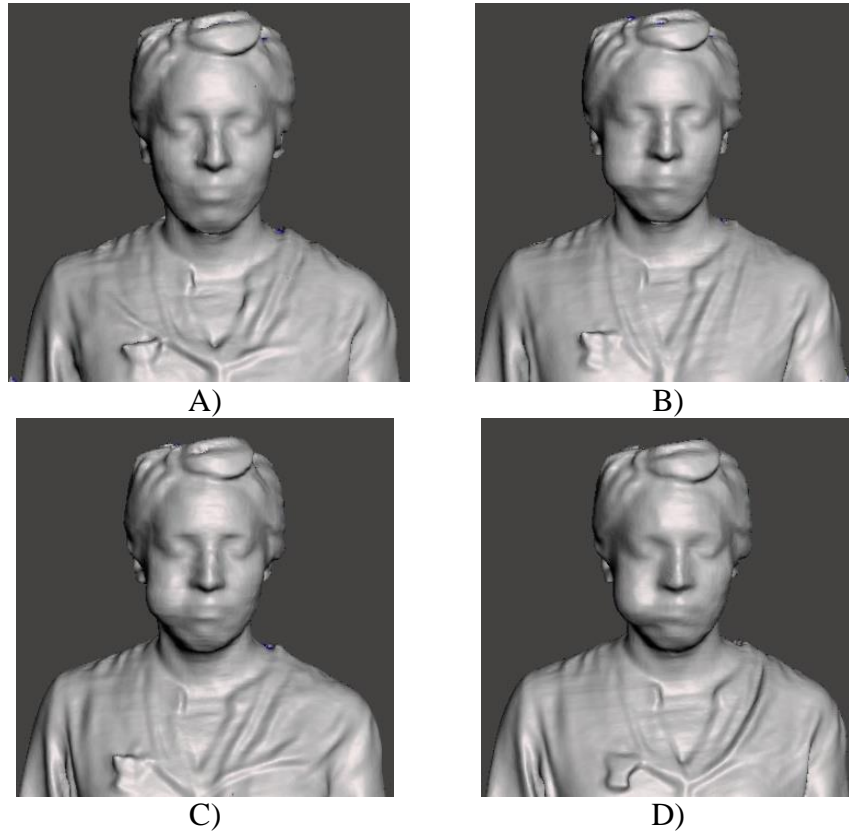


Figura 4.6. Imágenes faciales 3D plataforma Kinect del sujeto 4, A) en reposo, B) primera asimetría en la mejilla derecha, C) segunda asimetría y D) rostro con la tercera asimetría.

Plataforma Sense 3D

Con la plataforma Sense 3D se realizó la adquisición de las imágenes de dos sujetos femeninos y un sujeto masculino con el rostro en reposo y realizando una sonrisa con la boca cerrada. Estas imágenes se ilustran en las Figuras 4.7-4.9, donde se puede observar que las imágenes contienen información en las regiones de ojos, boca y nariz. El inciso A) de las imágenes 4.7-4.9 ilustra el rostro en reposo y el inciso B) el rostro del sujeto realizando una sonrisa con la boca cerrada.

Es importante resaltar que durante el escaneo del rostro con la plataforma Sense 3D, todos los sujetos experimentaron irritación y lagrimeo en los ojos, debido al tiempo de exposición de estos a la luz infrarrojo del sensor, debido a esta situación se optó por no realizar más escaneos de rostros con esta plataforma.

El software Sculpt © del sensor Sense 3D Cubify v1 ©, permite la reconstrucción de una imagen 3D a través del registro de las imágenes de profundidad adquiridas con el sensor. Sus funciones de procesamiento de imágenes 3D es limitado, debido a que solo reconstruye la imagen 3D, sus parámetros de calidad de la imagen están condicionados a los definidos por el fabricante y como se puede observar en la Figura 4.7.B del lado derecho del rostro existe una rugosidad también presente en la Figura 4.9.A en la región de la nariz.

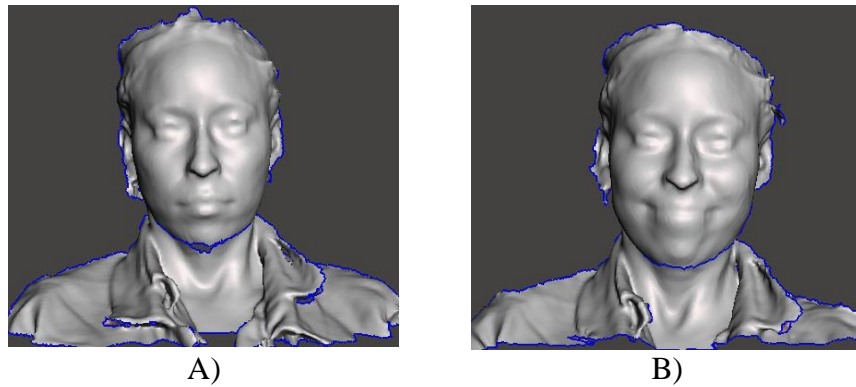


Figura 4.7. Imágenes 3D adquiridas con la plataforma Sense 3D del sujeto1.

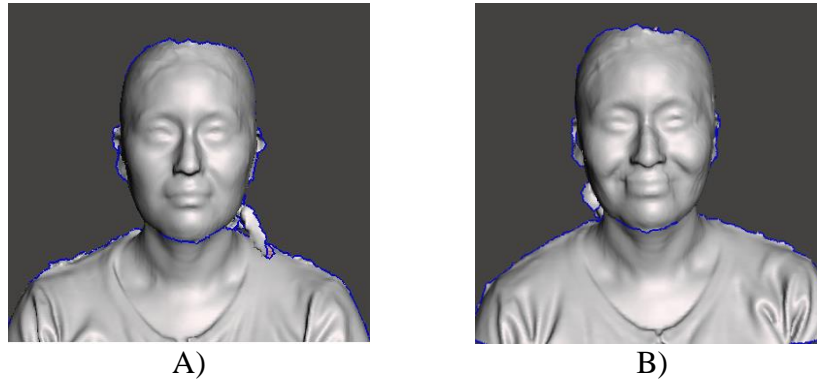


Figura 4.8. Imágenes 3D adquiridas con la plataforma Sense 3D del sujeto2.

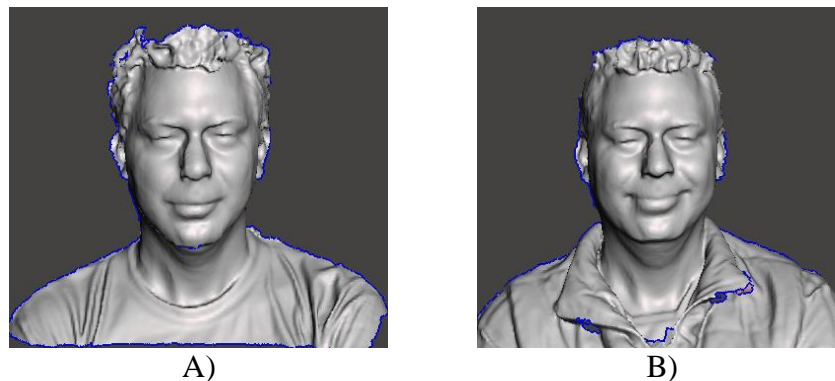


Figura 4.9. Imágenes 3D adquiridas con la plataforma Sense 3D del sujeto3.

4.1.3. Extracción de la región facial

Se realizó la medición de la longitud horizontal y vertical del rostro de cada sujeto adquirido con ambas plataformas, con el software Meshmixer © v3.5.474.1 [56], colocando una línea roja, como la que se ilustra en la Figura 4.10. La línea vertical, Figura 4.10.A, parte del mentón y llega hasta el crecimiento del cabello y la línea horizontal, Figura 4.10.B, se coloca en el centro del rostro abarcando desde la mejilla derecha hasta la mejilla izquierda del sujeto. El software da como resultado la longitud correspondiente en milímetros.

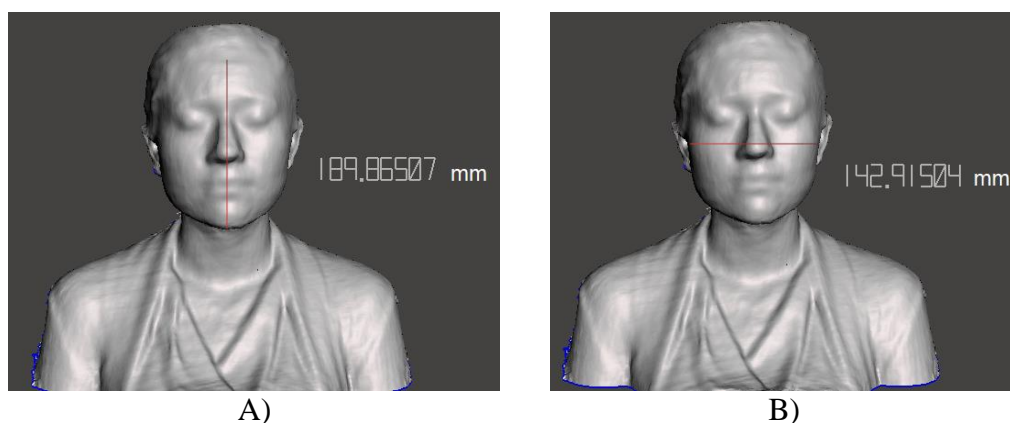


Figura 4.10. A) Medición vertical del rostro, B) Medición horizontal del rostro.

Con los valores resultantes de las mediciones de la longitud vertical y horizontal se determinan los valores de las longitudes de los semiejes del elipsoide, asignando el valor de la longitud vertical al semieje correspondiente al eje y y el valor de la longitud horizontal al semieje del eje x , para la longitud del semieje que corresponde al eje z se utilizó un valor constante de 50 mm. Este valor fue determinado de la medición de la longitud del rostro en el eje z , de las imágenes de ambas plataformas. El elipsoide utilizado fue con centro fuera del origen tomando como centro las coordenadas obtenidas de la punta de la nariz del rostro. Para obtener la región facial se extrajeron todos los puntos contenidos dentro del elipsoide, con esto se logró eliminar los elementos no necesarios como el cuello, cabello y las orejas. Este proceso fue ejecutado en las imágenes de ambas plataformas

Plataforma Kinect

Las nubes de puntos faciales extraídas de las imágenes 3D adquiridas con los cuatro tipos de calidad, del rostro en reposo del sujeto 1, son ilustradas en la Figura 4.11 en donde se puede visualizar gráficamente la diferencia que existe en la densidad de puntos. El número de puntos promedio obtenidos de las nubes de puntos faciales de los cinco sujetos con el rostro en reposo y con las tres asimetrías se muestran en la Tabla 4.2.

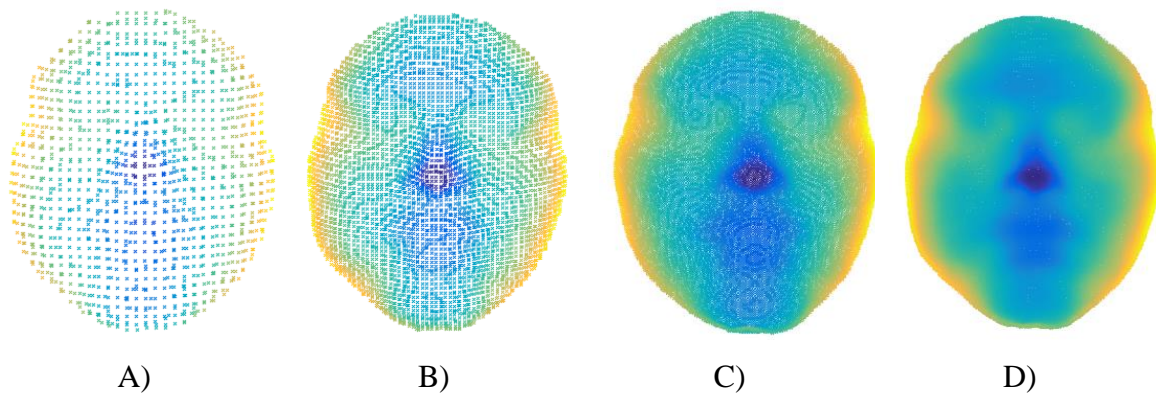


Figura 4.11. Nubes de puntos del rostro en reposo del sujeto 1 de la plataforma Kinect, A) Baja calidad, B) Mediana calidad, C) Alta calidad y D) Muy alta calidad.

Tabla 4.2. Número de puntos de las regiones faciales extraídas de las imágenes 3D de la plataforma Kinect adquiridas con los cuatro tipos de calidad del software Skanect ©.

Región facial	Calidad			
	Baja	Mediana	Alta	Muy alta
Sujeto 1	1,482	5,904	23,466	52,767
Sujeto 2	1,457	5,694	22,905	51,299
Sujeto 3	1,283	5,118	20,338	45,353
Sujeto 4	1,267	5,094	20,284	45,586
Sujeto 5	1,297	5,159	20,633	46,294

Las imágenes 3D de baja calidad mostraban rasgos faciales suavizados o que en algunos casos no se percibían, en la Tabla 4.2. se muestra que la nube de puntos facial extraída de esta imagen tiene una densidad que se encuentra en un rango de 1,200 a 1,400 puntos y en la nube de puntos facial ilustrada en el inciso A) de la Figura 4.11, se puede observar que sus puntos se encuentran más dispersos en comparación con las otras nubes de puntos.

Las imágenes 3D de mediana calidad no presentaban diferencias gráficas importantes en los rasgos faciales en comparación con las imágenes 3D de alta calidad. Sin embargo, al extraer sus nubes de puntos de la región facial, las nubes de las imágenes 3D de calidad mediana tienen un promedio de 5,300 puntos, un número menor en comparación con las nubes de alta calidad que contienen un promedio de 21,500 puntos. Considerando las características de los rasgos faciales que contiene la imagen 3D de mediana calidad, su nube de puntos de la región facial puede ser utilizada como centroides en la red RBF para el incremento en su densidad en la siguiente sección. En el caso de las nubes de puntos faciales que provienen de las imágenes 3D de muy alta calidad, su promedio de puntos fue de 48,200 y contienen la densidad más alta en comparación con los otros tres tipos de calidad, esto se puede observar en la nube de puntos ilustrada en el inciso D) de la Figura 4.11.

Considerando las características gráficas y la densidad de puntos obtenidas de las imágenes 3D de los cuatro tipos de calidad que ofrece la plataforma, se seleccionaron las nubes de puntos faciales extraídas de las imágenes 3D de mediana y alta calidad para determinar su asimetría facial. Las imágenes 3D de baja densidad fueron descartadas debido a los datos suavizados que estas presentaron. En el caso de las imágenes de muy alta calidad quedaron descartadas por la disminución del rendimiento en la computadora durante la adquisición, lo cual pudo provocar errores y sobre todo por la sobresaturación de puntos que provocó deformación en algunas zonas de la imagen 3D.

En la Figura 4.12 se ilustran las cuatro nubes de puntos faciales extraídas de las imágenes 3D en reposo y con las tres asimetrías del sujeto 1 que fueron adquiridas con una alta calidad. En los incisos del B) al D) se ilustra la deformación en la mejilla derecha de la nube de puntos provocada por la asimetría generada en el rostro del sujeto, las cuales serán determinadas en la segunda etapa de la metodología.

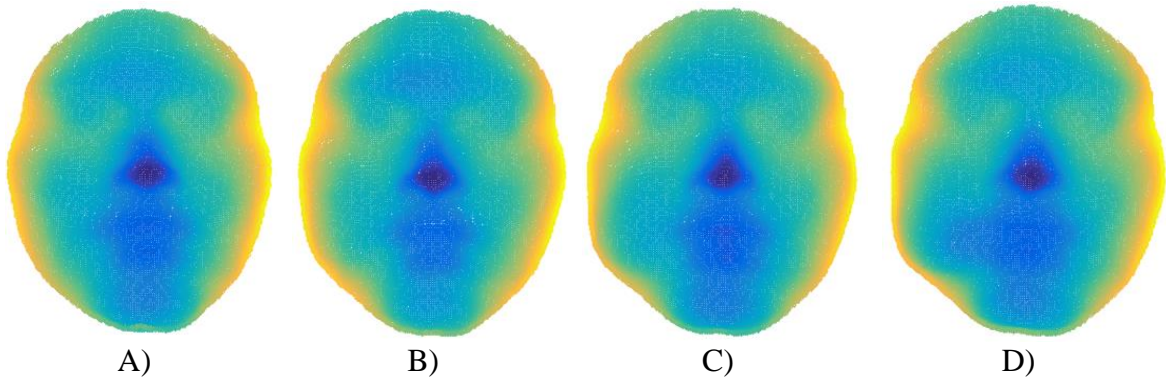


Figura 4.12. Nubes de puntos faciales de alta calidad del sujeto 1 de la plataforma Kinect, A) Rostro en reposo, B) Primer asimetría, C) Segunda asimetría y D) Tercer asimetría.

Plataforma Sense 3D

Las nubes de puntos faciales de los rostros en reposo de los tres sujetos extraídas de las imágenes 3D de la plataforma Sense 3D son ilustradas en la Figura 4.13, estas nubes de puntos contienen una densidad en un rango de 6,300 a 7,400 puntos. En la Figura 4.14, se ilustran las nubes de puntos faciales de los tres sujetos, que fueron extraídas de las imágenes 3D de los rostros de la sonrisa con los labios cerrados, donde se puede observar que las nubes de puntos además de presentar detalles en las zonas de ojos, boca y nariz también contienen pliegues de la piel debajo de los ojos y en las mejillas. Algunos bordes de las nubes de puntos faciales que se encuentran debajo del mentón, presentan irregularidades que pueden ser rellenadas a través de la interpolación RBF que se describe en la siguiente sección.

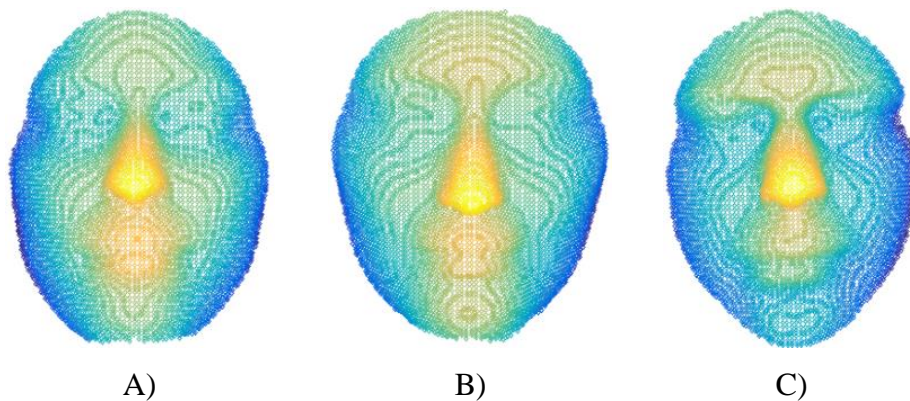


Figura 4.13. Nubes de puntos faciales en reposo de la plataforma Sense 3D, A) Sujeto 1, B) Sujeto 2 y C) Sujeto 3.

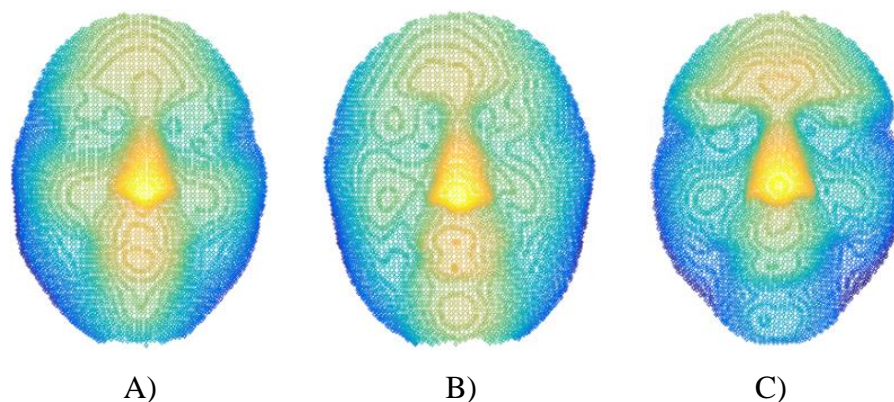


Figura 4.14. Nubes de puntos faciales de la plataforma Sense 3D, de los rostros con la sonrisa con los labios cerrados A) Sujeto 1, B) Sujeto 2 y C) Sujeto 3.

Después de haber realizado la extracción de la región facial de las imágenes 3D de ambas plataformas, se procede a realizar un análisis de los resultados de cada una para determinar si cumplen con los requerimientos del trabajo de investigación, estos se muestran en la Tabla 4.3.

Tabla 4.3. Plataformas de adquisición de imágenes.

	Plataforma Kinect	Plataforma Sense 3D
Características de operación	Opera en una dimensión de 3 m por 3m. Portable.	Opera en una dimensión de 3 m por 3m. Portable.
Posición del sensor	Fijo.	Trayectoria manual.
Imágenes 3D	Contienen características en las regiones de ojos, boca y nariz.	Contienen características en las regiones de ojos, boca y nariz.
Software	Adquisición, reconstrucción y procesamiento de la imagen 3D. Permite la adquisición de cuatro calidades de imagen (baja, mediana, alta y muy alta).	Adquisición y reconstrucción de la imagen 3D. Requiere de otras herramientas para el procesamiento de la imagen.
Efectos nocivos	Ninguno.	Irritación y lagrimeo en los ojos.

Considerando los puntos mencionados en la Tabla 4.3, se puede concluir que la plataforma Sense 3D presenta como limitante los efectos nocivos provocados en los ojos de los sujetos, lo que limitó su uso para continuar con la adquisición de las imágenes 3D, por tal motivo esta plataforma queda descartada para el presente trabajo de investigación. Con las tres nubes de puntos faciales resultantes de esta plataforma se realizó el procesamiento para determinar su asimetría facial y los resultados se encuentran en el Apéndice C.

Con base en los resultados obtenidos de la plataforma Kinect, se concluye que esta cumple con los requerimientos de operación para la adquisición de las imágenes 3D y por lo tanto se realiza la selección de las nubes de puntos faciales resultantes de esta plataforma para continuar con el desarrollo de la metodología para determinar la asimetría facial.

4.1.4. Interpolación RBF

Como se indicó en la subsección anterior la nube de puntos facial de la imagen 3D de muy alta calidad tiene una densidad de 48,200 puntos en promedio, pero su adquisición requiere de un equipo de cómputo robusto, además de presentar una sobresaturación de puntos que provoca deformaciones en la superficie. Debido a esta situación, se procedió a incrementar la densidad de la nube de puntos facial de mediana calidad de 4,000 a 80,000 puntos a través de la interpolación RBF, para poder evaluar una nube de puntos con una densidad mayor a la proveniente de las imágenes de calidad alta. Este incremento de puntos se basó en el patrón de incremento en los tipos de calidad manejados en el software Skanect ©. La selección de la nube de puntos facial de mediana calidad para la interpolación RBF, está basada en las características de sus rasgos faciales que no presentan diferencias gráficas en comparación con las de alta calidad. Además de que el número de puntos extraídos de la región facial de la imagen de mediana calidad, es menor a los puntos extraídos de las imágenes de alta calidad, por tal motivo los puntos de esta nube fueron utilizados como centroides en red la RBF.

En la Figura 4.15 se ilustra un comparativo gráfico de las densidades de las nubes de puntos del rostro en reposo del sujeto 1, provenientes de las imágenes de mediana y alta calidad y la nube de puntos resultante de la interpolación RBF.

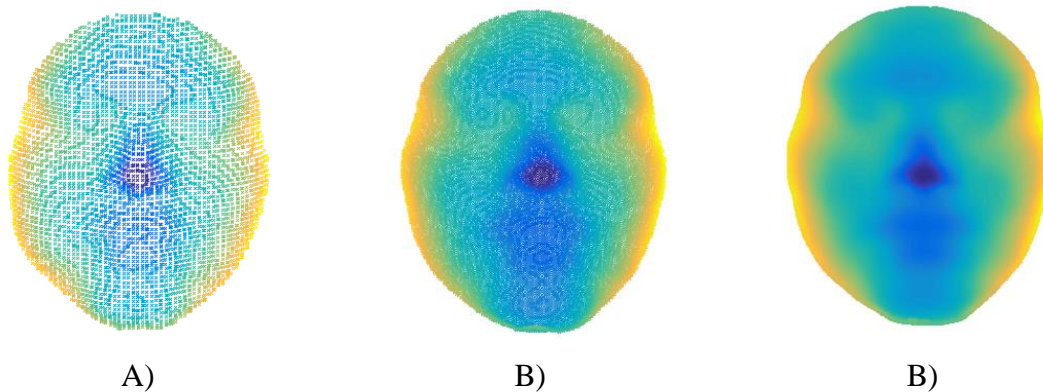


Figura 4.15. Nubes de puntos faciales del rostro en reposo del sujeto 1, A) mediana calidad, B) alta calidad y C) interpolación RBF.

En la Figura 4.15, se puede observar que la nube de puntos resultante de la interpolación RBF presentan una densidad mayor en comparación a las nubes de puntos adquiridas con los tipos de calidad alta y mediana que ofrece la plataforma. Además del incremento en la densidad de puntos la interpolación RBF permitió tener una distribución uniforme de los puntos en la nube, esto permitirá reducir las distancias entre los puntos de la nube de puntos facial y la nube de puntos de su reflejo.

Las nubes de puntos faciales interpoladas serán empleadas para determinar su asimetría, para poder analizar el impacto que tiene el incremento de puntos en esta y serán comparadas con la determinación de la asimetría de las nubes de puntos faciales de los tipos de calidad mediana y alta.

4.2. Determinación de la asimetría facial

Los resultados obtenidos de la determinación de la asimetría facial de las nubes de puntos resultantes de la primera etapa de la metodología se describen en las subsecciones 4.2.1 a la 4.2.3.

4.2.1. Transformación espejo (PCA)

Las componentes principales de la nube de puntos facial del rostro en reposo del sujeto 1 se ilustra en la Figura 4.16, donde se puede visualizar los tres vectores propios de las componentes que representan al nuevo sistema de coordenadas, al cual será transformada la nube de puntos facial.

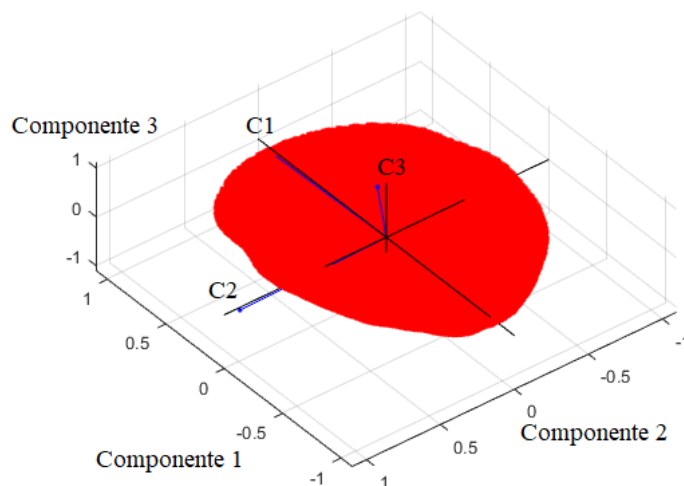


Figura 4.16. Componentes principales de las nubes de puntos facial en reposo del sujeto 1.

Las Figuras 4.17-4.20. ilustran la transformación de la nube de puntos facial al nuevo sistema de coordenadas, su reflexión y la primera alineación entre estas nubes de puntos, del rostro en reposo y de las tres asimetrías del sujeto 1.

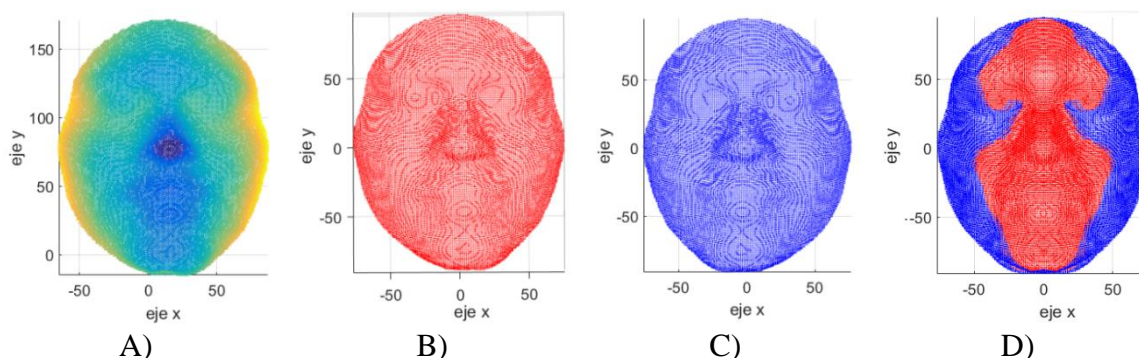


Figura 4.17. Transformación espejo de la nube de puntos facial en reposo del sujeto 1, A) Nube de puntos facial, B) Nube de puntos facial transformada al nuevo sistema de coordenadas, C) Nube de puntos reflejo y D) Primera alineación entre la nube de puntos facial y su nube de puntos reflejo.

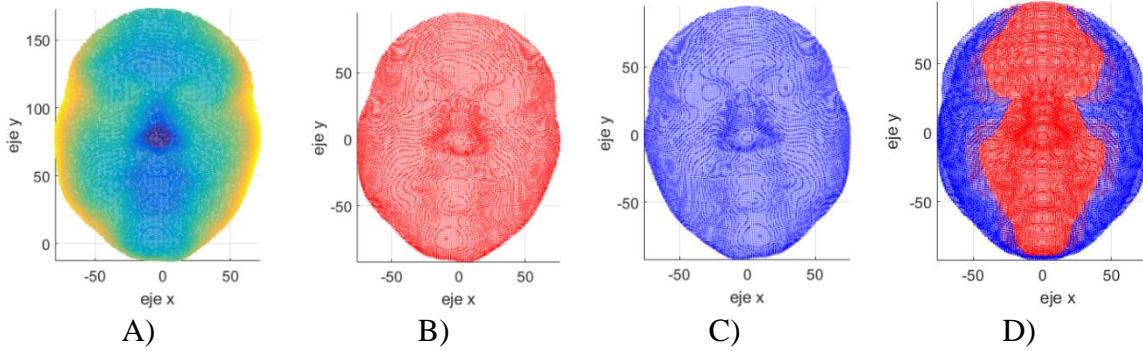


Figura 4.18. Transformación espejo de la nube de puntos facial de la primera asimetría del sujeto 1, A) Nube de puntos facial, B) Nube de puntos facial transformada al nuevo sistema de coordenadas, C) Nube de puntos reflejo y D) Primera alineación entre la nube de puntos facial y su nube de puntos reflejo.

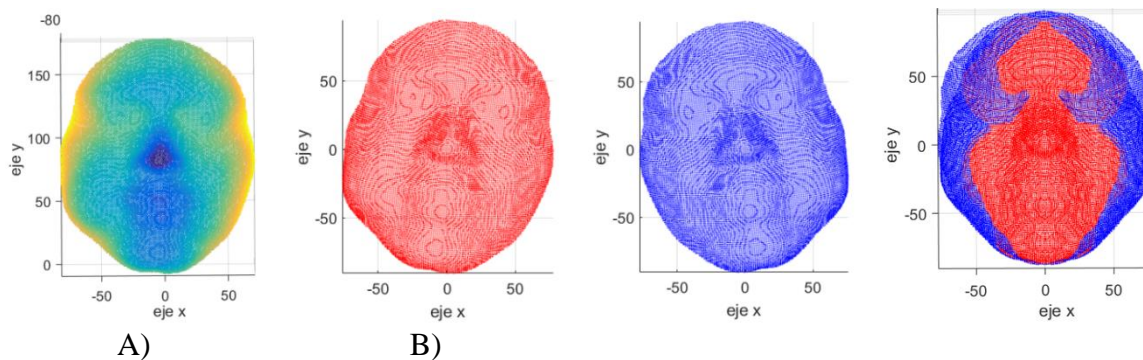


Figura 4.19. Transformación espejo de la nube de puntos facial de la segunda asimetría del sujeto 1, A) Nube de puntos facial, B) Nube de puntos facial transformada al nuevo sistema de coordenadas, C) Nube de puntos reflejo y D) Primera alineación entre la nube de puntos facial y su nube de puntos reflejo.

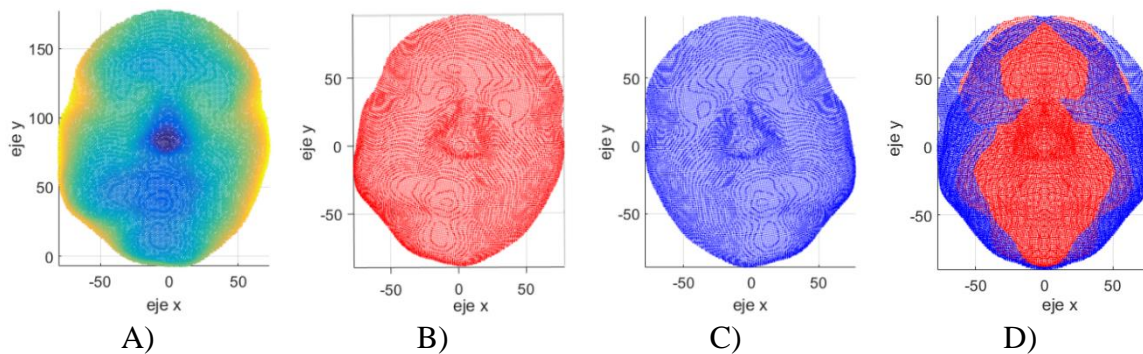


Figura 4.20. Transformación espejo de la nube de puntos facial de la tercera asimetría del sujeto 1, A) Nube de puntos facial, B) Nube de puntos facial transformada al nuevo sistema de coordenadas, C) Nube de puntos reflejo y D) Primera alineación entre la nube de puntos facial y su nube de puntos reflejo.

Como se puede observar en el inciso D) de la Figura 4.17 que corresponde al rostro en reposo del sujeto 1, la alineación entre la nube de puntos facial y la nube de puntos reflejo no muestra una disparidad. Sin embargo, en los rostros que contienen las tres asimetrías las cuales son ilustradas en las Figuras 4.18-4.20, muestran una desalineación entre ambas nubes de puntos, que son provocadas por el incremento en el tamaño de la mejilla derecha. Debido a lo anterior para lograr una alineación entre las nubes de puntos que presenten asimetrías es necesario realizar un registro de forma a través del algoritmo ICP, el desarrollo y los resultados obtenidos de la aplicación del algoritmo se describen en la siguiente subsección.

4.2.2. Registro fino (ICP)

Las Figuras 4.21-4.24 ilustran los resultados del registro fino entre la nube de puntos facial y la nube de puntos reflejo del sujeto 1, en el inciso A) se ilustra la primera superposición de las nubes de puntos que fue obtenida de la transformación espejo, en esta se puede observar la mezcla de dos colores, el color rojo corresponde a la nube de puntos facial y el color azul al reflejo. El objetivo de esta primera alineación entre la nube de puntos es ayudar a la convergencia del algoritmo ICP.

En el inciso B) de las Figuras 4.21-4.24 se ilustran las nubes de puntos superpuestas resultantes del algoritmo ICP. La nube de puntos que representa el registro de forma del rostro en reposo del sujeto 1, que se ilustra en la Figura 4.21.B, es de color azul debido a que este no presenta diferencias relevantes en las formas de ambos lados del rostro. Esto no sucede en los rostros con asimetrías que son ilustrados en las Figuras 4.22.-4-24., en las cuales se pueden observar las diferencias en la zona de las mejillas en color rojo.

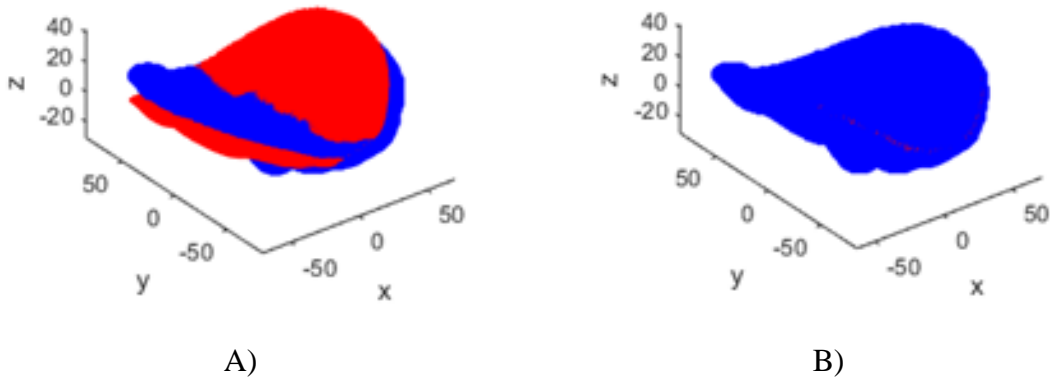


Figura 4.21. Alineación de la nube de puntos facial y su reflejo del rostro en reposo del sujeto 1, A) primera alineación resultado del PCA y B) segunda alineación resultado de ICP.

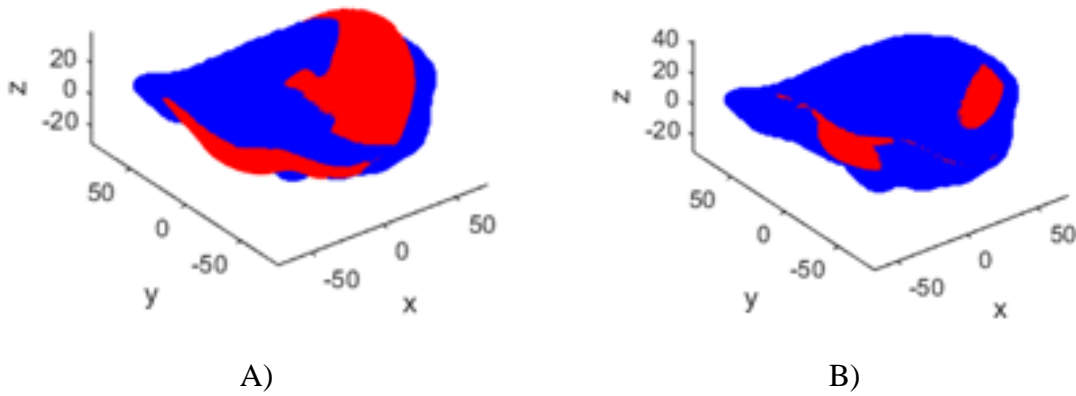


Figura 4.22. Alineación de la nube de puntos facial y su reflejo del rostro con la primera asimetría del sujeto 1, A) primera alineación resultado del PCA y B) segunda alineación resultado de ICP.

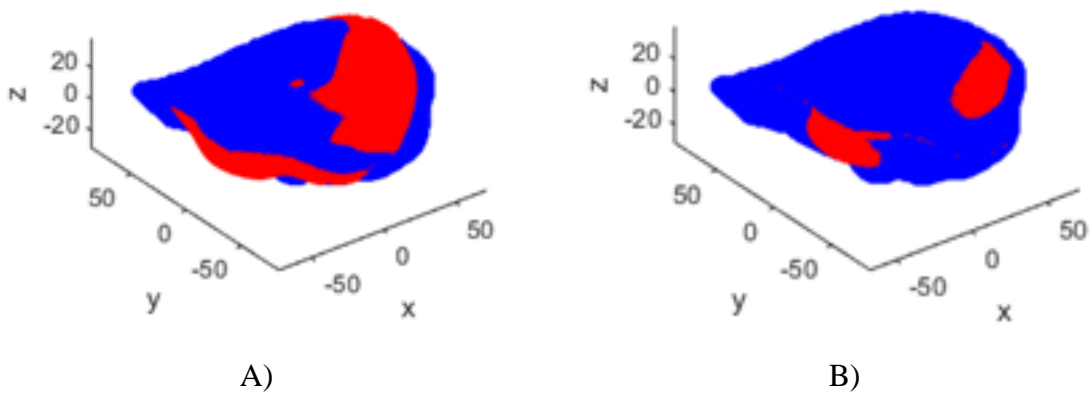


Figura 4.23. Alineación de la nube de puntos facial y su reflejo del rostro con la segunda asimetría del sujeto 1, A) primera alineación resultado del PCA y B) segunda alineación resultado de ICP.

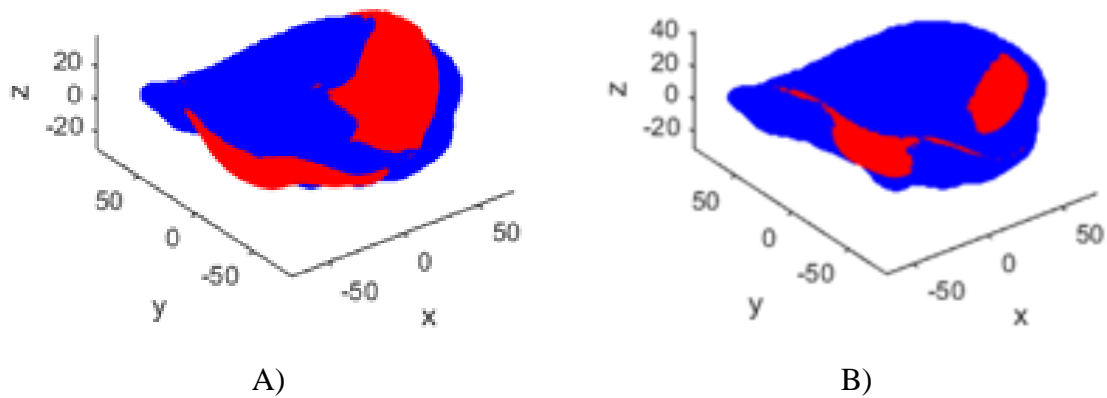


Figura 4.24. Alineación de la nube de puntos facial y su reflejo del rostro con la tercera asimetría del sujeto 1, A) primera alineación resultado del PCA y B) segunda alineación resultado de ICP.

En la Figura 4.25 se ilustra el error cuadrático medio (ECM) entre la nube de puntos facial y la nube de puntos reflejo, del rostro en reposo y las tres asimetrías del sujeto 1, en las 50 iteraciones de el algoritmo ICP. En la gráfica ilustrada en el inciso A de la Figura 4.25 se observa que las nubes de puntos que corresponden al rostro en reposo convergen en las primeras cinco iteraciones, esto debido a la primera alineación realizada con PCA y a que el rostro no presenta una asimetría tan marcada entre ambos lados. El comportamiento del ECM cambia con los rostros que presentan las asimetrías, cuyas gráficas son ilustradas en las Figuras 4.25.B-4.25.D, debido a que la convergencia de las nubes de puntos se realiza hasta la iteración 25, esto a pesar de que ambas nubes de puntos ya se encuentran en una primera alineación. Lo anterior es provocado por la deformación que existe en la mejilla derecha y que provoca que esta no coincida con la forma de la mejilla izquierda y por lo tanto no permite que ambos lados sean alineados como sucede en las nubes de puntos del rostro en reposo.

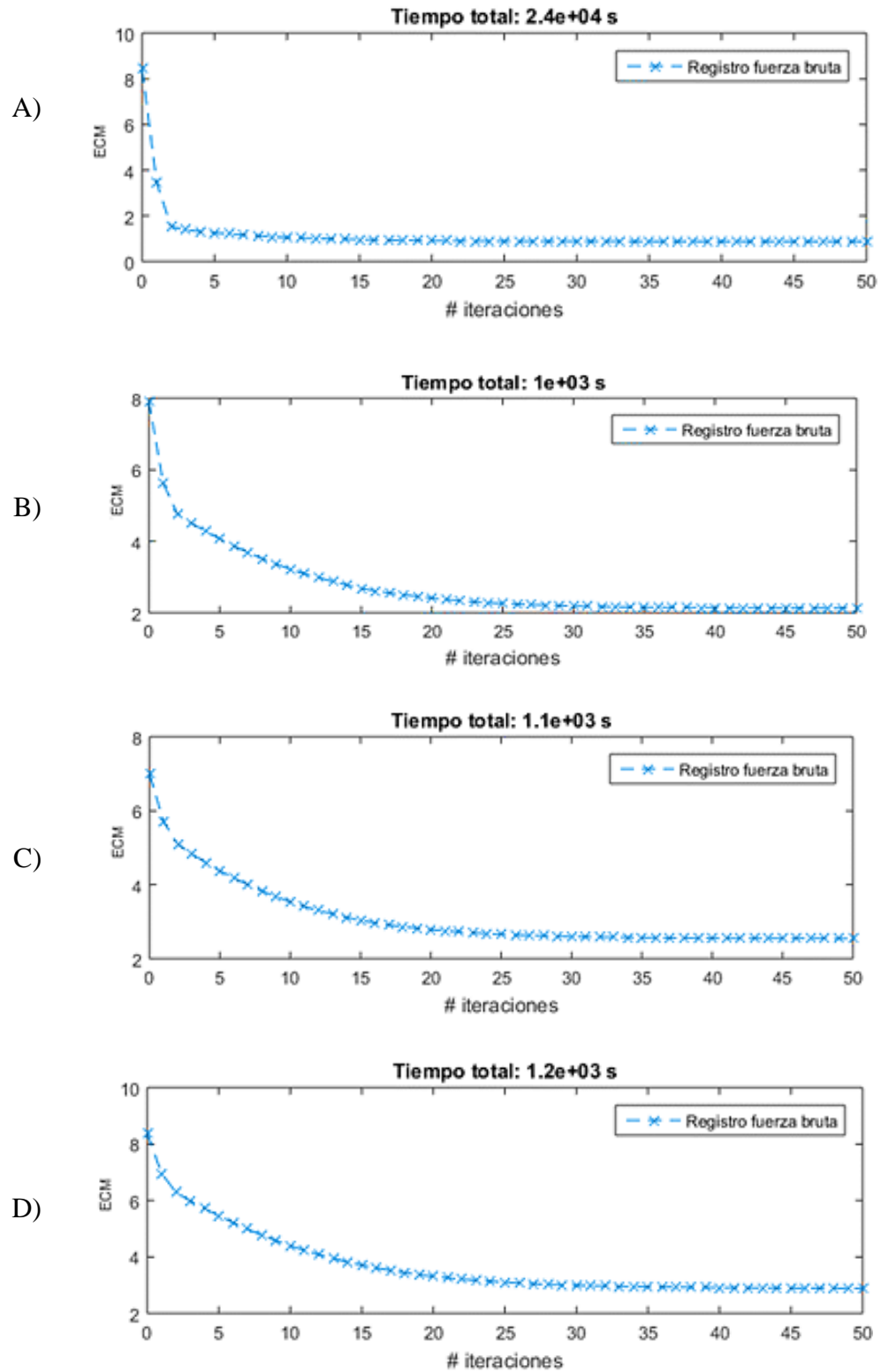


Figura 4.25. ECM (error cuadrático medio) de las iteraciones del algoritmo ICP en las nubes de puntos del sujeto 1, A) Rostro en reposo, B) Primera asimetría, C) Segunda asimetría y D) Tercera asimetría.

En la Figura 4.26 se ilustra, el rostro en reposo y con las tres asimetrías del sujeto 1, donde se pueden visualizar las nubes de puntos faciales en color rojo superpuesta sobre las nubes de puntos reflejo en color azul y los puntos medios a través de los cuales pasa el plano de simetría en color negro. La posición de la nube de puntos se va modificando como se observa en las Figuras 4.26.B-4.26.D, esto es provocado por la deformación que presenta la mejilla derecha del sujeto.

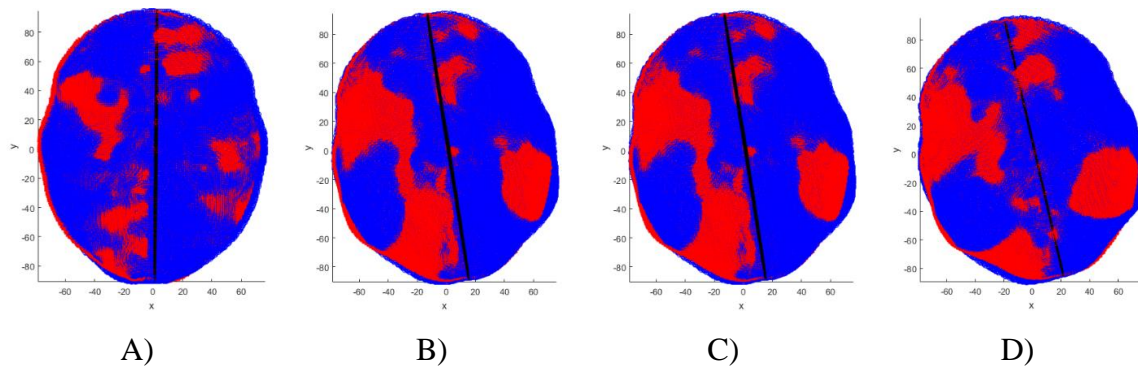


Figura 4.26. Puntos medios del registro de forma de la nube de puntos facial y su reflejo del rostro en reposo y con sus tres asimetrías del sujeto 1, A) rostro en reposo, B) Asimetría 1, C) Asimetría 2 y D) Asimetría 3.

4.2.3. Cálculo de distancias entre puntos más cercanos (Kd-tree)

El resultado del registro de forma fue la alineación y la superposición de la nube de puntos facial y su reflejo, para la determinación de la asimetría entre ambas es necesario calcular las distancias euclidianas entre sus puntos más cercanos. La obtención de los puntos más cercanos se realizó a través del algoritmo Kd-tree usando la función `KDTreeSearcher` del programa Matlab ©, a esta función se le enviaron la nube de puntos facial y la nube de puntos reflejo resultantes del registro de forma. La función dio como resultado los índices de los puntos más cercanos entre las dos nubes y el cálculo de la distancia euclidiana entre estos.

De las distancias euclidianas obtenidas se calcularon la distancia promedio (DP), la máxima distancia (D Máx.), la desviación estándar (DS) y la desviación media absoluta (DMA), la cual como indica el estado del arte es el índice de asimetría [18]. En la Tabla 4.4. se muestran los valores de la asimetría que presentan las nubes de puntos faciales del rostro en reposo y con sus tres asimetrías del sujeto 1.

El valor DMA indica el grado de asimetría del rostro del sujeto, como se puede observar en los datos de la Tabla 4.4., el valor DMA del rostro en reposo es menor en comparación con los rostros con las asimetrías. El comportamiento del valor DMA en las tres asimetrías va en incremento conforme se deforma la mejilla derecha del sujeto, de esta forma los valores obtenidos en el rostro con la asimetría 3, son mayores en comparación con el rostro en reposo y las asimetrías uno y dos. Los valores DP, D Máx. y DS también fueron en incremento conforme la mejilla se deformaba. Por ejemplo, el valor D Máx., que representa la distancia máxima entre las nubes de puntos facial y su reflejo, sufrió un incremento conforme la deformación de la mejilla crecía, provocando que la distancia entre los puntos de ambas mejillas fuese mayor y el valor máximo de D Máx. coincidiera con el de la asimetría 3.

Tabla 4.4. Valores de la asimetría facial definidos por la distancia promedio (DP), distancia máxima (D Máx.), desviación estándar (SD) y distancia media absoluta (DMA) del rostro en reposo y con las tres asimetrías del sujeto 1.

Calidad	No. puntos	DP (mm)	D Máx. (mm)	SD	DMA
Rostro en reposo					
Mediana	5,789	1.220	4.122	0.673	0.506
Alta	23,183	1.011	4.830	0.611	0.437
Interp. RBF	79,951	0.651	4.068	0.448	0.353
Asimetría 1					
Mediana	5,862	1.717	5.424	0.940	0.693
Alta	23,363	1.382	4.954	0.927	0.710
Interp. RBF	80,025	1.208	4.872	0.908	0.703

Tabla 4.4. Valores de la asimetría facial definidos por la distancia promedio (DP), distancia máxima (D Máx.), desviación estándar (SD) y distancia media absoluta (DMA) del rostro en reposo y con las tres asimetrías del sujeto 1 (continuación).

Calidad	No. puntos	DP (mm)	D Máx. (mm)	SD	DMA
Asimetría 2					
Mediana	5,977	2.027	7.701	1.332	0.930
Alta	23,512	1.801	7.600	1.447	1.076
Interp. RBF	80,783	1.514	7.653	1.394	1.005
Asimetría 3					
Mediana	5,991	2.441	8.582	1.773	1.333
Alta	23,807	2.145	8.456	1.872	1.452
Interp. RBF	80,867	1.864	8.648	1.845	1.383

Con respecto a las tres nubes de puntos con diferentes densidades evaluadas, los resultados del rostro del sujeto 1, mostraron que la nube de puntos resultante de la interpolación RBF ofreció valores menores en comparación con las nubes de puntos de calidad mediana y alta, como se muestra en la Tabla 4.4. Esto se debe a la alta densidad de la nube de puntos, la cual permitió que las distancias entre los puntos más cercanos de la nube de puntos facial y su reflejo fuesen menores, mostrando los valores de la asimetría existente en el rostro.

La Tabla 4.5. muestra el promedio de los valores de las asimetrías existentes en los rostros en reposo y con las tres asimetrías de los cinco sujetos.

Los resultados obtenidos del promedio de los rostros en reposo y de las tres asimetrías de los cinco sujetos, muestran el mismo comportamiento visto en los resultados del sujeto 1, los valores menores del DMA corresponden a los rostros en reposo, mientras que los valores máximos del DMA corresponden a los rostros con la asimetría 3. El valor promedio del DMA muestra que la nube de puntos facial de la interpolación RBF es la que ofrece los valores menores en comparación con las otras dos nubes de puntos (mediana y alta calidad).

Tabla 4.5. Valores de la asimetría facial definido por la distancia promedio (DP), distancia máxima (D Máx.), desviación estándar (SD) y distancia media absoluta (DMA) del rostro en reposo y con las tres asimetrías de los cinco sujetos.

Calidad	No. Puntos	DP (mm)	D Máx. (mm)	SD	DMA
Rostros en reposo					
Mediana	5,254	1.164	4.806	0.622	0.388
Alta	21,214	0.867	4.898	0.524	0.351
Interp. RBF	81,082	0.679	4.245	0.482	0.340
Asimetría 1					
Mediana	5,389	1.692	6.694	1.091	0.771
Alta	21,371	1.424	6.202	1.108	0.803
Interp. RBF	81,556	1.193	6.550	1.101	0.773
Asimetría 2					
Mediana	5,432	2.012	8.181	1.458	1.041
Alta	21,584	1.811	8.091	1.535	1.137
Interp. RBF	81,337	1.502	8.183	1.476	1.054
Asimetría 3					
Mediana	5,500	2.410	8.993	1.793	1.350
Alta	21,932	2.203	8.797	1.877	1.463
Interp. RBF	81,157	1.837	8.752	1.799	1.360

Los valores obtenidos por Meyer- Marcotty et al. [18] muestran una media del DMA de 0.59 mm y una desviación estándar de 0.11 mm en los rostros completos de los sujetos sanos. Los resultados mostrados en la Tabla 4.5. indica que la media del DMA obtenida de la nube de puntos de la interpolación RBF es de 0.340 mm y una desviación estándar de 0.482 mm en los rostros en reposo que representan a los rostros de los sujetos sanos. En comparación con los resultados de Meyer- Marcotty et al. [18], se puede observar que la media del DMA obtenida es menor sin embargo, la variación de los datos con respecto a la media es mayor.

Referente a los resultados obtenidos de los rostros de los pacientes Meyer- Marcotty et al. [18] obtuvieron una media del DMA de 0.87 mm con una desviación estándar de 0.26 mm. Para los rostros con la primera asimetría los resultados mostrados en la Tabla 4.5. indican una media del DMA de 0.773 mm con una desviación estándar de 1.101 mm, de la nube de puntos de la interpolación RBF. En esta primera asimetría la media del DMA se encuentra por debajo de la media de Meyer- Marcotty et al. [18], pero la desviación estándar es mayor, esto puede ser provocado por las diferencias en las deformaciones del rostro que no fueron iguales en los sujetos de género masculino y los de género femenino debido a la complejidad de sus rostros.

La media del DMA de la segunda asimetría de la nube de puntos de la interpolación RBF fue de 1.054 mm y una desviación estándar de 1.476 mm y para la tercera asimetría de la nube de puntos de la interpolación RBF la media del DMA fue de 1.360 mm y una desviación estándar de 1.799 mm. Los valores de la media del DMA de estas dos asimetrías son mayores al valor de la media del DMA obtenido en los rostros de los pacientes en el trabajo de Meyer- Marcotty et al. [18]. Un punto que considerar es que en el trabajo de Meyer- Marcotty et al. [18] la asimetría que presentan los pacientes corresponde a una cicatriz que provoca una asimetría en el labio, las asimetrías generadas en esta investigación fueron incrementos en el tamaño de la mejilla derecha.

En la Tabla 4.6., se muestra el ECM de las tres asimetrías en comparación con el rostro en reposo de las tres nubes de puntos faciales de mediana y alta calidad; y la nube resultante de la interpolación RBF. Entre cada uno de los errores calculados entre el rostro en reposo y cada asimetría, existe una diferencia que tiene un incremento de 0.25 a 0.30, esta permite identificar las variaciones en las distintas asimetrías realizadas al rostro del sujeto.

El ECM obtenido en cada una de las asimetrías muestra diferencias con respecto al número de puntos que contiene la nube de puntos facial. El ECM obtenido de las nubes de puntos faciales de calidad mediana es menor en comparación a las otras dos nubes de puntos, esto se puede deber a la densidad baja de la nube que no permite mostrar diferencia en los detalles finos de las regiones faciales. La diferencia del error entre el rostro en reposo y sus tres asimetrías, de las nubes de puntos de alta calidad y de la interpolación RBF, muestra un comportamiento similar, sin embargo, los valores DMA de las nubes de puntos faciales de la

interpolación RBF es menor con respecto al valor DMA de las nubes de puntos de alta calidad, esto debido a la alta densidad que tiene la nube de puntos de la interpolación RBF, que como se mencionó anteriormente permite mostrar las asimetrías que existen en la región facial.

Tabla 4.6. Error cuadrático medio entre el rostro en reposo y las tres asimetrías generadas en el rostro.

Calidad	Error cuadrático medio		
	Rostro en reposo - Asimetría 1	Rostro en reposo - Asimetría 2	Rostro en reposo - Asimetría 3
Mediana	0.330	0.572	0.882
Alta	0.458	0.762	1.099
Interp. RBF	0.432	0.700	1.010

Las conclusiones obtenidas del desarrollo del presente trabajo se enuncian en el siguiente capítulo, además del trabajo futuro para dar continuidad al mismo. Como trabajo futuro para la continuidad de esta investigación se propone realizar un clasificador para determinar los grados de asimetría que presentan los rostros de pacientes con padecimientos como la parálisis facial periférica.

CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

El objetivo general de este trabajo es: Determinar la asimetría del rostro humano utilizando nubes de puntos provenientes de imágenes RGB-D. Por lo que el presente trabajo de investigación se enfocó a determinar la asimetría facial de una nube de puntos proveniente de una imagen RGB-D adquirida a través de una plataforma compuesta por un sensor RGB-D de bajo costo y un software de procesamiento y reconstrucción de imágenes 3D. Las nubes de puntos faciales utilizadas para la determinación de la asimetría contenían diferentes densidades de puntos, estas fueron obtenidas con la plataforma de adquisición e interpoladas por medio de la red RBF. Para determinar la asimetría facial de las nubes de puntos se propuso una metodología basada en dos etapas:

- La primera que consiste en la generación de una nube de puntos densa.
- La segunda consiste en la determinación de la asimetría facial de la nube puntos densa de la primera etapa.

Después de implementar la metodología y analizar los resultados se llegó a las siguientes conclusiones:

- Con respecto al objetivo general del trabajo de investigación, la determinación de la asimetría del rostro en reposo y sus tres asimetrías muestran diferencias en los valores obtenidos de la media del DMA y la desviación estándar. El valor de la media del DMA para el rostro en reposo fue de 0.340 mm y con una desviación estándar de 0.482 mm. La primera asimetría dio como resultado una media del DMA de 0.773 mm y una desviación estándar de 1.101 mm. Referente a la segunda y tercera asimetría su media del DMA fue 1.054 mm y 1.360 mm respectivamente y con una desviación estándar de 1.476 mm y 1.799 mm.
- Los resultados obtenidos de la determinación de la asimetría facial, de las nubes de puntos que provienen de las imágenes 3D adquiridas con la plataforma Kinect, muestran que estas pueden proveer información de sus formas para distinguir diferencias entre un rostro en reposo y con asimetrías.
- La plataforma Kinect para la adquisición de imágenes 3D, representa una opción portable debido a que puede ser utilizada en espacios reducidos como las dimensiones mínimas establecidas para un consultorio médico general, además de que no requiere de un proceso de calibración cada vez que esta cambie de lugar de operación.
- La plataforma Sense 3D representa una opción de bajo costo y portable para la adquisición de imágenes 3D, sin embargo, esta tiene como limitante que causa un efecto nocivo en los ojos de los sujetos al ser expuestos a este.
- El uso del software Skanect en la plataforma Kinect requiere de un equipo de cómputo robusto además del requerimiento de una tarjeta de gráficos, para la adquisición de imágenes 3D de calidad alta y muy alta, cuyas nubes de puntos faciales se encuentran en un rango de 20,000 a 50,000 puntos. El costo del equipo de cómputo con las características necesarias más la licencia del software provoca que la plataforma tenga un costo aproximado de \$20,000. Con este costo podría evaluarse la opción de un sensor RGB-D con características superiores al sensor Kinect para Xbox 360 ©.
- Con base en los resultados obtenidos, la recomendación como plataforma para la adquisición de imágenes 3D es la del sensor Kinect para Xbox 360 ©, debido a su facilidad de uso, portabilidad, la adaptación con otro software de reconstrucción y procesamiento de imágenes 3D y además de que cuenta con un SDK para el desarrollo de herramientas que permitan mejorar la calidad en la imagen.

- La imagen 3D de mediana calidad adquirida a través de la plataforma Kinect, presenta características faciales que proveen información para la determinación de la asimetría, la nube de puntos de la región facial contiene un promedio de 5,000 puntos. Esta densidad está limitada, pero al ser incrementada a través de la interpolación RBF da como resultado una nube de puntos con una densidad como las imágenes de alta y muy alta calidad del software Skanect, representando una solución al requerimiento del equipo de cómputo robusto.
- Con base en los resultados obtenidos de las asimetrías de las nubes de puntos con diferentes densidades, se puede concluir que el número de puntos de la nube facial tiene un impacto en la determinación de la asimetría. Debido a que los valores de la nube de puntos de mediana calidad, cuya densidad es de 5,000 puntos aproximadamente, fueron mayores en comparación con las nubes de puntos que contenían 21,000 y 80,000 puntos.
- Considerando los resultados obtenidos referentes al plano de simetría, se concluye que a pesar de que existan deformaciones que provoquen una diferencia en las formas de ambos lados del rostro, el plano de simetría resultante coincidió con el centro del rostro. Con esto se puede asegurar que la nube de puntos facial y su reflejo se encontraban alineadas, dando como resultado un índice de asimetría que correspondía a las diferencias entre las formas de ambos lados del rostro.
- Referente al uso del algoritmo Kd-tree para el cálculo de las distancias más cercanas, se puede concluir que este se ve afectado en su rendimiento con el incremento en las dimensiones de los datos, por lo que es necesario buscar otra alternativa para calcular la distancia entre los puntos de la nube facial y su reflejo.

Trabajo futuro

El trabajo futuro planteado para la continuidad del presente trabajo de investigación se propone como puntos de mejora en algunos algoritmos referente a su rendimiento, así como para la automatización de algunos procesos manuales y para el crecimiento del mismo. Estos trabajos futuros se enuncian a continuación:

- Se requiere realizar cambios en la plataforma de adquisición del sensor Kinect a través del desarrollo de un dispositivo que permita realizar un recorrido circular alrededor del rostro del sujeto, evitando vibraciones que generen ruido durante la adquisición de la imagen.
- Se requiere desarrollar un algoritmo que permita calcular de forma automática las dimensiones de las longitudes del rostro, que se utilizan como longitudes de los semiejes del elipsoide para la extracción de la región facial.
- El cálculo de los puntos más cercanos entre la nube de puntos facial y su reflejo requiere de la implementación de otro algoritmo que reemplaza al algoritmo Kd-tree, debido a los problemas que se presentaron con este.
- La determinación de la asimetría en el presente trabajo se realizó de forma general, como trabajo futuro se requiere dividir el rostro en la cara inferior, superior y media, para calcular su asimetría facial y de esta forma poder determinar la asimetría existente en zonas específicas como ojos, boca y nariz.
- Desarrollar un clasificador para poder determinar el grado de parálisis facial, a través del cálculo de la asimetría facial de una imagen 3D, considerando las escalas de evaluación del nervio facial.

Referencias

- [1] W. Quan, B. J. Matuszewski y L.K. Shark, "Facial Asymmetry Analysis Based on 3-D Dynamic Scans", en *Systems, Man, and Cybernetics (SMC), 2012 IEEE International Conference*, pp. 2676-2681.
- [2] M. Daoudi, A. Srivastava y R. Veltkamp, 3D Face Modeling, Analysis and Recognition, UK: John Wiley & Sons, 2013.
- [3] V. Ferrario, et al., "A three-dimensional evaluation of human facial asymmetry", *Journal of anatomy*, vol. 186, n° 1, pp. 103-110, 1995.
- [4] J. Cacho Gutiérrez, P. Cacabelos Pérez y M. Sevillano García, "Patología de los pares craneales", *Medicine*, pp. 4793-4805, 2011.
- [5] R. F. Baugh, G. J. Basura, S. R. Schwartz, L. E. Ishii, et al, "Clinical Practice Guideline: Bell's Palsy", *Otolaryngology-Head and Neck Surgery*, vol. 149, n° 3 suppl, p. S1–S27, 2013.
- [6] G. E. Murty, et al., "The Nottingham System: objective assessment of facial nerve function in the clinic", *Otolaryngology Head and Neck Surgery*, vol. 110, n° 2, pp. 156-161, 1994.
- [7] S. D. Reitzen, J. S. Babb y A. K. Lalwani, "Significance and reliability of the House-Brackmann grading system for regional facial nerve function", *Otolaryngology-Head and Neck Surgery*, vol. 140, pp. 154-158, 2009.
- [8] J. C. Péres Barrón , "Determinación de la confiabilidad intrasujeto e intersujeto de la escala de sunnybrook validada al español para la evaluación de la función motora facial de pacientes adultos con parálisis facial periférica", tesis doctoral Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México, 2010.
- [9] A. Y. Fattah, A. D. Gurusinghe, J. Gavilan, T. A. Hadlock y J. R. Marcus, "Facial Nerve Grading Instruments: Systematic Review of the Literature and Suggestion for Uniformity", *Plastic and reconstructive surgery*, vol. 135, n° 2, pp. 569-579, 2015.
- [10] H. Y. Lee, et al., "Agreement between the facial nerve grading system 2.0 and the House-Brackmann grading system in patients with Bell palsy", *Clinical and experimental otorhinolaryngology*, vol. 6, n° 3, pp. 135-139, 2013.

- [11] K. Mishima y T. Sugahara, "Analysis methods for facial motion", *Japanese Dental Science Review*, vol. 45, pp. 4-13, 2009.
- [12] P. Dulguerov, D. Wang, T. V. Perneger, F. Marchal y W. Lehmann, "Videomimicography The Standards of Normal Revised", *Otolaryngol Head Neck Surg*, vol. 129, pp. 960-965, 2003.
- [13] M. Benz, X. Laboureux, T. Maier, E. Nkenke, S. Seeger, et al., "The Symmetry of Face", en *VMV 2002*, Erlangen, German pp.43-50.
- [14] R. C. Carro, E. B. Huerta, R. M. Caporal, J. Hernández y F. R. Cruz, "Facial Expression Analysis with Kinect for the Diagnosis of Paralysis Using Nottingham System", *IEEE Latin America Transactions*, vol. 14, n° 7, pp. 3418-3426, 2016.
- [15] P. A. Desrosiers, Y. Bennis, B. B. Amor, M. Daoudi y P. Guerreschi, "Analyzing of facial paralysis by shape analysis of 3D face sequences", *Image and Vision Computing*, vol. 67, pp. 67-88, 2017.
- [16] L. Di Angelo y P. Di Stefano, "Bilateral symmetry estimation of human face", *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*, vol. 7, n° 4, pp. 217-225, 2013.
- [17] A. Gaber, M. F. Taher y M. A. Wahed, "Quantifying Facial Paralysis using the Kinect v2", en *Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC), 2015 37th Annual International Conference of the IEEE*, pp. 2497-2501.
- [18] P. Meyer-Marcotty, G. W. Alpers, A. B. Gerdes y A. Stellzig-Eisenhaue, "Impact of facial asymmetry in visual perception: A 3-dimensional data analysis", *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, pp. 168.e1-168.e8, 2010.
- [19] K. I. Chang, K. W. Bowyer y P. J. Flynn, "Multimodal 2D and 3D biometrics for face recognition", *Analysis and Modeling of Faces and Gestures*, vol. IEEE International Workshop, pp. 187-194, 2003.
- [20] G. Pan, Y. Wang, Y. Qi y Z. Wu, "Finding Symmetry Plane of 3D Face Shape", en *Pattern Recognition ICPR 2006. 18th International Conference*, vol. 3, pp. 1143-1146, 2006.
- [21] L. Zhang, A. Razdan, G. Farin, J. Femiani y M. Bae, "3D face authentication and recognition based on bilateral symmetry analysis", *The Visual Computer*, vol. 22, n° 1, pp. 43-55, 2006.
- [22] S. Zhang, H. Yu, J. Dong, T. Wang, Z. Ju y H. Liu, "Automatic Reconstruction of Dense 3D Face Point Cloud with A Single Depth Image", en *Systems, Man, and Cybernetics (SMC) 2015*, pp. 1439-1444.

- [23] M. Schätz, A. Procházka, O. Tupa, O. Vysata y V. Sedlák, "Face Movement Analysis with MS Kinect", en *Computational Intelligence for Multimedia Understanding (IWCIM), 2016 International Workshop*, pp. 1-5.
- [24] B. J. Matuszewski, W. Quan y L.-K. Shark, "Hi4D-ADSIP 3-D dynamic facial articulation database", *Image and Vision Computing*, vol. 30, pp. 713-727, 2012.
- [25] CNDH, "Comisión Nacional de los Derechos Humanos", Comisión Nacional de los Derechos Humanos, 2017. [En línea]. Disponible: <http://www.cndh.org.mx/DocTR/2016/JUR/A70/01/JUR-20170331-NOR10.pdf>. [Último acceso: 13 02 2019].
- [26] S. Zhang, H. Yu, T. Wang, L. Qi, J. Dong y H. Lui, "Dense 3D facial reconstruction from a single depth image in unconstrained environment", *Virtual Reality*, vol. 22, n° 1, pp. 37-46, 2018.
- [27] S. A. Wibowo, E. K. Kim y S. Kim, "Implicit Surface Representation of Three-Dimensional Face from Kinect Sensor", *Journal of Korean Institute of Intelligent Systems*, vol. 25, n° 4, pp. 412-417, 2015.
- [28] M. Hernandez, J. Choi y G. Medioni, "Near laser-scan quality 3-D face reconstruction from a low-quality depth stream", *Image and Vision Computing*, vol. 36, pp. 61-69, 2015.
- [29] J. Hwang, S. Yu, J. Kim y S. Lee "3D face modeling using the multi-deformable method", *Sensors*, vol. 12, n° 10, pp. 12870-12889, 2012.
- [30] C. P. R. Manués, M. V. S. Casagrande, R. C. C. Almeida, M. A. O. Almeida y F. A. R. Carvalho, "Three-dimensional surface models of the facial soft tissues acquired with a low-cost scanner", *International journal of oral and maxillofacial surgery*, 2018.
- [31] M. Benz, "Ergebnismodellierung und Qualitätskontrolle kraniofazialer Operationen auf Basis optischer Messtechnik", tesis doctoral Universidad de Erlangen-Nuremberg, Baviera Alemania, 2005.
- [32] A. S. Huang, A. Bachrach, P. Henry, M. Krainin, D. Maturana, et al., "Visual odometry and mapping for autonomous flight using an RGB-D camera", *In Robotics Research*, pp. 235-252, 2017.
- [33] F. Dufaux, B. Pesquet-Popescu y M. Cagnazzo, *Emerging Technologies for 3D Video: Creation, Coding, Transmission and Rendering*, UK: WILEY, 2013.

- [34] J. Moberg, "3d scanner: Accuracy, performance and challenges with a low cost 3d scanning platform", tesis KTH Royal Institute of Technology, Estocolomo Suecia, 2017.
- [35] J. Rosicky, A. Grygar, P. Chapcak, T. Bouma y J. Rosicky, "Application of 3D scanning in prosthetic & orthotic clinical practice", en *Proceedings of the 7th international conference on 3D body scanning technologies*, pp. 88-97, 2016.
- [36] I. Amidror, "Scattered data interpolation methods for electronic imaging systems: a survey", *Journal of Electronic Imaging*, vol. 11, pp. 157-176, 2002.
- [37] G. Sánchez Torres y J. Willian Branch, "Un procedimiento geométrico para la reconstrucción de superficies mediante funciones de base radial de soporte compacto", *Rev. Fac. Ing. Univ. Antioquia*, n° 48, pp. 119-129, 2009.
- [38] S. Haykin, *Neuronal Networks and Learning Machines*, New Jersey: Pearson, 2009.
- [39] F. Atasoy, B. Sen, F. Nar y I. Bozkurt, "Improvement of Radial basis Function Interpolation Performance on Cranial Implant Design", *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, vol. 8, n° 8, pp. 83-88, 2017.
- [40] J. C. Carr, W. R. Fright y R. K. Beatson, "Surface interpolation with radial basis functions for medical imaging", *IEEE transactions on medical imaging*, vol. 16, n° 1, pp. 96-107, 1997.
- [41] C. S. K. Dash, A. K. Behera, S. Dehuri y S.-B. Cho, "Radial basis function neural networks: a topical state-of-the-art survey", *Open Computer Science*, vol. 6, n° 1, 2016.
- [42] C. J. Trahan y R. E. Wyatt, "Radial basis function interpolation in the quantum trajectory method: optimization of the multi-quadric shape parameter", *Journal of Computational Physics*, vol. 185, n° 1, pp. 27-49, 2003.
- [43] M. Yaghouti y H. R. Azarboni, "Determining optimal value of the shape parameter c in RBF for unequal distances topographical points by Cross-Validation algorithm", *Journal of Mathematical Modeling*, vol. 5, n° 1, pp. 53-60, 2017.
- [44] I. Jolliffe, *Principal Component Analysis*, New York: Springer, 2002.
- [45] A. Tharwat, "Principal Component Analysis - A Tutorial", *International Journal of Applied Pattern Recognition*, vol. 3, n° 3, pp. 197-240, 2016.
- [46] F. B. Naini y D. S. Gill, "Facial aesthetics: 2. Clinical assessment", *Dental update*, vol. 35, n° 3, pp. 159-170, 2008.

- [47] S. Rusinkiewicz y M. Levoy, "Efficient Variants of the ICP Algorithm", *3-D Digital Imaging and Modeling, 2001. Proceedings. Third International Conference on IEEE*, pp. 145-152, 2001.
- [48] S. Olate y M. De Morales, "Deformidad Facial Asimétrica: Papel de la hiperplasia condilar", *International journal of odontostomatology*, vol. 6, n° 3, pp. 337-347, 2012.
- [49] C. Sora y P. M. Jaramillo, "Diagnóstico de las asimetrías faciales y dentales", *Revista Facultad de Odontología Universidad de Antioquia*, vol. 16, n° 1 y 2, 2009.
- [50] S. Burrell, "Objective grading of facial paralysis", *Annals of Otolaryngology & Rhinology*, vol. 95, n° 3, pp. 238-241, 1986.
- [51] J. Carr, R. K. Beatson, J. B. Cherrie, T. J. Mitchell, W. R. Fright, et al., "Reconstruction and Representation of 3D Objects with Radial Basis Functions", en *Proceedings of the 28th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*, ACM, 2001, pp. 67-76.
- [52] Occipital, "Skanect", Occipital, 2011. [En línea]. Disponible: <https://skanect.occipital.com/>. [Último acceso: 10 12 2018].
- [53] J. Webb y J. Ashley, *Beginning Kinect Programming with the Microsoft Kinect SDK*, Apress, 2012.
- [54] I. 3D Systems, *User Guide Sense 3D Scanner*, 3D Systems, Inc, 2013.
- [55] J. L. Bentley, "Multidimensional binary search trees used for associative searching", *Communications of the ACM*, vol. 18, n° 9, pp. 509-517, 1975.
- [56] I. Autodesk, "Autodesck Meshmixer", Autodesk, Inc., 2017. [En línea]. Disponible: <http://www.meshmixer.com/>. [Último acceso: 06 03 2019].

A.1. Carta de consentimiento informado

La carta de consentimiento informado entregada a los sujetos participantes en las pruebas de adquisición de imágenes de ambas plataformas, indica el desarrollo de la prueba para cada una, así como los riesgos y la confidencialidad de los datos.

Plataforma Kinect



Universidad Autónoma del Estado de México
Facultad de Ingeniería
Maestría en Ciencias de la Ingeniería



Proyecto: Análisis de asimetría facial

ID: _____

Investigadores: Diana Alejandra Mendoza Mora, Adriana Vilchis González, Vianney Muñoz Jiménez y Jorge Rodríguez Arce.

Carta de consentimiento informado

OBJETIVO. Se ha solicitado su participación en este estudio de investigación que tiene como objetivo realizar un análisis de asimetría facial de una imagen facial 3D.

PROCEDIMIENTOS. Si usted acepta participar en el estudio, se realizará la adquisición de imágenes 3D de su rostro en reposo y de tres asimetrías generadas a través de la colocación de dulces con forma esférica con diámetros de 2 cm, 3 cm y 4 cm, en la parte interior de su mejilla derecha. La adquisición de la imagen se realizará a través de una plataforma compuesta por una pc, un software de procesamiento y reconstrucción de imágenes 3D y del sensor Kinect 360. Este proceso tomara un tiempo de 60 minutos. Como primer punto se le solicitará que retire elementos como anteojos y cabello de su rostro. Antes de comenzar recibirá una capacitación para indicarle la forma de rotación que usted debe realizar en una silla giratoria, esta será explicada de forma gráfica y se le solicitará realizar algunas repeticiones para asegurar la explicación fue adecuada. El sensor Kinect 360 será colocado de frente a usted a la altura de su rostro a una distancia de 74 cm, la distancia será medida a través de una cinta métrica desde el centro del sensor hasta la punta de su nariz. Antes de comenzar se realizará una cuenta regresiva para indicarle que el escaneo de su rostro será iniciado, al momento que usted reciba la indicación deberá comenzar con la rotación como se le indico en la capacitación, una vez finalizada la adquisición de su rostro se le indicara que el proceso ha terminado. El tiempo de escaneo de cada imagen será de 90 segundos

RIESGOS POTENCIALES. Los riesgos potenciales que implican su participación en este estudio son mínimos. Su participación en la prueba podría causarle un malestar durante el tiempo que usted tendrá colocado los dulces de diversos tamaños en el interior de su mejilla. Sin embargo, si decide retirarse o realizar el escaneo de su rostro en diferentes días, ésta en todo su derecho de realizarlo en cualquier momento.

CONFIDENCIALIDAD. Las imágenes 3D adquiridas de su rostro serán de carácter confidencial y serán utilizadas únicamente por el equipo de investigación del proyecto y no estará disponible para ningún otro propósito. Los resultados de este estudio podrían ser publicados con fines científicos y serán presentados protegiendo su privacidad.

PARTICIPACIÓN VOLUNTARIA Y RETIRO. Su participación en el estudio es totalmente voluntaria. Usted es libre de elegir si participa o no en el estudio, en el entendido de que no habrá ninguna represalia si se decide no participar. Del mismo modo en el momento que lo decida, puede retirarse de la investigación, notificando al investigador sobre su decisión.

Antes de aceptar o rechazar su participación en la prueba, puede aclarar cualquier duda que tenga sobre el estudio.

Al firmar la presente carta, estoy de acuerdo en que:

1. Leí o me leyeron en su totalidad y me fue explicada esta carta de consentimiento informado y sobre el proyecto de investigación.
2. Tuve la oportunidad de preguntar a una persona a cargo de la investigación y recibí respuestas a las dudas presentadas.
3. Tengo en mi poder una copia firmada de la carta de consentimiento informado.
4. Se me preguntó a cerca de mi participación en esta investigación y entiendo los riesgos y beneficios: por ello doy libremente mi consentimiento para participar en el proyecto de investigación que se contiene en esta forma, bajo las condiciones que se indican.
5. Entiendo que puedo rehusarme o retirarme de la investigación en cualquier momento sin represalias.

Nombre y Firma

Fecha (Día/Mes/Año)

Edad:

Sexo:

Plataforma Sense 3D



Universidad Autónoma del Estado de México
Facultad de Ingeniería
Maestría en Ciencias de la Ingeniería



Proyecto: Análisis de asimetría facial

ID: _____

Investigadores: Diana Alejandra Mendoza Mora, Adriana Vilchis González, Vianney Muñoz Jiménez y Jorge Rodríguez Arce.

Carta de consentimiento informado

OBJETIVO. Se ha solicitado su participación en este estudio de investigación que tiene como objetivo realizar un análisis de asimetría facial de una imagen facial 3D.

PROCEDIMIENTOS. Si usted acepta participar en el estudio, se realizará la adquisición de imágenes 3D de su rostro en reposo y de tres asimetrías generadas a través de la colocación de dulces con forma esférica con diámetros de 2 cm, 3 cm y 4 cm, en la parte interior de su mejilla derecha. La adquisición de la imagen se realizará a través de una plataforma compuesta por una pc, un software de procesamiento y reconstrucción de imágenes 3D y del sensor Kinect 360. Este proceso tomara un tiempo de 60 minutos. Como primer punto se le solicitará que retire elementos como anteojos y cabello de su rostro. Antes de comenzar recibirá una capacitación para indicarle la forma de rotación que usted debe realizar en una silla giratoria, esta será explicada de forma gráfica y se le solicitará realizar algunas repeticiones para asegurar la explicación fue adecuada. El sensor Kinect 360 será colocado de frente a usted a la altura de su rostro a una distancia de 74 cm, la distancia será medida a través de una cinta métrica desde el centro del sensor hasta la punta de su nariz. Antes de comenzar se realizará una cuenta regresiva para indicarle que el escaneo de su rostro será iniciado, al momento que usted reciba la indicación deberá comenzar con la rotación como se le indico en la capacitación, una vez finalizada la adquisición de su rostro se le indicara que el proceso ha terminado. El tiempo de escaneo de cada imagen será de 90 segundos

RIESGOS POTENCIALES. Los riesgos potenciales que implican su participación en este estudio son mínimos. Su participación en la prueba podría causarle un malestar durante el tiempo que usted tendrá colocado los dulces de diversos tamaños en el interior de su mejilla. Sin embargo, si decide retirarse o realizar el escaneo de su rostro en diferentes días, ésta en todo su derecho de realizarlo en cualquier momento.

CONFIDENCIALIDAD. Las imágenes 3D adquiridas de su rostro serán de carácter confidencial y serán utilizadas únicamente por el equipo de investigación del proyecto y no estará disponible para ningún otro propósito. Los resultados de este estudio podrían ser publicados con fines científicos y serán presentados protegiendo su privacidad.

PARTICIPACIÓN VOLUNTARIA Y RETIRO. Su participación en el estudio es totalmente voluntaria. Usted es libre de elegir si participa o no en el estudio, en el entendido de que no habrá ninguna represalia si se decide no participar. Del mismo modo en el momento que lo decida, puede retirarse de la investigación, notificando al investigador sobre su decisión.

Antes de aceptar o rechazar su participación en la prueba, puede aclarar cualquier duda que tenga sobre el estudio.

Al firmar la presente carta, estoy de acuerdo en que:

1. Leí o me leyeron en su totalidad y me fue explicada esta carta de consentimiento informado y sobre el proyecto de investigación.
2. Tuve la oportunidad de preguntar a una persona a cargo de la investigación y recibí respuestas a las dudas presentadas.
3. Tengo en mi poder una copia firmada de la carta de consentimiento informado.
4. Se me preguntó a cerca de mi participación en esta investigación y entiendo los riesgos y beneficios: por ello doy libremente mi consentimiento para participar en el proyecto de investigación que se contiene en esta forma, bajo las condiciones que se indican.
5. Entiendo que puedo rehusarme o retirarme de la investigación en cualquier momento sin represalias.

Nombre y Firma

Fecha (Día/Mes/Año)

Edad:

Sexo:

¿Usted ha padecido parálisis facial periférica?: Sí No

B.1. Generación de una nube de puntos densa

En el presente Apéndice se muestran los resultados obtenidos del desarrollo de la etapa de generación de una nube de puntos densa, de la plataforma Kinect, que no fueron presentados en el Capítulo 4.

B.1.1. Adquisición de la imagen 3D

En las Figuras B.1-B.3 se ilustran las imágenes 3D del rostro en reposo adquiridos con los cuatro tipos de calidad del software Skanect ©.

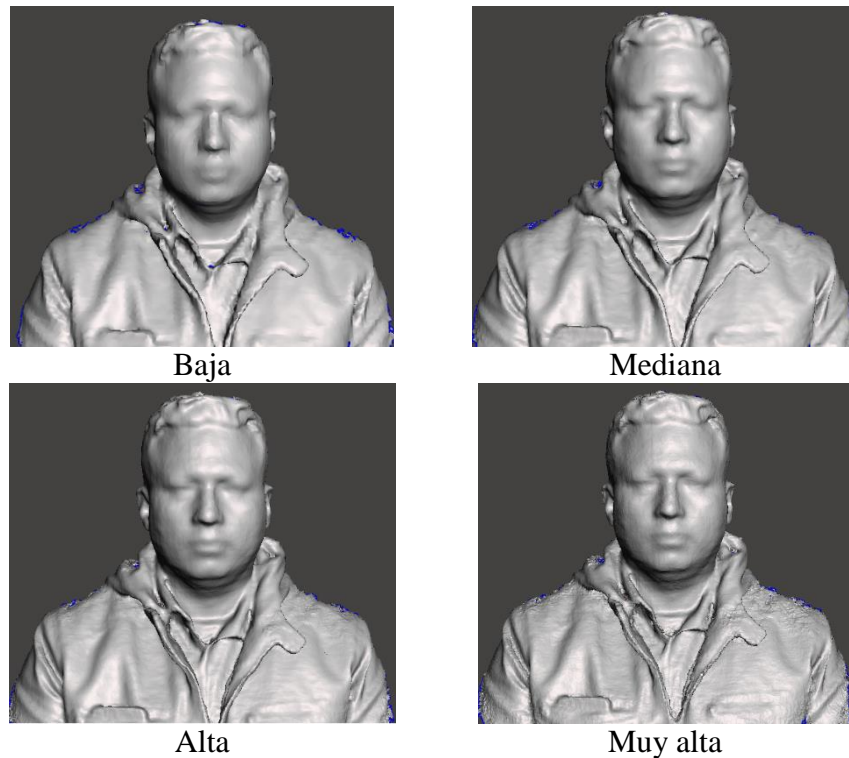
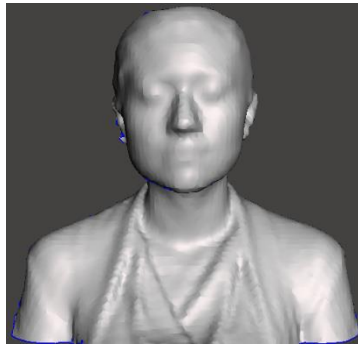


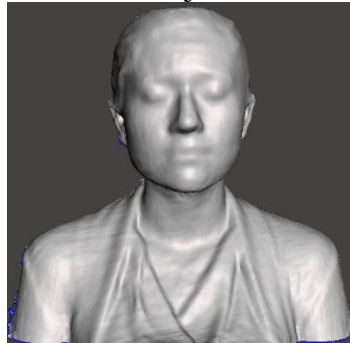
Figura B.1. Imágenes 3D adquiridas con los cuatro tipos de calidad del software Skanect ©, del sujeto 2.



Baja



Mediana



Alta



Muy alta

Figura B.2. Imágenes 3D adquiridas con los cuatro tipos de calidad del software Skanect ©, del sujeto 3.



Baja



Mediana



Alta



Muy alta

Figura B.3. Imágenes 3D adquiridas con los cuatro tipos de calidad del software Skanect ©, del sujeto 5.

En las Figuras B.4-B.6 se ilustran las imágenes 3D de alta calidad de los rostros en reposo y con tres asimetrías adquiridos con la plataforma Kinect, en la Figura B.4.B se puede observar que la deformación de la mejilla del sujeto no muestra una diferencia con respecto al rostro en reposo. En el caso de los sujetos femeninos de las Figuras B.5.-B.6. la primera asimetría muestra diferencias con respecto al rostro en reposo.

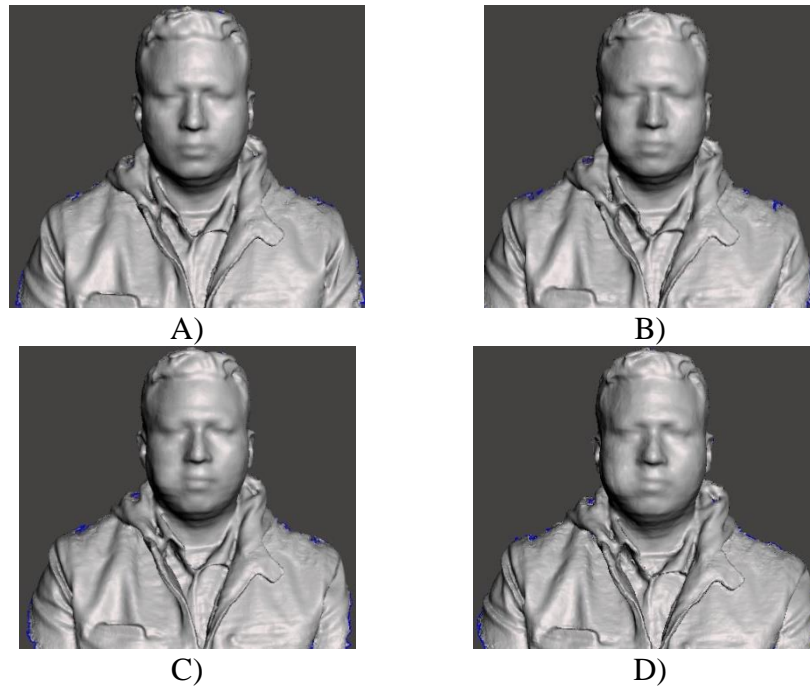


Figura B.4. Imágenes 3D de la plataforma Kinect de alta calidad del sujeto 2, A) rostro en reposo, B) rostro con la primera asimetría en la mejilla derecha, C) rostro con la segunda asimetría y D) rostro con la tercera asimetría.

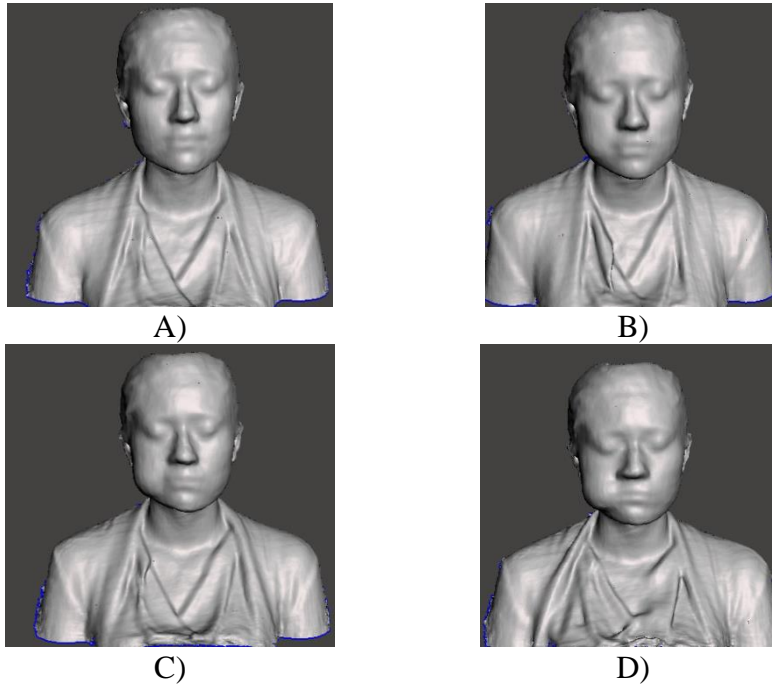


Figura B.5. Imágenes 3D de la plataforma Kinect de alta calidad del sujeto 3, A) rostro en reposo, B) rostro con la primera asimetría en la mejilla derecha, C) rostro con la segunda asimetría y D) rostro con la tercera asimetría.

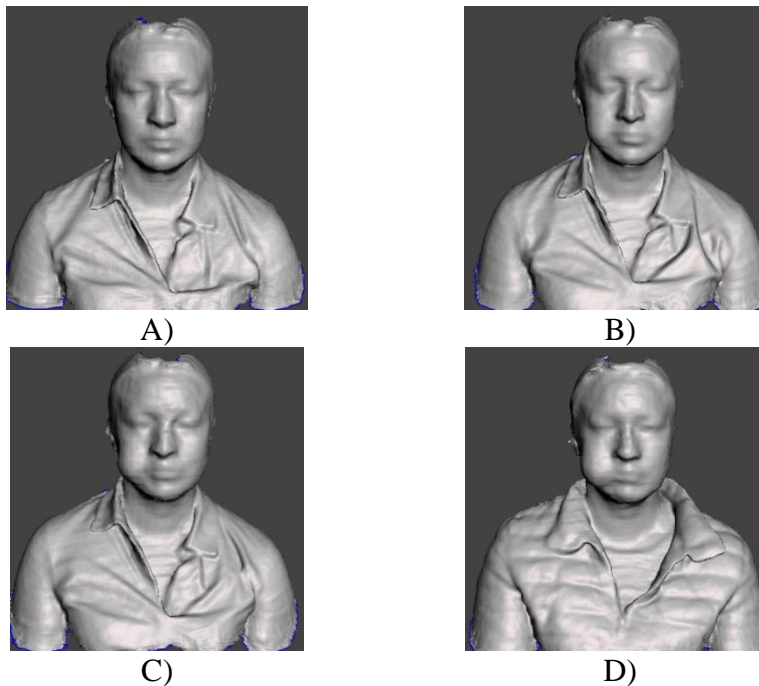


Figura B.6. Imágenes 3D de la plataforma Kinect de alta calidad del sujeto 5, A) rostro en reposo, B) rostro con la primera asimetría en la mejilla derecha, C) rostro con la segunda asimetría y D) rostro con la tercera asimetría.

B.1.2. Extracción de la región facial

Las Figuras B.7.-B.10. ilustran las nubes de puntos faciales extraídas de las imágenes 3D adquiridas con los cuatro tipos de calidad del software Skanect ©.

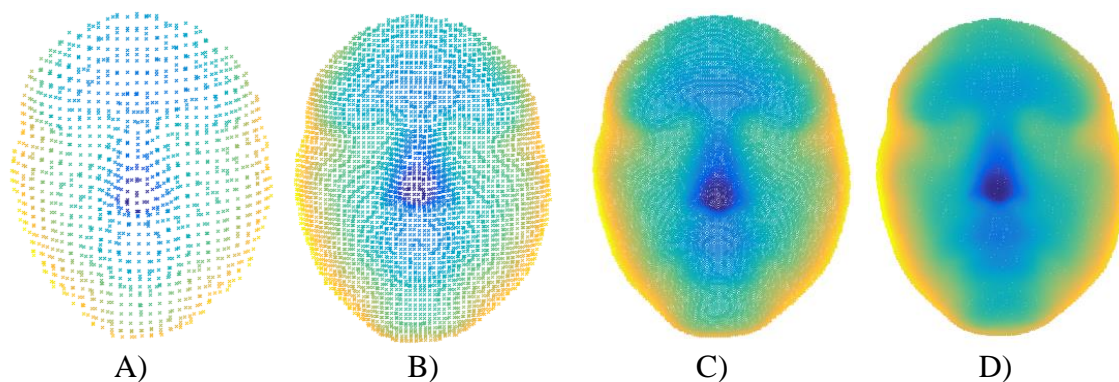


Figura B.7. Nubes de puntos faciales de las imágenes 3D adquiridas con los cuatro tipos de calidad del sujeto 2, A) Baja calidad, B) Mediana calidad, C) Alta calidad y D) Muy alta calidad.

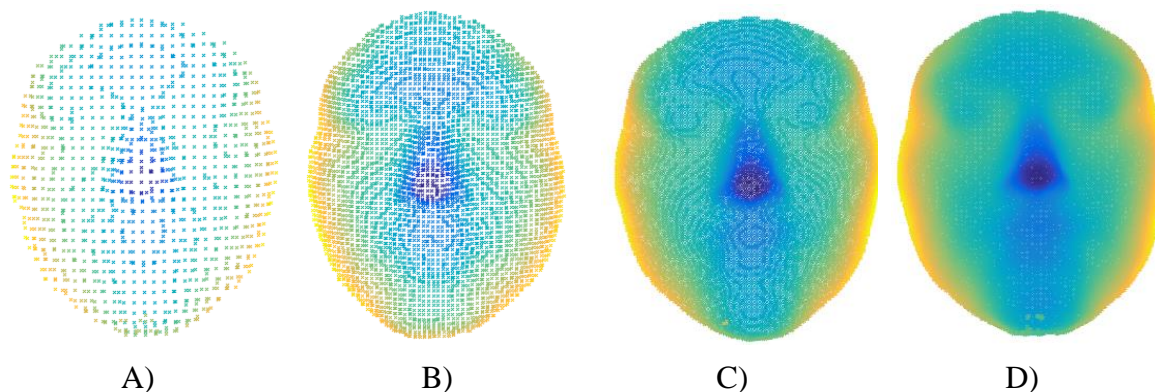


Figura B.8. Nubes de puntos faciales de las imágenes 3D adquiridas con los cuatro tipos de calidad del sujeto 3, A) Baja calidad, B) Mediana calidad, C) Alta calidad y D) Muy alta calidad.

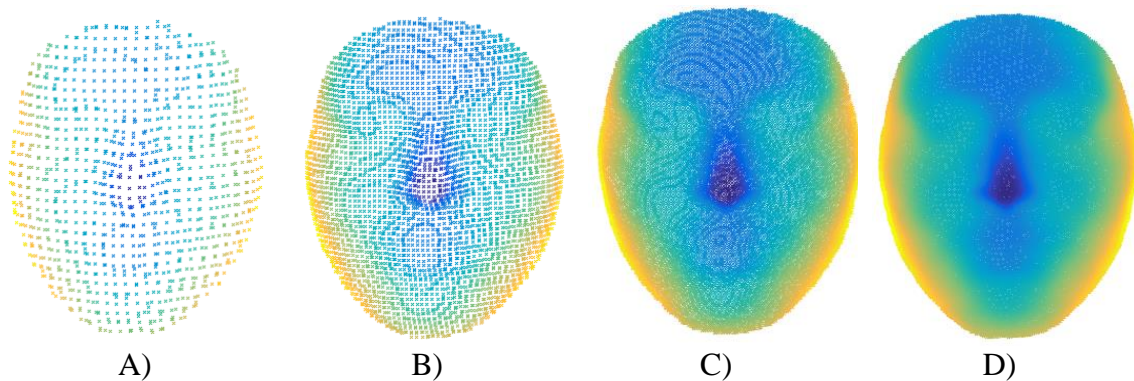


Figura B.9. Nubes de puntos faciales de las imágenes 3D adquiridas con los cuatro tipos de calidad del sujeto 4, A) Baja calidad, B) Mediana calidad, C) Alta calidad y D) Muy alta calidad.

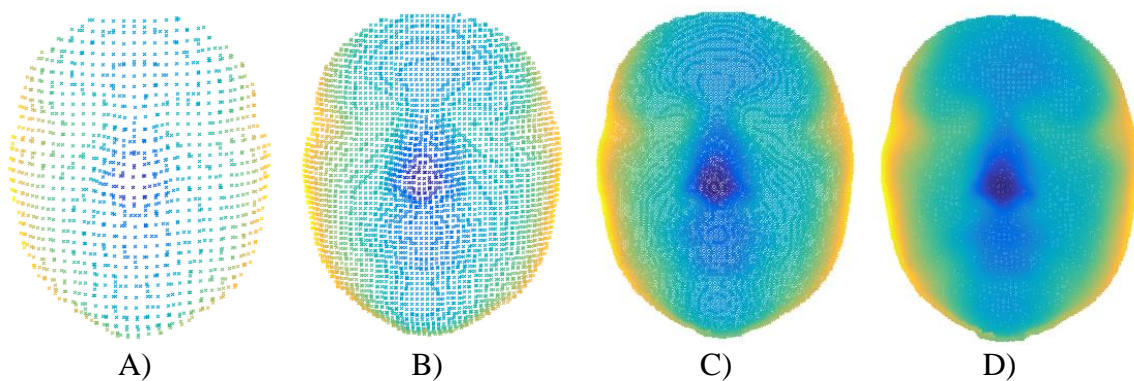


Figura B.10. Nubes de puntos faciales de las imágenes 3D adquiridas con los cuatro tipos de calidad del sujeto 5, A) Baja calidad, B) Mediana calidad, C) Alta calidad y D) Muy alta calidad.

B.1.2. Extracción de la región facial

Las Figuras B.11.-B.14 ilustran las nubes de puntos faciales de los rostros en reposo y con las tres asimetrías resultantes de la interpolación RBF.

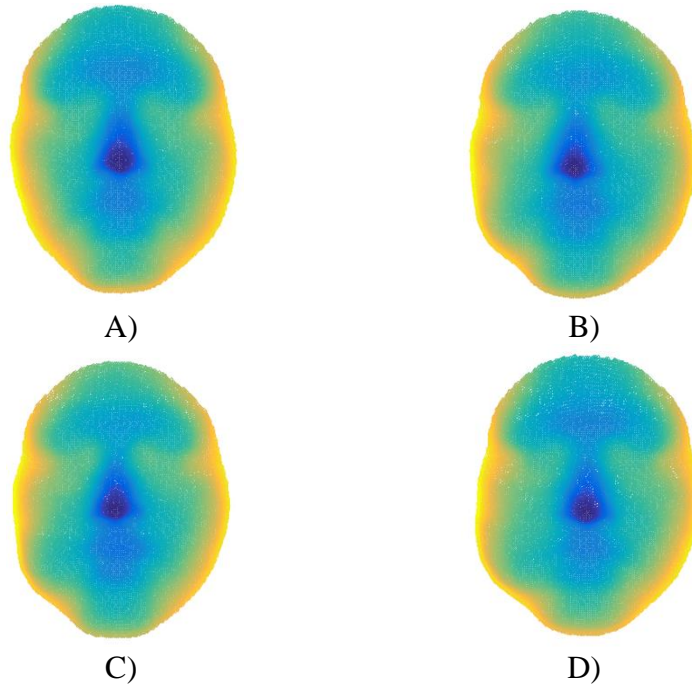


Figura B.11. Nubes de puntos faciales de la interpolación RBF del sujeto 2 de la plataforma Kinect, A) Rostro en reposo, B) Primer asimetría, C) Segunda asimetría y D) Tercer asimetría.

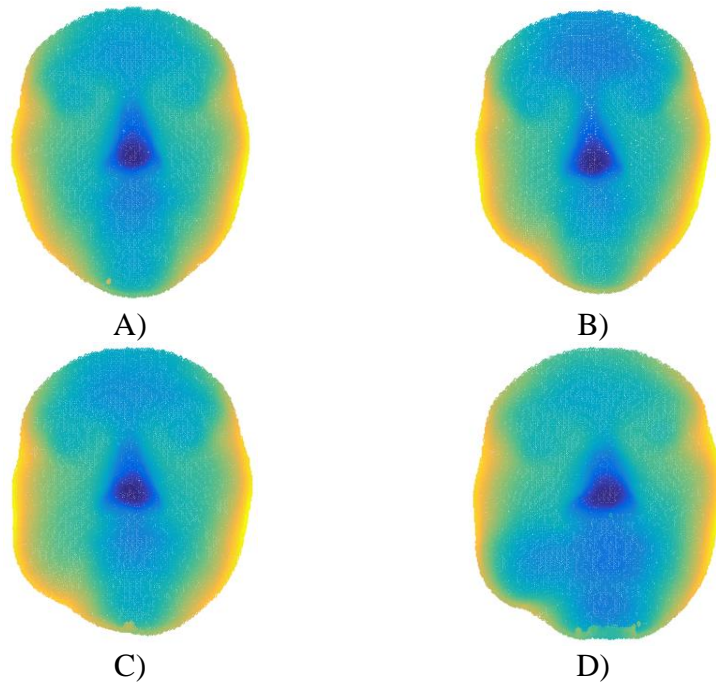


Figura B.12. Nubes de puntos faciales de la interpolación RBF del sujeto 3 de la plataforma Kinect, A) Rostro en reposo, B) Primer asimetría, C) Segunda asimetría y D) Tercer asimetría.

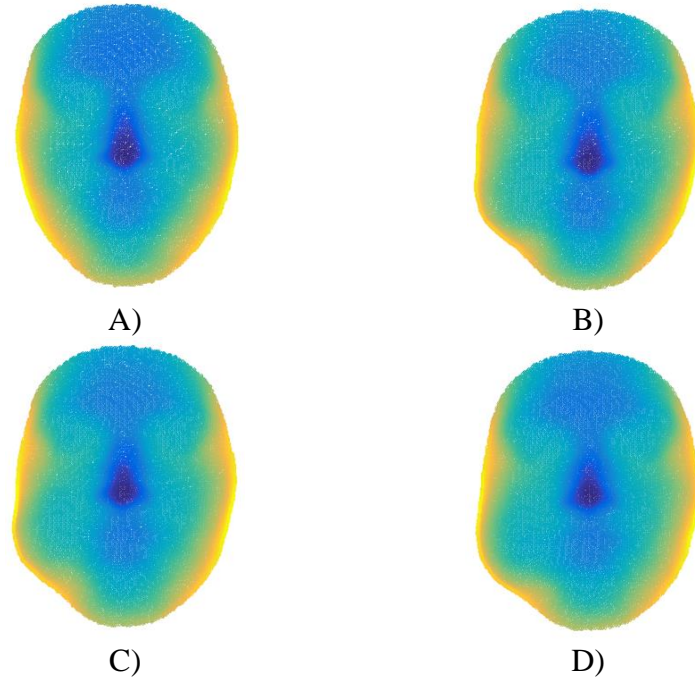


Figura B.13. Nubes de puntos faciales de la interpolación RBF del sujeto 4 de la plataforma Kinect, A) Rostro en reposo, B) Primer asimetría, C) Segunda asimetría y D) Tercer asimetría.

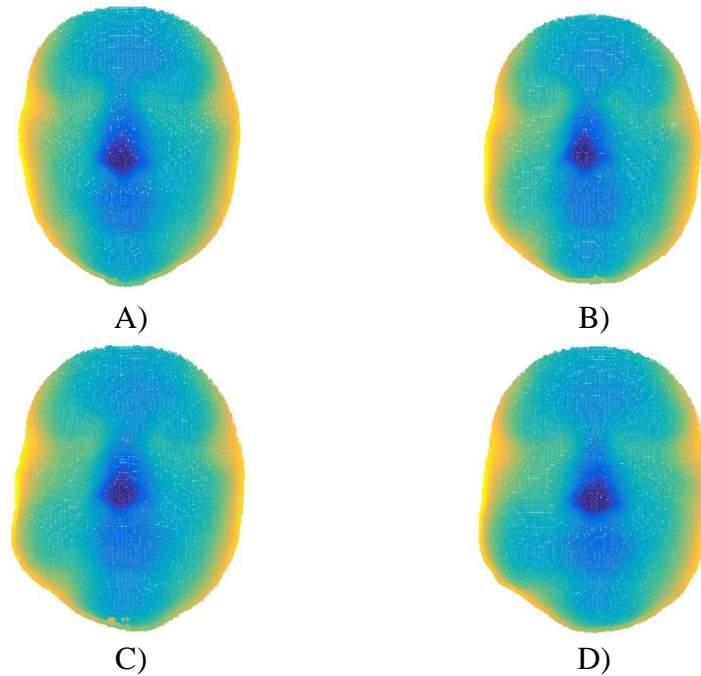


Figura B.14. Nubes de puntos faciales de la interpolación RBF del sujeto 5 de la plataforma Kinect, A) Rostro en reposo, B) Primer asimetría, C) Segunda asimetría y D) Tercer asimetría.

B.2. Determinación de la asimetría facial

Los resultados obtenidos de la determinación de la asimetría facial de las nubes de puntos resultantes de la primera etapa de la metodología se describen en las subsecciones B.2.1.- B.2.3.

B.2.1. Transformación espejo (PCA)

En las Figuras B.15-B.18 se ilustra la transformación espejo de la nube de puntos facial del rostro en reposo y con las tres asimetrías del sujeto 5, que corresponde a uno de los sujetos de genero femenino.

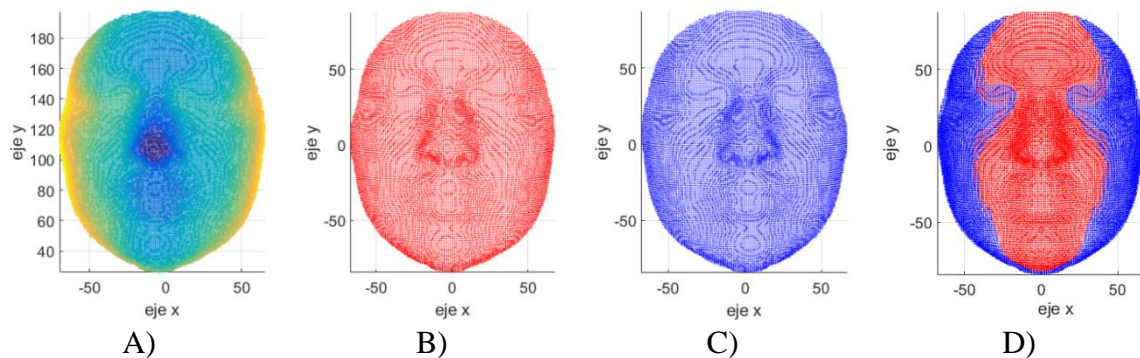


Figura B.15. Transformación espejo de la nube de puntos facial en reposo del sujeto 5, A) Nube de puntos facial, B) Nube de puntos facial transformada al nuevo sistema de coordenadas, C) Nube de puntos reflejo y D) Primera alineación entre la nube de puntos facial y su reflejo.

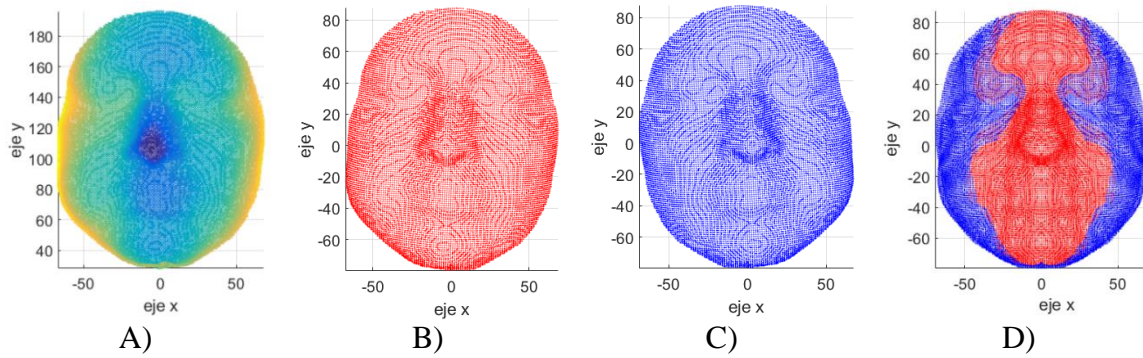


Figura B.16. Transformación espejo de la nube de puntos facial de la primera asimetría del sujeto 5, A) Nube de puntos facial, B) Nube de puntos facial transformada al nuevo sistema de coordenadas, C) Nube de puntos reflejo y D) Primera alineación entre la nube de puntos facial y su reflejo.

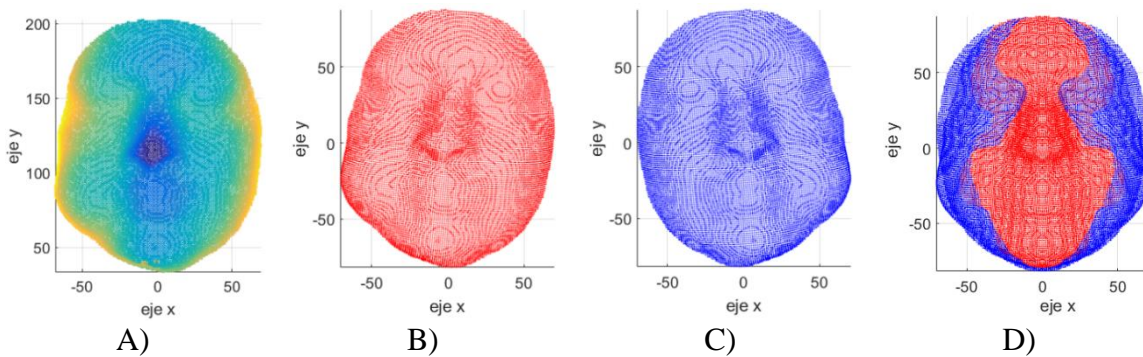


Figura B.17. Transformación espejo de la nube de puntos facial de la segunda asimetría del sujeto 5, A) Nube de puntos facial, B) Nube de puntos facial transformada al nuevo sistema de coordenadas, C) Nube de puntos reflejo y D) Primera alineación entre la nube de puntos facial y su reflejo.

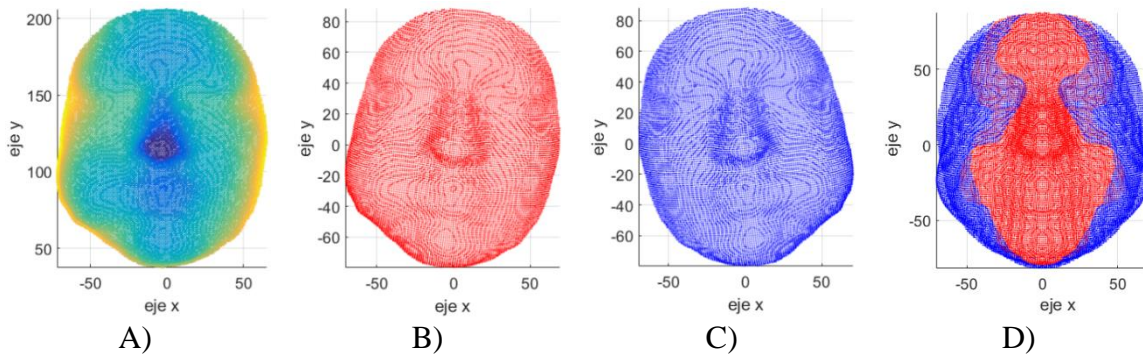


Figura B.18. Transformación espejo de la nube de puntos facial de la tercera asimetría del sujeto 1, A) Nube de puntos facial, B) Nube de puntos facial transformada al nuevo sistema de coordenadas, C) Nube de puntos reflejo y D) Primera alineación entre la nube de puntos facial y su reflejo.

B.2.1. Registro fino (ICP)

De la superposición de las nubes de puntos facial y su reflejo se obtiene el plano de simetría, este es ilustrado en las Figuras B.19.-B.22.

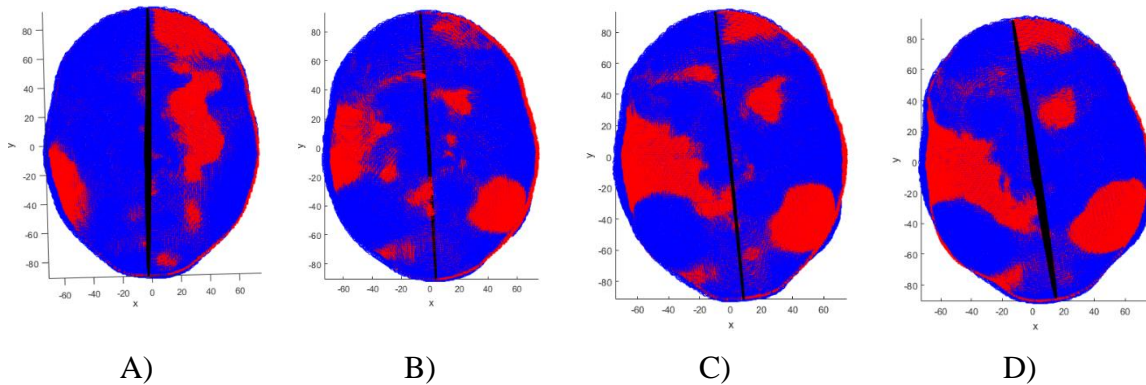


Figura B.19. Puntos medios del registro de forma de la nube de puntos facial y su reflejo del rostro en reposo y con sus tres asimetrías del sujeto 2, A) rostro en reposo, B) Asimetría 1, C) Asimetría 2 y D) Asimetría 3.

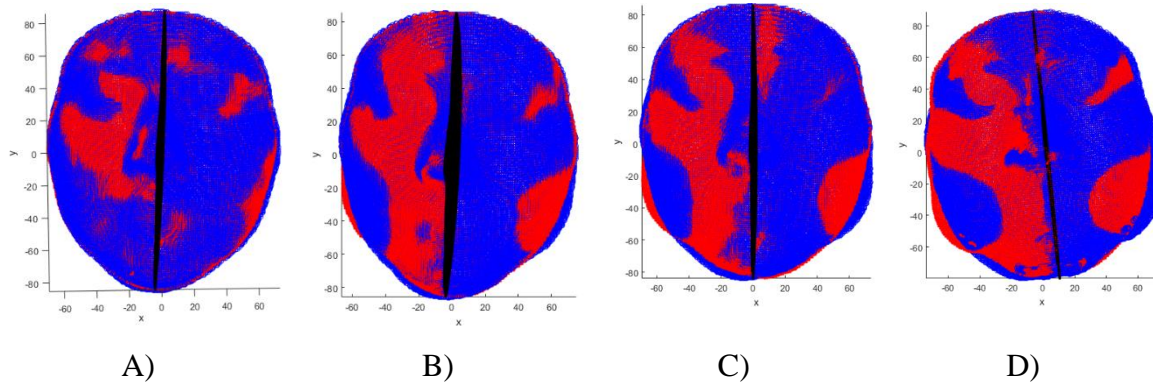


Figura B.20. Puntos medios del registro de forma de la nube de puntos facial y su reflejo del rostro en reposo y con sus tres asimetrías del sujeto 3, A) rostro en reposo, B) Asimetría 1, C) Asimetría 2 y D) Asimetría 3.

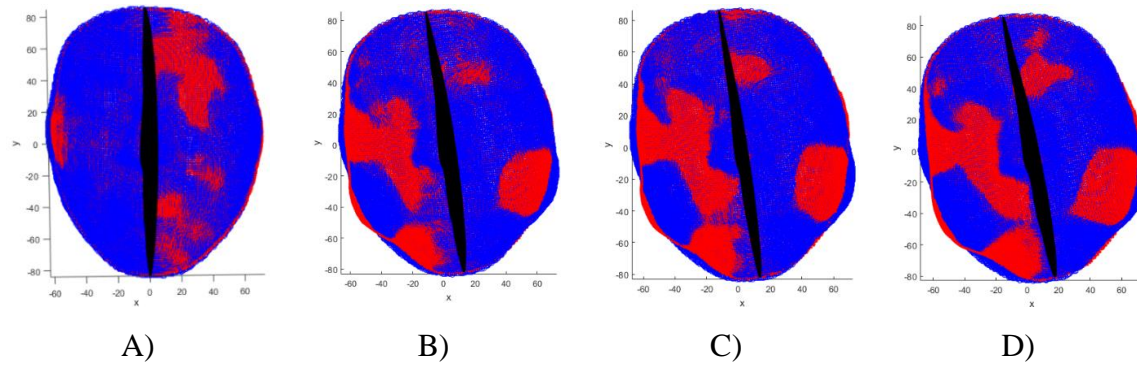


Figura B.21. Puntos medios del registro de forma de la nube de puntos facial y su reflejo del rostro en reposo y con sus tres asimetrías del sujeto 4, A) rostro en reposo, B) Asimetría 1, C) Asimetría 2 y D) Asimetría 3.

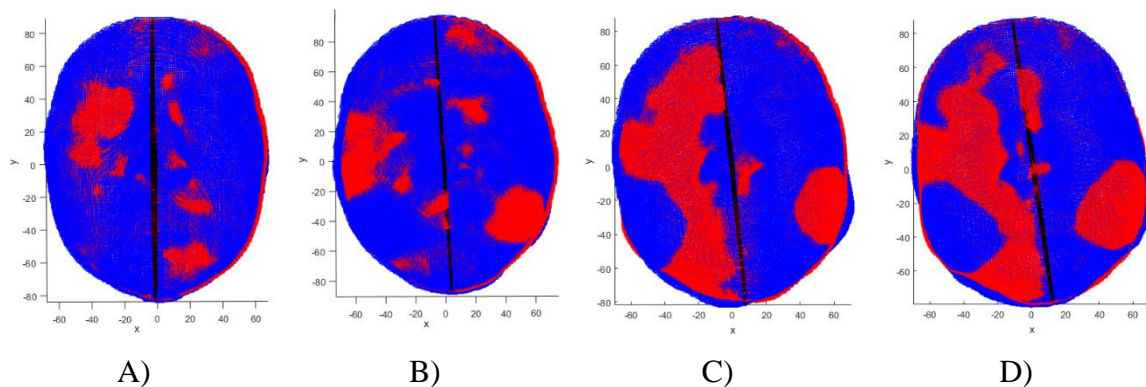


Figura B.22. Puntos medios del registro de forma de la nube de puntos facial y su reflejo del rostro en reposo y con sus tres asimetrías del sujeto 5, A) rostro en reposo, B) Asimetría 1, C) Asimetría 2 y D) Asimetría 3.

B.2.3. Cálculo de distancias entre puntos más cercanos (Kd-tree)

Las Tablas B.1.-B.4. muestran los resultados obtenidos de los valores DP, D Máx., SD y DMA que corresponde al índice de asimetría de los sujetos 2-5.

Tabla B.1. Valores de la asimetría facial del rostro en reposo y con las tres asimetrías del sujeto 2.

Sujeto 2					
Calidad	No. Puntos	DP (mm)	D Máx (mm)	SD	DMA
Rostro en reposo					
Mediana	5,365	1.079	4.036	0.652	0.522
Alta	22,705	0.898	3.965	0.591	0.476
Interp. RBF	79,973	0.816	3.466	0.558	0.431
Asimetría 1					
Mediana	5,773	1.340	6.389	0.945	0.668
Alta	22,750	1.119	5.452	0.946	0.676
Interp. RBF	80,771	0.976	5.585	0.918	0.643
Asimetría 2					
Mediana	5,774	1.783	8.384	1.463	1.037
Alta	22,955	1.573	8.162	1.476	1.076
Interp. RBF	80,605	1.364	7.923	1.455	1.034
Asimetría 3					
Mediana	5,864	1.956	8.503	1.568	1.133
Alta	23,209	1.679	7.953	1.549	1.155
Interp. RBF	52,001	1.462	8.007	1.572	1.152

Tabla B.2. Valores de la asimetría facial del rostro en reposo y con las tres asimetrías del sujeto 3.

Sujeto 3					
Calidad	No. Puntos	DP (mm)	D Máx (mm)	SD	DMA
Rostro en reposo					
Mediana	5,030	1.063	5.493	0.632	0.520
Alta	19,931	0.882	5.018	0.440	0.342
Interp. RBF	81,196	0.651	5.068	0.448	0.353
Asimetría 1					
Mediana	5,071	1.844	6.510	1.026	0.717
Alta	19,988	1.564	6.808	1.094	0.765
Interp. RBF	81,859	1.319	7.418	1.119	0.734
Asimetría 2					
Mediana	5,113	1.865	8.349	1.433	1.026
Alta	20,295	1.735	8.331	1.504	1.073
Interp. RBF	81,913	1.386	8.759	1.419	0.961
Asimetría 3					
Mediana	5,256	2.653	10.079	2.000	1.486
Alta	21,139	2.712	10.608	2.207	1.692
Interp. RBF	82,684	2.137	9.841	1.974	1.500

Tabla B.3. Valores de la asimetría facial del rostro en reposo y con las tres asimetrías del sujeto 4.

Sujeto 4					
Calidad	No. Puntos	DP (mm)	D Máx (mm)	SD	DMA
Rostro en reposo					
Mediana	4,994	1.245	3.689	0.489	0.396
Alta	19,935	0.800	2.501	0.363	0.282
Interp. RBF	81,536	0.654	2.427	0.338	0.226
Asimetría 1					
Mediana	5,083	1.894	8.146	1.410	0.965
Alta	20,216	1.563	7.744	1.457	1.045
Interp. RBF	81,700	1.182	8.185	1.394	0.921
Asimetría 2					
Mediana	5,133	2.215	8.494	1.572	1.136
Alta	20,388	1.913	8.548	1.699	1.287
Interp. RBF	81,251	1.505	8.600	1.612	1.156
Asimetría 3					
Mediana	5,166	2.476	8.621	1.834	1.425
Alta	20,595	2.182	8.487	1.916	1.524
Interp. RBF	81,529	1.770	8.381	1.839	1.382

Tabla B.4. Valores de la asimetría facial del rostro en reposo y con las tres asimetrías del sujeto 5.

Sujeto 5					
Calidad	No. Puntos	DP (mm)	D Máx (mm)	SD	DMA
Rostro en reposo					
Mediana	5,094	1.214	6.692	0.666	0.457
Alta	20,316	0.744	7.174	0.613	0.401
Interp. RBF	82,757	0.621	7.822	0.516	0.338
Asimetría 1					
Mediana	5,155	1.667	6.999	1.135	0.810
Alta	20,537	1.491	6.054	1.116	0.818
Interp. RBF	83,423	1.279	6.689	1.106	0.824
Asimetría 2					
Mediana	5,162	2.168	7.974	1.492	1.077
Alta	20,771	2.031	7.814	1.548	1.173
Interp. RBF	82,131	1.743	7.979	1.498	1.114
Asimetría 3					
Mediana	5,224	2.525	9.177	1.790	1.372
Alta	20,909	2.295	8.482	1.840	1.492
Interp. RBF	80,310	1.951	8.880	1.763	1.381

Los resultados de las Tablas B.1.-B.4. muestran que el valor DMA obtenido en el rostro de cada uno de los sujetos tiene variaciones provocadas por el número de puntos que contiene la nube de puntos facial. Estas variaciones van en decremento conforme la densidad de la nube de puntos se incrementa.

Los valores del DMA de las Tablas B.1.-B.4. va en incremento en cada una de las asimetrías realizadas en el rostro, siendo el valor menor de DMA el correspondiente al rostro en reposo y el valor mayor DMA el de la tercera asimetría.

Los resultados de los rostros de los sujetos femeninos que se muestran en las Tablas B.2.- B.4. muestran que el valor del DMA obtenido del rostro con la primera asimetría es mayor en comparación con el sujeto masculino cuyos resultados se muestran en la Tabla B.1.

C.1. Generación de una nube de puntos densa

Con las tres nubes de puntos faciales resultantes de la plataforma Sense 3D se continua el desarrollo de la etapa para generar una nube de puntos densa en el presente Apéndice. Debido a la limitante presentada por la plataforma se realizaron pruebas con los rostros de maniquí de unicef para poder comparar un rostro sano y un rostro con asimetrías.

C.1.1. Interpolación RBF

Las nubes de puntos de la región facial de los rostros de los maniquís y de los sujetos sanos fueron interpolados a través de la interpolación RBF con la función de base radial gaussiana. Esto permitió obtener un incremento en la densidad de la nube de puntos facial en diversos porcentajes, con el objetivo disminuir las distancias entre las vecindades de los puntos de la nube de puntos facial y su reflejo, además de generar una distribución uniforme para el análisis de asimetría facial.

El porcentaje de incremento en la densidad de la nube de puntos de la región facial de los maniquís y los sujetos sanos fue de 100%, 1,000% y 2,000%. El porcentaje de 100%, fue seleccionado, para evaluar el impacto que se tenía en la determinación de la asimetría facial al incrementar la densidad de la nube de puntos facial al doble. El incremento de 1,000%, se seleccionó con base a lo indicado en la literatura. El incremento a 2,000% se realizó para evaluar el impacto sobre la determinación de la asimetría en una nube con una densidad cercana a los 100,000 puntos, esta densidad fue observada en las nubes de puntos de sensores de gama alta.

La interpolación RBF fue realizada a través de una red RBF, los resultados obtenidos se almacenaron en archivos de matrices del sistema Matlab con nombres que indicaban el número de maniquí o sujeto y el porcentaje de interpolación. Los resultados gráficos de la interpolación RBF se ilustran en las Figuras C.1.-C.3., en esta se puede observar la nube de

puntos de la región facial inicial de los sujetos sanos y sus tres interpolaciones, en cada una de las imágenes se observa una diferencia gráfica del incremento en la densidad de puntos de cada una.

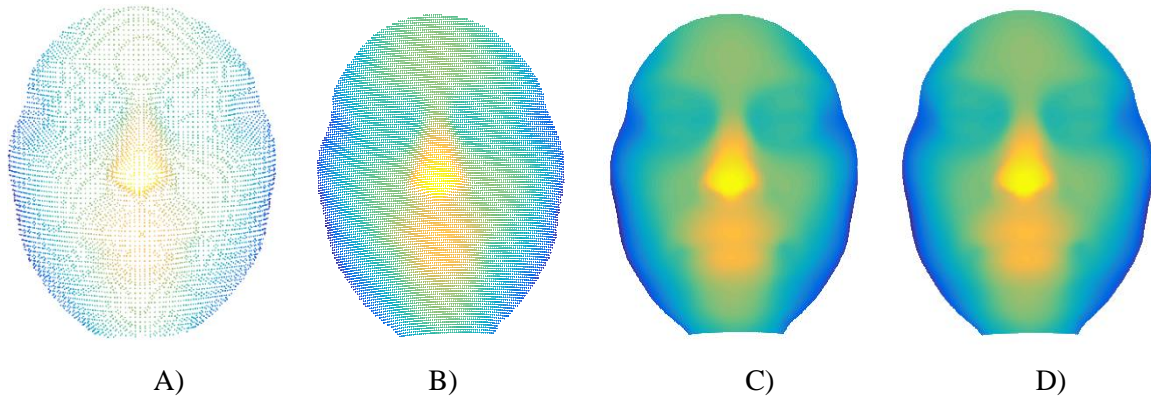


Figura C.1. Interpolación RBF Sujeto 1, A) Nube de puntos facial inicial, B) Interpolación del 100%, C) Interpolación del 1,000% y D) Interpolación de 2,000%.

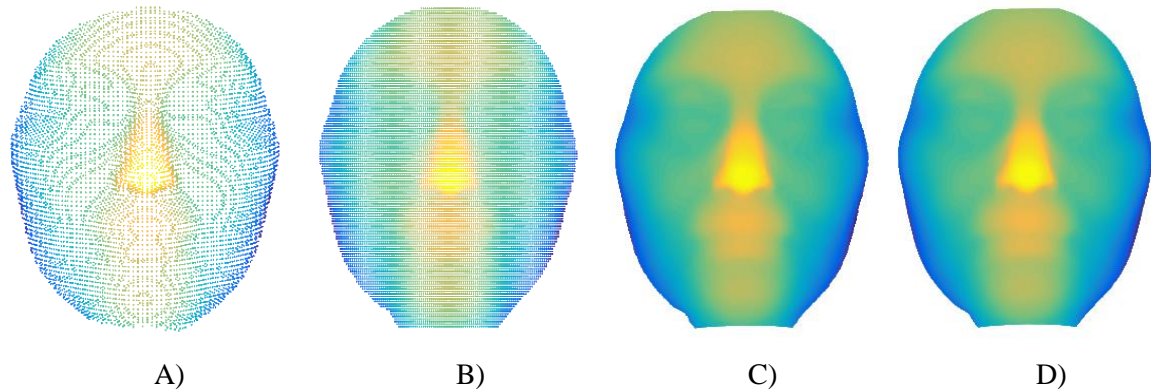


Figura C.2. Interpolación RBF Sujeto 2, A) Nube de puntos facial inicial, B) Interpolación del 100%, C) Interpolación del 1,000% y D) Interpolación de 2,000%.

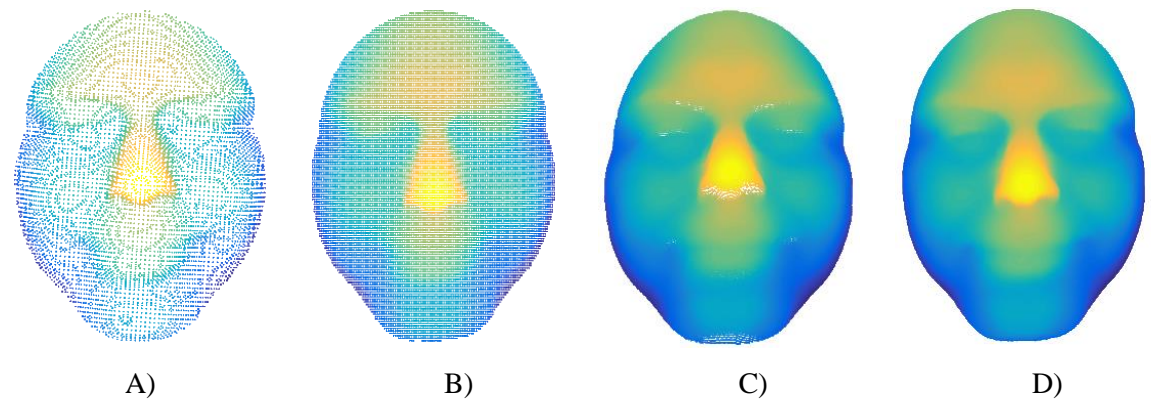


Figura C.3. Interpolación RBF Sujeto 3, A) Nube de puntos facial inicial, B) Interpolación del 100%, C) Interpolación del 1,000% y D) Interpolación de 2,000%.

Los resultados de la interpolación de las nubes de puntos de la región facial de los maniquís y de los sujetos sanos se muestran en la Tabla C.1. En esta se indica el promedio de los números interpolados con los diversos porcentajes de incremento en la densidad de puntos, de los cuatro maniquís y de los tres sujetos con el rostro en reposo y sonriendo.

El total de nubes de puntos faciales, resultantes de la interpolación RBF fue de 40 estas serán procesadas para calcular su asimetría facial en la siguiente subsección.

Tabla C.1. Resultados de la interpolación RBF de las nubes de puntos faciales de los maniquís y de los sujetos sanos.

Región facial	Número de puntos interpolados		
	100%	1,000%	2,000%
Maniquí	9,200	46,534	92,560
Sujeto 1	12,853	66,427	136,012
Sujeto 2	13,023	66,971	137,581
Sujeto 3	14,341	74,941	147,571

C.2. Determinación de la asimetría facial

Los resultados obtenidos de la determinación de la asimetría facial de las nubes de puntos resultantes de la primera etapa de la metodología se describen en las subsecciones C.2.1.- C.2.3.

C.2.1 Transformación espejo (PCA)

De cada una de las nubes de puntos faciales iniciales e interpoladas de los maniquís y de los sujetos sanos, se obtuvo su transformación espejo. El primer paso consistió en obtener los componentes principales de la nube de puntos facial a través de PCA. Con los

componentes principales obtenidos se generó un nuevo sistema de coordenadas donde el vector propio del componente principal representa al eje y , esto debido a que el rostro es más largo que ancho, el vector propio del segundo componente principal representa al eje x y el vector normal al eje z . El nuevo sistema de coordenadas, de las nubes de puntos faciales de los sujetos sanos se ilustran en las Figuras C.4.- C.6.

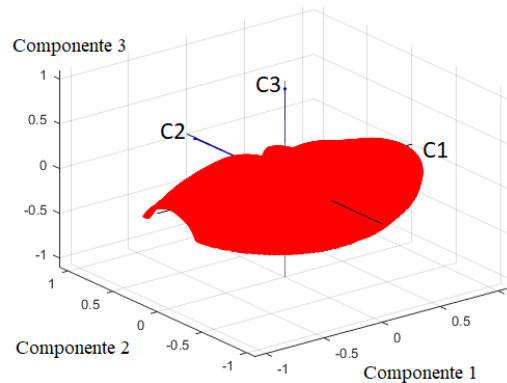


Figura C.4. Nuevo sistema de coordenadas resultante de PCA del Sujeto 1.

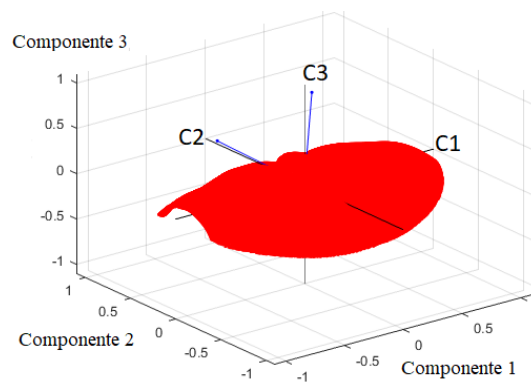


Figura C.5. Nuevo sistema de coordenadas resultante de PCA del Sujeto 2.

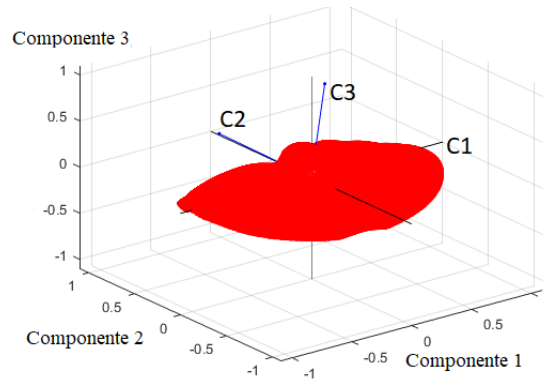


Figura C.6. Nuevo sistema de coordenadas resultante de PCA del Sujeto 3.

Se realizó una transformación de la nube de puntos facial al nuevo sistema de coordenadas obtenido de PCA, donde el nuevo plano yz se consideró como plano espejo y se realizó una reflexión de la nube de puntos facial para obtener la nube de puntos reflejo, como resultado se obtuvo una primera alineación entre ambas nubes de puntos. En las Figuras C.7.-C.9. se ilustran en el inciso A) la nube de puntos facial transformada en el nuevo sistema de coordenadas, en el inciso B) la nube de puntos reflejo en el plano yz del nuevo sistema de coordenadas y en el inciso C) la primera alineación entre la nube de puntos facial y la nube de puntos reflejo, esto permitió que las nubes de puntos quedaran superpuestas como se observa en la imagen. Las nubes de puntos de las Figuras C.7-C.9 corresponden al resultado de la transformación espejo de los sujetos sanos con el rostro en reposo.

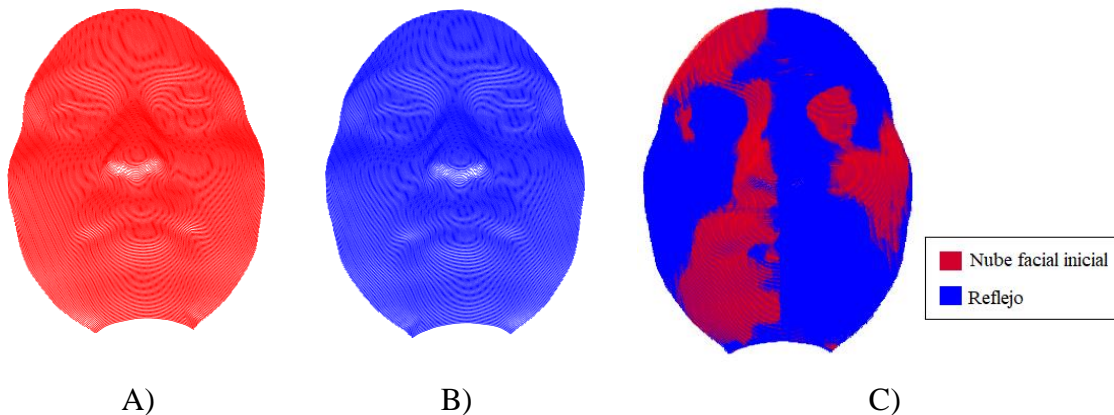


Figura C.7. Sujeto 1, A) Nube de puntos facial transformada al sistema de coordenadas resultante de PCA, B) Nube de puntos reflejo, C) Primer alineación entre la nube de puntos facial y su reflejo.

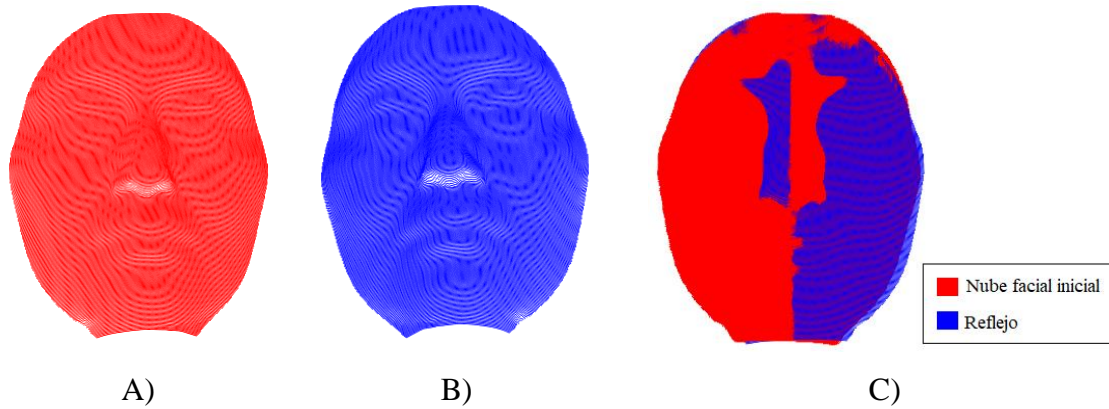


Figura C.8. Sujeto 2, A) Nube de puntos facial transformada al sistema de coordenadas resultante de PCA, B) Nube de puntos reflejo, C) Primer alineación entre la nube de puntos facial y su reflejo.

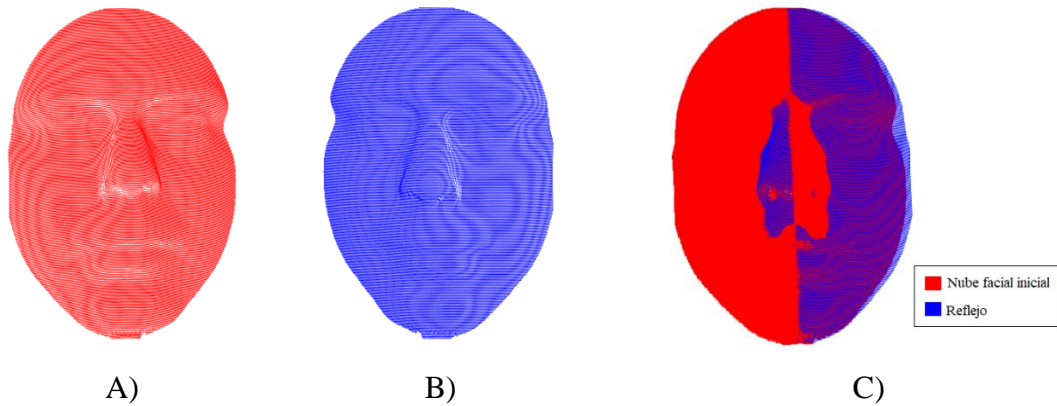


Figura C.9. Sujeto 3, A) Nube de puntos facial transformada al sistema de coordenadas resultante de PCA, B) Nube de puntos reflejo, C) Primer alineación entre la nube de puntos facial y su reflejo.

La primera alineación entre la nube de puntos facial y su reflejo dan como resultado un primer plano de simetría que se ilustra en la Figura B.10. En la Figura B.10. se observa los planos de simetría de las nubes de puntos faciales de los sujetos con el rostro en reposo, representados por la línea roja. Los planos de simetría de las nubes de puntos, cuya forma del rostro es simétrica, se encuentran en el centro de éste, sin embargo, cuando el contorno de la nube de puntos del rostro presenta asimetrías entre ambos lados el plano de simetría no coincide con el centro del rostro.

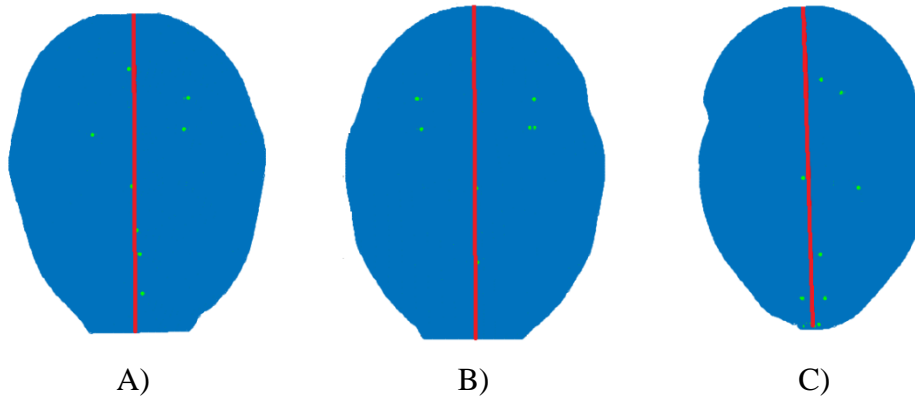


Figura C.10. A) Primer plano de simetría, sujeto 1, B) Primer plano de simetría, sujeto 2, C) Primer plano de simetría, sujeto 3.

C.2.2. Registro fino (ICP)

El registro fino se realiza a través del algoritmo ICP, este fue implementado como un algoritmo de fuerza bruta, esto indica que se emplean todos los puntos de la nube de puntos de la región facial y su reflejo para buscar sus puntos más cercanos y realizar la rotación y traslación correspondiente.

Las Figuras C.11.-C.13. ilustran los resultados del registro de forma con el algoritmo ICP. La primera imagen observada en las Figuras C.11.-C.13. corresponde a la primera superposición de las nubes de puntos que se obtuvo como resultado de la transformación espejo, en esta se puede observar la mezcla de dos colores, el color rojo corresponde a la nube de puntos facial y el color azul al reflejo, si el rostro del sujeto fuese simétrico la imagen se vería de un solo color debido a que todos los puntos coincidirían. Sin embargo, se puede observar que existen puntos que resaltan entre ambas nubes, esto es provocado por las asimetrías existentes en ambos lados del rostro. Las diferencias son más notables en la superposición de las nubes de puntos obtenida de PCA en comparación con la superposición de las nubes de puntos resultante del algoritmo ICP, esto sucede porque el resultado de PCA es considerado un registro grueso y su objetivo es generar una primera alineación entre las nubes para que el algoritmo ICP converja y se genere un registro fino entre ambas imágenes, mostrando las asimetrías existentes en el rostro.

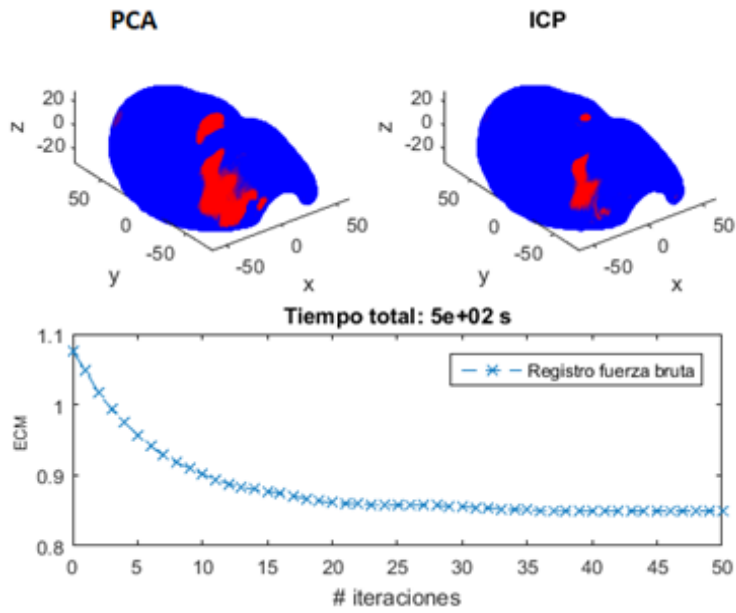


Figura C.11. Registro de forma algoritmo ICP, sujeto 1.

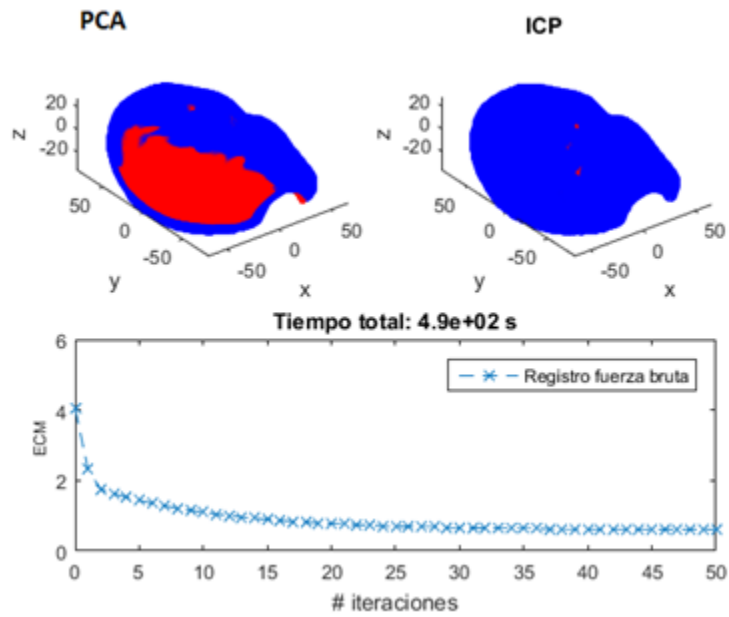


Figura C.12. Registro de forma algoritmo ICP, sujeto 2.

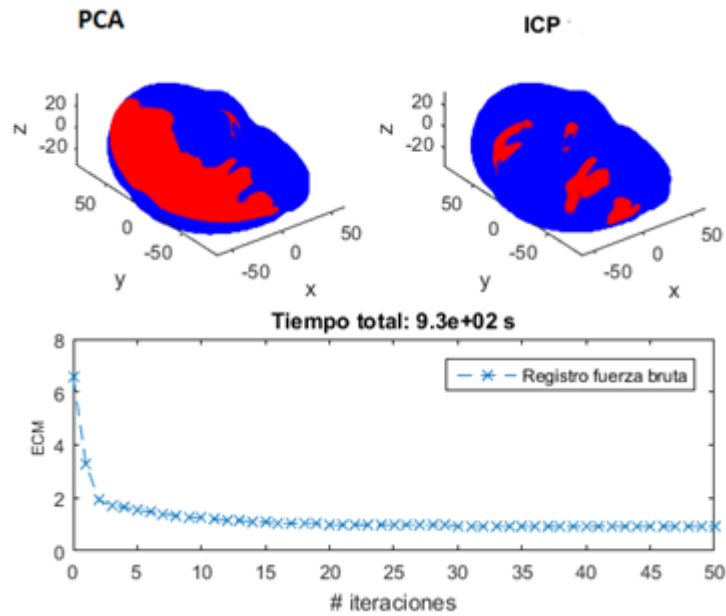


Figura C.13. Registro de forma algoritmo ICP, sujeto 3.

Después de realizar el registro fino entre la nube de puntos facial y su reflejo, se puede obtener el plano de simetría del rostro, a través de los puntos medios de ambas nubes de puntos. La Figura B.14. ilustra las nubes de puntos facial y reflejo superpuestas, el color azul corresponden a los puntos de la nube reflejo y el color verde a los puntos de la nube facial, el plano de simetría de cada rostro es representado por la línea roja.

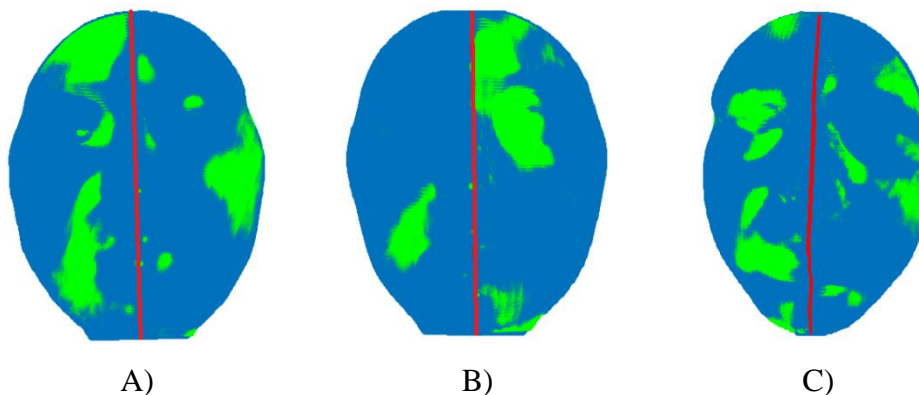


Figura C.14. A) Plano de simetría, sujeto 1, B) Plano de simetría, sujeto 2, C) Plano de simetría, sujeto 3.

C.2.3. Cálculo de la distancia euclidiana entre los puntos más cercanos (Kd-tree)

La primera prueba realizada del análisis de asimetría, fue la prueba de comprobación en la cual se utilizaron las nubes de puntos de las regiones faciales iniciales e interpoladas, de los dos grupos de maniquís con el rostro simétrico y el rostro asimétrico. De las distancias euclidianas obtenidas se calcularon la distancia promedio (DP), la máxima distancia obtenida (D Máx.), la desviación estándar (DS) y la desviación media absoluta (DMA), la cual como indica el estado del arte es el índice de asimetría, los resultados obtenidos de esta primera prueba se muestran en la Tabla C.2.

Tabla C.2. Análisis cuantitativo de la asimetría facial de las nubes de puntos de los maniquís simétricos en comparación de las nubes de puntos de los maniquís asimétricos.

	Maniquís rostros simétricos				Maniquís rostros asimétricos			
	DP (mm)	D Máx. (mm)	SD	DMA	DP (mm)	D Máx. (mm)	SD	DMA
N. Inicial	0.792	2.163	0.447	0.316	1.061	3.110	0.470	0.355
Interp. 100%	0.592	2.072	0.333	0.251	0.721	3.061	0.445	0.329
Interp. 1,000%	0.417	1.710	0.230	0.173	0.534	2.743	0.362	0.263
Interp. 2,000%	0.378	1.768	0.230	0.175	0.502	2.716	0.372	0.273

Los resultados de la Tabla C.2 muestran valores más altos de asimetría facial en las nubes de puntos con menor densidad, estos valores se van reduciendo conforme se va incrementando la densidad en las nubes de puntos, esto debido a que la coincidencia entre los puntos de la nube facial inicial y su reflejo se realiza uno a uno, provocando que las distancias entre estos se reduzcan y se muestren las asimetrías reales que existen entre ambos lados del rostro.

Los valores de asimetría que se presentan en la Tabla C.2., muestran que los rostros simétricos de los maniquís en comparación con los rostros asimétricos tienen un valor de DMA menor, por lo que se puede comprobar que el método distingue asimetrías.

Después de haber finalizado las pruebas con los rostros de los maniquís se procedió a calcular la simetría facial de los rostros de los tres sujetos sanos en reposo y sonriendo con la boca cerrada, como se realizó en la prueba de los maniquís se calcularon las distancias euclidianas de los puntos más cercanos entre ambas nubes de puntos. Con las distancias obtenidas se calcularon los valores DP, D Máx., DS y DMA, como en la prueba anterior. Los resultados de estas pruebas se muestran de forma independiente por cada sujeto en las Tablas C.4.-C.6.

Las Tablas C.3.-C.5., contienen los resultados de los valores de asimetría de las nubes de puntos iniciales e interpoladas de los rostros de los tres sujetos en reposo en comparación con las nubes de puntos de sus rostros sonriendo con la boca cerrada. En las Tablas C.3.-C.5 se puede observar el valor DMA, que corresponde al índice de asimetría, en el caso de los tres sujetos este valor es mayor cuando el sujeto realiza una sonrisa con la boca cerrada.

Los resultados de las Tablas C.3.-C.4., muestran que la asimetría facial de los rostros de los sujetos sanos en reposo es más pequeña en comparación a los rostros en movimiento. El incremento en la densidad de puntos del 100% de la nube de puntos en el caso de los sujetos sanos, muestra una reducción en la asimetría del rostro. Sin embargo, los incrementos en la densidad de la nube de puntos del 1,000% y 2,000% experimentan un incremento en la asimetría del rostro, este comportamiento lo presentan los rostros en reposo y en movimiento de los tres sujetos.

Tabla C.3. Análisis cuantitativo de la asimetría facial del rostro del sujeto sano 1 en reposo en comparación con su rostro en movimiento.

	Rostro sujeto 1 en reposo				Rostro sujeto 1 en movimiento			
	DP (mm)	D Máx. (mm)	SD	DMA	DP (mm)	D Máx. (mm)	SD	DMA
N. Inicial	1.105	3.221	0.458	0.366	0.973	3.822	0.484	0.377
Interp. 100%	0.917	3.482	0.439	0.347	0.792	3.560	0.549	0.450
Interp. 1,000%	0.699	2.377	0.446	0.360	0.681	3.790	0.507	0.401
Interp. 2,000%	0.659	2.326	0.438	0.360	0.643	3.757	0.523	0.415

Tabla C.4. Análisis cuantitativo de la asimetría facial del rostro del sujeto sano 2 en reposo en comparación con su rostro en movimiento.

Interp.	Rostro sujeto 2 en reposo				Rostro sujeto 2 en movimiento			
	DP (mm)	D Máx. (mm)	SD	DMA	DP (mm)	D Máx. (mm)	SD	DMA
N. Inicial	0.878	2.055	0.399	0.304	0.950	3.849	0.375	0.296
Interp. 100%	0.720	2.226	0.329	0.245	0.830	2.429	0.349	0.268
Interp. 1,000%	0.519	1.855	0.325	0.248	0.656	2.402	0.355	0.290
Interp. 2,000%	0.479	1.968	0.334	0.258	0.622	2.358	0.359	0.297

Tabla C.5. Análisis cuantitativo de la asimetría facial del rostro del sujeto sano 3 en reposo en comparación con su rostro en movimiento.

Interp.	Rostro sujeto 3 en reposo				Rostro sujeto 3 en movimiento			
	DP (mm)	D Máx (mm)	SD	DMA	DP (mm)	D Máx (mm)	SD	DMA
N. Inicial	1.122	4.357	0.491	0.367	1.128	3.388	0.548	0.412
Interp. 100%	0.877	4.183	0.516	0.390	0.979	3.334	0.564	0.428
Interp. 1,000%	0.686	4.216	0.527	0.400	0.735	3.344	0.582	0.445
Interp. 2,000%	0.649	4.149	0.528	0.403	0.706	3.345	0.584	0.449

Los resultados obtenidos en el trabajo de Meyer- Marcotty et al. [18] referente a la asimetría facial muestran un promedio del valor DMA de 0.59 del rostro completo de sujetos sanos y de 0.87 en pacientes. En los resultados de la metodología desarrollada se obtuvo un promedio del valor de DMA de 0.355 en las nubes de puntos interpoladas al 2,000% de los rostros de los sujetos sanos y un promedio de 0.371 en los rostros con movimiento. En comparación con los resultados de Meyer- Marcotty et al. [18] los resultados obtenidos indican que los rostros de los tres sujetos se encuentran dentro del rango.

Las imágenes faciales adquiridas con la plataforma del sensor Sense 3D no presentaban asimetrías que rebasaran los límites de una asimetría normal considerando los valores de Meyer- Marcotty et al. [18].