

UNIVERSIDAD REY JUAN CARLOS

DEPARTAMENTO DE ARQUITECTURA Y TECNOLOGÍA DE
COMPUTADORES, CIENCIAS DE LA COMPUTACIÓN E
INTELIGENCIA ARTIFICIAL



Verificación facial multimodal: 2D y 3D

Tesis Doctoral

Cristina Conde Vilda
Licenciada en Ciencias Físicas

Abril 2006

UNIVERSIDAD REY JUAN CARLOS

(MENCIÓN DE DOCTORADO EUROPEO)

Verificación facial multimodal: 2D y 3D

Tesis Doctoral

Autora: Cristina Conde Vilda

Licenciada en Ciencias Físicas

Director: Enrique Cabello Pardos

Doctor Licenciado en Ciencias Físicas

DEPARTAMENTO DE ARQUITECTURA Y TECNOLOGÍA
DE COMPUTADORES, CIENCIAS DE LA COMPUTACIÓN E
INTELIGENCIA ARTIFICIAL

Abril 2006

Mediante la presenta autorizo a Doña Cristina Conde Vilda a que realice la defensa de la Tesis Doctoral titulada “Verificación facial multimodal: 2D y 3D”, que ha desarrollado bajo mi supervisión entre los años 2002-2006.

Firmado,

En Móstoles, 30 de Marzo de 2006

Dr. D. Enrique Cabello Pardos
Profesor Titular de Escuela Universitaria.
Departamento de Arquitectura y Tecnología de Computadores, Ciencias de la
Computación e Inteligencia Artificial.
Universidad Rey Juan Carlos.

A mis padres: José María y M^a Pilar

Agradecimientos

Hace casi cinco años tomé una decisión alocada pero bien meditada: dejar mi carrera en la empresa privada y probar suerte en el mundo universitario. Tras años de trabajo duro, pero siempre con la seguridad de haber acertado en mi apuesta, he terminado mi tesis doctoral. Ha sido éste un trabajo personal, pero en modo alguno solitario, ya que he contado con la ayuda y cariño de muchas personas.

Quisiera agradecer a Enrique Cabello el estar siempre ahí, no sólo como director de tesis, sino también como amigo. A Jorge Pérez y Raquel Montes por su excelente trabajo y colaboración. A Licesio J. Rodríguez Aragón y Ángel Serrano, compañeros del FRAV. Quisiera nombrar también a mis compañeros de la División de Arquitectura y Tecnología de Computadores de la Universidad Rey Juan Carlos, que siempre han respondido cuando he necesitado algo: Luis Pastor, Oscar Robles, José San Martín, Susana Mata, Luis Rincón, Jose Luis Bosque , Pablo Toharia, Sofía Bayona, Marcos García, José Igancio Martínez, Pablo Huerta, Javier Castillo, David Miraut, Carolina Gómez, Ángela Mendoza, Marta Beltrán y Antonio Guzmán.

Finalmente, quisiera dar las gracias también a mis padres. Sin su apoyo incondicional, sacrificio y su confianza en mí, nunca podría haber llevado a cabo mi formación. A ellos está dedicada esta tesis. A David, por compartir el camino conmigo y brindarme su amor y ánimo en los momentos de dudas. A mi gemela Fany, por su alegría y apoyo. A mis hermanos Carlos y Josechu, siempre dispuestos a darme un buen consejo. A mis sobrinos: Sergio, Nuria y Lucía. Ellos son ese soplo de aire fresco juguetón que todos necesitamos.

Resumen

Durante la segunda mitad del siglo XX, surgieron distintas técnicas diseñadas para reconocer a los individuos a partir de su imagen facial, es decir, información bidimensional. En los últimos años, han aparecido sensores capaces de adquirir no sólo la información bidimensional de textura, sino también la forma de la cara, la información tridimensional.

En la presente tesis doctoral se realiza una comparación de la capacidad de reconocimiento facial de ambos tipos de información: 2D y 3D. Para ello, se han diseñado tres sistemas verificadores diferentes, basados en distintas características físicas de acuerdo al tipo de información que tratan: imagen de textura (2D), imagen de profundidad (2.5D) y mallado tridimensional (3D). Los verificadores 2D y 2.5D se basan en la técnica de Análisis de Componentes Principales y la clasificación se realiza mediante Máquinas de Vectores Soporte. El verificador 3D se basa en la medida del ajuste de superficies faciales mediante el algoritmo *Iterative Closest Point*.

Una de las principales ventajas del uso de información tridimensional es la posibilidad de realizar un proceso de normalización de los datos, para corregir giros faciales y correcciones en escala. Se han diseñados tres métodos diferentes de normalización facial automática: un método local basado en la segmentación de la superficie facial en función del valor de la curvatura media y gaussiana; un método también local, basado en la caracterización de puntos mediante *Spin Images* y una posterior clasificación de éstas mediante Máquinas de Vectores Soporte; un método global basado en el cálculo de diferentes planos de regresión a partir del mallado tridimensional.

Finalmente, se han fusionado los dos tipos de información 2D y 3D, para aprovechar las ventajas de cada una de ellas, obteniendo un sistema híbrido que mejora los verificadores individuales. La fusión se realiza a la altura del módulo de decisión del sistema, realizando una combinación lineal de las salidas o *scores* de cada uno de los clasificadores utilizados.

Abstract

During the second half of the 20th century, different techniques designed to recognize people from his facial aspect appeared, usually from the texture information, by the bi-dimensional data. Over the last few years new sensors capable to acquire three-dimensional information has arisen, and it is possible to capture the geometry of the face in an effective way.

One of the principal advantages using 3D information is the possibility of correcting faces in pose on the space. This process is called normalization. Three different automatic normalization methods have been designed: a local one based on the segmentation of the surface by the mean and Gaussian curvature; a local method to find the feature points in the face by a characterization of the points using the Spin Images technique, and a posterior classification by Support Vector Machines; and finally a global method that correct the pose of the face calculating several regression planes from the 3D mesh.

In the current PhD a comparison between the capability of face verification using 2D and 3D information is done. In order to carry out this task three different face verification systems have been developed, designed to verify the identity of a person using different characteristics according the data: texture image (2D), range image (2.5D) and a 3D mesh. 2D and 2.5D verifiers are based on the Principal Component Analysis technique and a Support Vector Machine classifier. The 3D verifier measures the alignment of two facial surfaces after applying the Iterative Closest Point algorithm.

Finally, a fusion of the 2D and 3D information has been done, obtaining a hybrid system that takes advantage of each kind of data. This system obtains better results than each individual verifier. The fusion is done at decision level, by a linear combination of the classifier scores.

INDICE

Capítulo 1. Introducción	1
1.1.- Introducción y motivación.	1
1.2.- Objetivos de la tesis	3
1.3.- Planteamiento del problema y solución propuesta.....	5
1.4.- Dificultades esperadas al problema.....	6
1.5.- Estructura de la memoria.	7
Capítulo 2. Antecedentes.	9
2.1.-Introducción a los Sistemas Biométricos.	9
2.2.- Bases de Datos Tridimensionales.....	13
2.2.1.- Bases de Datos Tridimensionales disponibles.....	14
2.3.- Normalización Facial Tridimensional.....	22
2.4.- Reconocimiento Facial en 3D.	33
2.4.1. Métodos basados en características superficiales	39
a) Métodos Locales:.....	39
b) Métodos Globales:.....	40
2.4.2. Métodos basados en comparación con una plantilla.....	43
2.4.3. Otros métodos	44
2.5.- Fusión de datos biométricos.....	46
Capítulo 3. Creación de la Base de Datos FRAV3D.....	53
3.1.- Adquisición de la Base de Datos FRAV3D.	54
3.2.- Problemas en la Adquisición.....	60
Capítulo 4. Normalización Facial Automática.....	63
4.1.- Introducción.....	63
4.2.- Normalización mediante curvaturas.....	65
4.3.- Normalización mediante Spin Images.....	72
4.3.1. Introducción a las Spin Images.	72
4.3.2. Localización de los puntos característicos mediante Spin Images.....	77
Paso 1: Localización de la punta de la nariz	78
Paso 2: Selección de las áreas candidatas a contener los ojos: cálculo de curvaturas.	81
Paso 3: Localización de los ojos mediante Spin Images.....	84
Paso 4: Normalización Facial mediante puntos característicos.....	86
4.3.3. Resultados Experimentales.....	89
4.3.4 Influencia de la resolución de las Spin Images.....	91

4.4 .- Normalización global.....	92
4.5.- Cálculo del mapa de profundidad óptimo	95
Capítulo 5. Verificación facial 2D, 2.5D y 3D	103
5.1.- Introducción	103
5.2.- Verificación facial 2D: textura.....	105
5.2.1.- Sistema desarrollado.....	105
5.2.2.- Pruebas realizadas y resultados experimentales	107
5.3.- Verificación facial 2.5D: Imagen de rango	111
5.3.1.- Influencia de la ecualización	112
5.3.2.- Influencia de la normalización	116
5.3.3.- Influencia del tamaño de la imagen de rango	119
5.3.4.- Influencia de la resolución en profundidad de la imagen de rango	121
5.4.- Verificación facial 3D: ICP.....	123
5.4.1.- Algoritmo ICP	125
5.4.3.- Resultados Experimentales.....	130
5.5.- Comparación de Resultados.....	132
Capítulo 6. Fusión de datos 2D, 2.5D y 3D	135
6.1.- Descripción de la fusión.....	135
6.2.- Resultados experimentales	139
6.2.1. Fusión 2D + 2.5D.....	141
6.2.2. Fusión 2.5D + 3D.....	142
6.2.3. Discusión de los resultados.....	146
Capítulo 7. Conclusiones. Líneas de Investigación Futuras.....	149
7.1.- Descripción del capítulo.....	149
7.2.- Aportaciones de la tesis.....	149
7.3.- Conclusiones	151
7.3.1. Creación BBDD Multimodal FRAV3D.....	151
7.3.2. Normalización Automática de Caras en 3D.....	152
7.3.3. Verificación Facial 2D, 2.5D y 3D.	153
7.3.4. Fusión de Verificadores.	154
7.4.- Líneas Futuras	155

Anexo A. Cálculo Automático del Umbral de Aceptación óptimo en un sistema de Verificación Facial.....	165
A.1.- Sistema de Verificación Facial.....	166
A.2.-Cálculo del Umbral de Aceptación Óptimo.	167
A.2.1. Diseño del Cribado.....	167
A.2.2. Umbral de Aceptación Óptimo	167
A.3.- Resultados.	169
A.4.- Discusión.....	173
Anexo B. Paralelización de la Verificación Facial 3D.....	175
Anexo C. Resultados Experimentales Completos.....	181
C.1.- Verificador 2D.....	182
C.2.- Verificador 2.5D.....	186
C.3.- Verificador 3D.....	197
C.4.- Fusión de Verificadores.....	201
Bibliografía	213

INDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Medidas biométricas faciales de Bertillón.	2
Figura 2.1. Ejemplos de distintas características biométricas.	11
Figura 2.2. Poder de discriminación vs. facilidad de obtención de técnicas biométricas.	12
Figura 2.3. Esquema general de todo sistema biométrico.	13
Figura 2.4. Dos ejemplos de modelos pertenecientes a las 3D RMA.	15
Figura 2.5. Modelos 3D con textura correspondientes a la base de datos XM2VTS.	17
Figura 2.6. Dos ejemplos de la imagen de textura y la imagen de rango correspondiente a la base de datos UND.	18
Figura 2.7. Ejemplos de adquisición de la base de datos UOY.	19
Figura 2.8. Ejemplos base de datos ATR-HIS.	19
Figura 2.9. Ejemplos imágenes de la base de datos USF.	20
Figura 2.10. Imágenes de la base de datos FRGC correspondientes a una sesión de captura de un individuo.	21
Figura 2.11. Intersección del plano normal a un punto con una superficie genérica. Curvatura normal.	24
Figura 2.12. Representación en nivel de gris del valor de las curvaturas principales en la superficie facial.	26
Figura 2.13. Puntos ancla localizados en la aproximación de Colbry et al.	26
Figura 2.14. Convolución realizada en el espacio del shape index en una imagen frontal (a) y girada (b).	27
Figura 2.15. Filtros aplicados en el proceso de localización de los ojos en la aproximación de Boehnen et al.	28
Figura 2.16. Puntos de control buscados en la aproximación de Irfanoglu et al.	28
Figura 2.17. Los diez puntos característicos localizados en la aproximación de Wang et al.	30
Figura 2.18. Puntos característicos localizados en el perfil en Cook et al.	30
Figura 2.19. Puntos característicos localizados por Lee et al.	31
Figura 2.20. Modelo 3D genérico de los iris propuesto por Lao et al.	31
Figura 2.21. Sistema de luz estructurada e imagen de rango de Malassiotis y Srintzis.	32
Figura 2.22. Localización de la nariz y del puente nasal en Malassiotis y Srintzis.	32
Figura 2.23. Ejemplo de distribución de casos auténticos e impostores.	34
Figura 2.24. Aciertos y Fallos posibles en un sistema de Verificación Facial.	35
Figura 2.25. Ejemplo de curva ROC.	36
Figura 2.26. Cálculo del “ <i>Equal Error Rate</i> ” (EER).	36
Figura 2.27. Diferentes modos de representación de la información facial 3D.	37
Figura 2.28. Ejemplo de las dos formas canónicas del trabajo de Bronstein y Kimmel.	45
Figura 2.29. Clasificación de sistemas biométricos en función del tipo de datos.	48
Figura 2.30. Clasificación de sistemas biométricos en función del tipo de fusión.	50

Figura 3. 1. Mallado 3D y mapa de profundidad del mismo sujeto.	55
Figura 3.2. Escáner láser utilizado en la adquisición de la FRAV3D e iluminación utilizada....	56
Figura 3.3. A la izquierda, esquema colocación del escáner en el laboratorio. A la derecha, esquema de los ejes del escáner.	56
Figura 3.4. Errores en la adquisición de datos 3D por pérdida de puntos. De izquierda a derecha: cejas, bigote y oclusión por giro de la cara.	60
Figura 3.5. Ruido en la adquisición de datos. Ejemplos de pico de ruido bajo la nariz.	60
Figura 4.1. Localización de rasgos faciales en el mapa de profundidad mediante curvaturas....	64
Figura 4.2. Localización de puntos característicos mediante Spin Images.	65
Figura 4.3. Suavizado de los datos correspondientes al mapa de profundidad.	66
Figura 4.4. A la izquierda, representación de los puntos del mapa de profundidad. A la derecha, representación de la superficie analítica ajustada a los datos faciales.	67
Figura 4.5. Medida del error en la aproximación mediante paraboloides a los datos faciales del mapa de profundidad.	67
Figura 4.6. Imagen que representa el valor de la curvatura media en cada píxel.	68
Figura 4.7. Búsqueda del ojo izquierdo a partir de la curvatura media.	68
Figura 4.8. Búsqueda la nariz a partir de la curvatura media.	69
Figura 4.9. Búsqueda la boca de la curvatura media.	70
Figura 4.10. Ejemplos de localización de los rasgos mediante el cálculo de la curvatura media	71
Figura 4.11. Creación de distintas Spin Images en diferentes puntos, en torno a la superficie ..	73
Figura 4.12. Ejemplos de localización de los rasgos mediante el cálculo de la curvatura media	73
Figura 4.13. Creación de la Spin Image: relación entre las coordenadas de los píxeles (i, j) y las coordenadas (α, β) del sistema de coordenadas definido por el punto orientado O.	74
Figura 4.14. Spin Images creadas con diferentes valores para el parámetro “Bin Size”	75
Figura 4.15. Spin Images creadas con diferentes valores para el parámetro “máximo ángulo”. ..	75
Figura 4.16. Spin Images creadas con diferentes valores del parámetro “máxima distancia”	76
Figura 4.17. Distancia del punto (α, β) a los cuatro píxeles más cercanos, e influencia en su nivel de intensidad.	77
Figura 4.18. Diferentes spin images correspondientes a distintos puntos faciales.	77
Figura 4.19. Ejemplos de detección errónea de la punta de la nariz mediante el método de selección del punto más saliente de la cara. Se señala en rojo el punto seleccionado.	79
Figura 4.20. Spin Images correspondientes a la punta de la nariz (izquierda), y a un punto de ruido (derecha).	80
Figura 4.21. Diagrama del proceso de localización de la punta de la nariz y eliminación del ruido.	80
Figura 4.22. Ejemplos de detección correcta de la nariz, frente a situaciones difíciles, mediante el método de las Spin Images.	81
Figura 4.23. Selección de puntos en torno a la nariz.	81
Figura 4.24. Valor de la curvatura media discreta en cada faceta de la cara (izquierda) y extracción de los valores máximos (derecha).	82

Figura 4.25. Grupos localizados en resolución r4 (a la izquierda) y completados con la información de la resolución r2 (a la derecha).....	84
Figura 4.26. Áreas que contienen los puntos característicos buscados, halladas mediante clustering.....	84
Figura 4.27. Puntos candidatos no clasificados (azul), rechazados (rojo) y aceptados (verde) en el proceso de localización de los ojos puntos característicos.....	85
Figura 4.28. Resultado final en la localización de puntos característicos (señalados en rojo)....	85
Figura 4.29. Giro en torno al eje Y para dejar ambos lagrimales en la misma posición de profundidad.....	86
Figura 4.30. Lagrimales localizados de manera correcta, pero sin la precisión suficiente para realizar el giro en Z.	87
Figura 4.31. Posición del entrecejo (izquierda). Puntos considerados en el cálculo del puente de la nariz y el ángulo de giro en Z (derecha)	87
Figura 4.32. Normalización facial mediante puntos característicos: giro en Z.....	88
Figura 4.33. Normalización en el eje X. A la izquierda la recta de regresión (amarillo), y los puntos considerados para su cálculo (rojo). A la derecha, la cara antes (rojo) y después (negro) de ser normalizada.....	88
Figura 4.34. Ajuste de los datos faciales a una elipse.....	89
Figura 4.35. Fallo en la localización de los ojos.....	90
Figura 4.36. Fallo en la localización de la nariz.....	91
Figura 4.37. Spin Images del mismo punto, a partir de cuatro niveles de resolución diferentes	91
Figura 4.38. Componentes conexas calculadas en una cara.....	93
Figura 4.39. Plano de regresión (azul) calculado a partir de los puntos faciales (rojo).....	94
Figura 4.40. Cálculo del mapa de profundidad únicamente a partir de los puntos 3D.....	95
Figura 4.41. Creación del mapa de profundidad a partir de los puntos y las facetas.....	96
Figura 4.42. Mapa de profundidad de resolución 400x400, generado sólo mediante los puntos 3D (izquierda) y mediante puntos y cálculo de ecuación de facetas (derecha).....	96
Figura 4.43. Mapa de profundidad generado mediante una relación lineal entre profundidad y nivel de gris. A la derecha el histograma de esta imagen.	97
Figura 4.44. Arriba: mapa de profundidad base (izquierda), función de ecualización exponencial utilizada (centro) y la imagen resultante (derecha). Abajo: histograma de función ecualizada ..	98
Figura 4.45. En la fila superior, mapa de profundidad base (izquierda), función de ecualización gaussiana utilizada (centro) y la imagen resultante (derecha). Debajo, histogramas de la imagen transformada.	99
Figura 4.46. Fila superior: mapa de profundidad base (izquierda), función de ecualización lineal por secciones utilizada (centro) y la imagen resultante (derecha). Fila inferior: histograma imagen ecualizada por rectas.	100
Figura 4.47. De izquierda a derecha, y de arriba a abajo: imágenes de rango con 250, 100, 50 y 25 niveles de gris asociados a la profundidad.	100
Figura 4.48. Mapa de profundidad con pérdida de puntos (izquierda, simulado), y tras realizar la interpolación en esos puntos (derecha).....	101
Figura 4.49. Ejemplo de imagen de rango con cada una de las ecualizaciones aplicadas. De izquierda a derecha: lineal, exponencial, gaussiana y lineal por secciones.	101

Figura 5.1. Los tres tipos de datos faciales estudiados. De izquierda a derecha: imagen color (Verificador 2D), imagen de rango (Verificador 2.5D) y mallado 3D (Verificador 3D).	104
Figura 5.2. Esquema Verificador 2D.....	106
Figura 5.3. Seis primeras autocaras de la FRAV3D (color) (de izquierda a derecha).....	107
Figura 5.4. Ejemplos de imágenes giradas en los ejes Y, Z y X	107
Figura 5.5. Curvas ROC de las imágenes en color, para las pruebas 1, 4 y 5.....	109
Figura 5.6. Seis primeras autocaras de la FRAV3D (imágenes de rango).....	112
Figura 5.7. Curvas ROC de las imágenes de rango (200x200 píxeles) para pruebas 1, 4 y 5... ..	114
Figura 5.8. Estudio de la influencia de la función de ecualización en la creación de la imagen de rango.	116
Figura 5.9. Curvas ROC de las imágenes de rango (200x200 píxeles, ecualización exponencial) para las pruebas 1, 4 y 5.....	117
Figura 5.10. Estudio de la influencia de la normalización de las imágenes de rango.....	119
Figura 5.11. Curvas ROC de las imágenes de rango (ecualización exponencial) para las pruebas 1, 4 y 5. A la izquierda, imágenes de 200x200 píxeles, a la derecha de 400x400 píxeles.....	121
Figura 5.12. Estudio de la influencia del tamaño de las imágenes de rango.....	121
Figura 5.13. Visualización de la actuación del algoritmo ICP.....	124
Figura 5.14. Ejemplo de creación de árbol 2D-tree: a la izquierda, colocación de los puntos y planos de división utilizados; a la derecha, árbol resultante.	126
Figura 5.15. Curvas ROC de verificación facial 3D basada en ICP, para las pruebas 1, 4 y 5.	130
Figura 5.16. Diagrama de barras de comparación de los EER(%) obtenidos por cada uno de los Verificadores: 2D, 2.5D y 3D, en cada una de las quince pruebas realizadas.	134
Figura 6.1. Arquitectura de los dos sistemas fusionados	137
Figura 6. 2. Criterios de similitud de ambos clasificadores: ICP y SVM.....	138
Figura 6. 3. Curvas de eficiencia (EER vs. valor de λ) de la fusión 2.5D+2D en el caso de la normalización ZS.	141
Figura 6. 4. Curvas de eficiencia (EER vs. valor de λ) de la fusión 2D + 2.5D en el caso de la normalización MM.....	142
Figura 6.5. Curvas de eficiencia (EER vs. valor de λ) de la fusión 2.5D + 3D en el caso de la normalización ZS.	144
Figura 6.6. Curvas de eficiencia (EER vs. valor de λ) de la fusión 2.5D + 3D en el caso de la normalización MM.....	144
Figura 6. 7. Diagrama del porcentaje de mejora introducido por la fusión en el caso de los dos verificadores considerados (2.5D+2D y 2.5D+3D), y las dos normalizaciones (Z-Score y Máximo-Mínimo). El porcentaje es sobre el mejor de los verificadores individuales.	148
Figura A. 1. Ejemplos de la Base de Datos FRAV2D.	166
Figura A. 2. Variación del umbral de aceptación óptimo en el caso del clasificador SVM, en función de la variación del parámetro k	170
Figura A. 3. Variación del umbral de aceptación óptimo en el caso del clasificador RBF, en función de la variación del parámetro k	171

Figura A.4. Curva ROC del sistema verificador. Clasificador SVM (cuadrados) y RBF (círculos). Se representa una variación de los FRR y FAR del 0% al 100%.	172
Figura A. 5. Curva DET del sistema verificador. Resultados del clasificador SVM (cuadrados) y RBF (círculos).....	172
Figura B. 1. Esquema de conexión del cluster Hidra (Universidad Rey Juan Carlos) utilizado en la ejecución en paralelo de la verificación facial 3D.	168
Figura C. 1. Comparación de los valores del EER(%) para cada una de las pruebas, y en el caso de las dos funciones de ecualización estudiadas.	178

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1: Selección de bases de datos disponibles que contienen información 3D	16
Tabla 2.2: Trabajos publicados en Reconocimiento Facial 3D.....	38
Tabla 3. 1. Niveles de resolución del mallado proporcionados por el escáner	57
Tabla 3. 2A Ejemplo capturas de un individuo de la base de datos FRAV3D, en el orden de adquisición.....	58
Tabla 3. 2B Ejemplo capturas de un individuo de la base de datos FRAV3D, en el orden de adquisición.....	59
Tabla 4. 1. Tasa de error en la localización de rasgos faciales mediante cálculo de la curvatura media.....	70
Tabla 4. 2. Porcentaje correcto de localización de rasgos faciales mediante la técnica de las Spin Images.....	89
Tabla 4. 3. Influencia de la resolución del mallado sobre el porcentaje de localización de la nariz.....	92
Tabla 4. 4. Porcentaje correcto de localización de rasgos faciales mediante la técnica de las Spin Images.....	94
Tabla 5. 1. Pruebas realizadas en el Verificador 2D y 2.5D.....	108
Tabla 5.2. EER obtenido en cada una de las pruebas, para los dos tamaños de imagen considerados: 200x200 y 400x400 píxeles.....	110
Tabla 5.3. Resultados preliminares en el estudio previo de la influencia de la ecualización en la imagen de rango sobre el porcentaje de verificación.....	113
Tabla 5.4. Resultados obtenidos en el estudio final de la influencia de la ecualización en la imagen de rango sobre el porcentaje de verificación.....	115
Tabla 5.5. Resultados obtenidos en el estudio de la influencia de la normalización en la imagen de rango sobre el porcentaje de verificación.....	118
Tabla 5.6. Resultados obtenidos en el estudio de la influencia del tamaño de la imagen de rango sobre el porcentaje de verificación.....	120
Tabla 5.7. Resultados obtenidos en el estudio de la influencia de la resolución en niveles de gris de la imagen de rango sobre el porcentaje de verificación.....	122
Tabla 5.8. Resultados obtenidos en la Verificación facial 3D basada en ICP.....	131
Tabla 5.9. Comparación de la verificación facial 2D, 2.5D y 3D.....	133
Tabla 6. 1. EER(%) de los verificadores 2D, 2.5D y 3D, antes de la fusión de datos.....	140
Tabla 6. 2. EER(%) mínimos obtenidos durante la fusión 2.5D+2D, considerando las salidas de los clasificadores normalizadas ZS, y normalizadas MM. Se señala en negrita el mejor EER obtenido entre las dos normalizaciones.....	143
Tabla 6. 3. EER(%) mínimos obtenidos durante la fusión 2.5D+3D, considerando las salidas de los clasificadores estandarizadas ZS, y normalizadas MM. Se señala en negrita el mejor EER obtenido entre las dos normalizaciones.....	145

Tabla A 1. Resultados estadísticos para el conjunto de genuinos y de impostores, para los dos clasificadores considerados: SVM y RBF.....	169
Tabla A 2. Variación del umbral de aceptación óptimo, con el porcentaje de FAR y FRR en el caso de los tres niveles de seguridad discutidos.....	170
Tabla B. 1. Tiempos de ejecución de la normalización y verificación 3D en un nodo del cluster. Las pruebas son realizadas con un subconjunto de la BBDD de dos individuos.....	178
Tabla B. 2. Tiempos de ejecución de la normalización y verificación 3D en 16 nodos del cluster mediante el gestor de colas. Las pruebas son realizadas con un subconjunto de la BBDD de dos individuos.....	179
Tabla C. 1. Pruebas realizadas en el Verificador 2D, 2.5D y 3D.....	171
Tabla C. 2. Resultados Verificador 2D (color).	172
Tabla C. 3. EER(%) del verificador 2.5D obtenido en las distintas condiciones estudiadas...	177
Tabla C. 4. Resultados Verificador 2.5D (rango), tamaño de imagen 200x200 píxeles y distintas funciones de ecualización: exponencial y gaussiana.	179
Tabla C. 5. Resultados Verificador 2.5D (rango), tamaño de imagen 400x400 píxeles y distintas funciones de ecualización: exponencial y gaussiana.	183
Tabla C. 6. Resultados Verificador 3D(mallado).	187
Tabla C. 7. Resultados Verificador 2D+2.5D(color + rango), siendo el tamaño de imagen considerado 200x200 píxeles, y la función de creación de las imágenes de rango de tipo exponencial.	191
Tabla C. 8. Resultados Verificador 2.5D+3D(rango + mallado), siendo el tamaño de la imagen de rango considerada 200x200 píxeles y la función de creación de tipo exponencial.....	197

Capítulo 1

Introducción.

1.1.- Introducción y motivación.

Los seres humanos han usado sus características físicas para reconocerse desde hace miles de años. Alphonse Bertillon, jefe de la división de investigación criminal del departamento de policía en París, a mediados del siglo XIX, fue el primero en idear y practicar la técnica de identificar a los criminales a partir de una serie de medidas obtenidas de sus características físicas, entre ellas, medidas faciales. Algunas de estas medidas pueden verse en la Figura 1.1. El desarrollo de la informática en el siglo XX, ha permitido la aparición de diferentes métodos automáticos de reconocimiento facial.

Existen muchas otras características fisiológicas que pueden ser cuantificadas para identificar a un individuo (conocidas como características biométricas), como pueden ser las huellas dactilares, el patrón del iris, la voz, etc. Una de las principales ventajas del reconocimiento facial, es que se trata de un método no intrusivo, es decir, los datos pueden ser adquiridos incluso sin que el sujeto se percate de ello. Además, el aspecto facial es probablemente el método más utilizado por los seres humanos para reconocerse unos a otros.

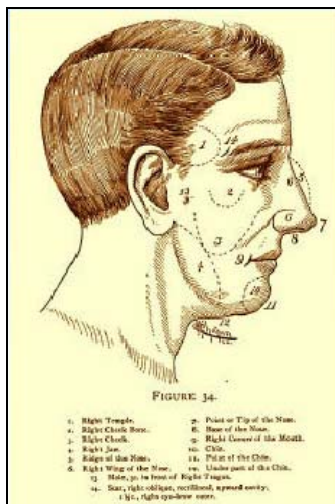


Figura 1.1. Medidas biométricas faciales de Bertillon [Moe71].

Sin embargo, existe una serie de dificultades a la hora de identificar a una persona a partir de su aspecto facial:

- La variabilidad entre individuos (inter-clases) puede ser muy pequeña, por ejemplo, en el caso de familiares, o especialmente en el caso de gemelos.
- La variabilidad entre distintas imágenes de un mismo individuo (intra-clase) puede ser muy amplia, debido a que las imágenes hayan sido adquiridas en diferentes condiciones de posición o de iluminación.

En la actualidad pueden adquirirse dos tipos de datos faciales (en referencia a su aspecto externo): las imágenes de intensidad, donde se representa la textura de la cara, y los datos tridimensionales, que recogen la estructura geométrica facial. Ambos tipos de datos son complementarios, ya que proporcionan dos tipos de información diferente.

La principal limitación de los sistemas basados en una representación facial de textura es su dependencia de las condiciones de iluminación y de la posición de la cara. Por el contrario, la representación 3D, por su propia definición, no depende de la iluminación, y además permite la normalización de la cara en posición.

Uno de los elementos principales de todo sistema de reconocimiento de caras es el conjunto de datos faciales utilizados en el proceso: la base de datos de caras. Debe ser adquirida en condiciones equivalentes para todos los individuos y con un número de personas suficientemente representativo para poder evaluar los métodos de reconocimiento facial.

Convendría destacar los aspectos jurídicos y legales que suponen la adquisición y generación de bases de datos biométricas, como imágenes faciales, especialmente los concernientes con la seguridad y la privacidad. En [Ber05] se muestran los requisitos que toda base de datos debe cumplir para garantizar la seguridad: confidencialidad, es decir, que los datos no se entregan a personas no autorizadas; la integridad, que los datos no sean modificados tanto de manera intencionada como no intencionada; y por último, la disponibilidad, para evitar que ataques externos hacia la base de datos impidan el correcto funcionamiento de la misma por no encontrarse en servicio.

La situación legal en el mundo respecto al uso de datos personales en general, y bases de datos biométricas en particular, es desigual. Por ejemplo, el reglamento 45/2001 vigente en la Unión Europea [RN45/2001] establece en su artículo 4 que pueden recogerse datos personales con fines estadísticos o científicos. En estos casos, se deben habilitar los mecanismos adecuados para que, una vez transcurrido el periodo de tiempo para el cual se tomaron los datos, la información sea completamente anónima, o en su defecto, que el proceso de identificación de los datos se realice mediante un método de codificación. Igualmente en el artículo 5 de la misma ley europea, se indica que la persona de la que se van a tomar los datos debe haber expresado inequívocamente su consentimiento.

Generar una base de datos facial no invade el derecho a la privacidad, siempre que se construya con el consentimiento de las personas, con fines científicos y se dé una buena utilización de los datos contenidos.

1.2.- Objetivos de la tesis.

El objetivo principal de esta tesis es la realización del diseño, implementación, pruebas, obtención de resultados y análisis de los mismos, de un sistema de verificación facial multimodal que combine información 2D y 3D. Para ello se realizará un estudio mediante diferentes técnicas de la capacidad de discriminación facial de la información bidimensional y tridimensional, analizando su respuesta frente a distintas condiciones de adquisición de los datos. Para conseguir este objetivo principal, se han planteado una serie de objetivos parciales, que se describen a continuación:

1. Adquisición de una base de datos multimodal (2D y 3D):
 - Debe contener un gran número de individuos, como mínimo cien personas.

- Debe ser adquirida en una amplia variedad de condiciones del entorno y del propio sujeto. Éstas deben ser variadas individualmente entre cada una de las capturas de datos. De este modo, se podrá evaluar la influencia de cada uno de los factores individualmente sobre el resultado final de reconocimiento.

2. Normalización de los datos 3D:

- Diseño de métodos locales basados en la estimación de la posición de la cara a partir de los rasgos faciales:
 - Estudio de la capacidad de la curvatura facial para distinguir los rasgos.
 - Aplicación de la técnica de registro entre superficies *Spin Images* para localizar los puntos característicos de la cara.
- Diseño de métodos globales basados en la estimación de la posición facial a partir de todos los puntos de la cara.
- Creación de diferentes representaciones faciales a partir de la información 3D normalizada:
 - Nube de puntos en el espacio.
 - Mallados triangulares que aproximen esta nube de puntos a una superficie.
 - Mapas de profundidad: cálculo óptimo. El mapa de profundidad o imagen de rango es la representación en forma de imagen de la información tridimensional, asignando al valor de la profundidad un nivel de gris en la imagen. Todo el proceso de creación de esta imagen de rango será analizado y se estudiará la influencia del método de creación del mapa de profundidad sobre la verificación facial. De este modo se definirá el mapa de profundidad óptimo para esta aplicación.

3. Reconocimiento facial: implementación de distintos métodos de verificación facial a partir de los distintos tipos de información de los que se dispone.

- Creación de un sistema de verificación facial 2D y su aplicación a las imágenes de textura y rango.
- Creación de un sistema de verificación facial 3D y su aplicación al mallado.

4. Fusión de resultados de clasificación facial bidimensional y tridimensional.

- Estudio de la influencia de la estandarización de las salidas de los clasificadores a fusionar: para poder fusionar dos resultados de dos sistemas diferentes, es necesario manipular estos datos para que sean representados en una escala donde sean comparables. Se estudiará la influencia de la estandarización sobre el resultado final.
 - Determinación de la regla de fusión óptima.
5. Evaluación del sistema sobre la base de datos adquirida como primer objetivo parcial, paralelizando su ejecución en un cluster de ordenadores:
- Análisis de los resultados 2D.
 - Análisis de los resultados 3D
 - Análisis de los resultados fusionados.

1.3.- Planteamiento del problema y solución propuesta.

Existen actualmente en la comunidad biométrica dos corrientes diferentes [Phi05]:

- Una en la que se afirma que la información tridimensional es más poderosa a la hora de realizar el reconocimiento facial (Profesor K. Bowyer).
- Otra en la que se defiende que las imágenes de intensidad en alta resolución tienen una mayor capacidad discriminante (Profesor J. Phillips).

En nuestra opinión, ambos tipos de información son muy importantes y hacen referencia a dos aspectos diferentes de una misma realidad física compleja. Las imágenes de textura aportan información determinante de áreas de la cara donde no existe una gran variación en la estructura geométrica, como puede ser la frente, las cejas y las áreas con vello facial. En el caso de los datos 3D, la información aportada es más relevante en las áreas donde no existe una gran diferencia entre el aspecto de la textura, pero sí en la forma facial, como puede ser la mandíbula, la barbilla o las mejillas.

Nuestro enfoque del problema ha sido realizado en dos frentes:

- Por un lado, se ha realizado un estudio exhaustivo de la capacidad verificadora de cada uno de los tipos de datos y de las condiciones de adquisición que

ofrecen los mejores resultados. Para ello se han diseñado dos sistemas verificadores: uno con un motor verificador 2D y otro 3D. Cada uno de ellos se basa en características intrínsecas de la información 2D (intensidad de píxeles) y 3D (distancias en el espacio entre puntos de diferentes superficies) respectivamente. El motor verificador 2D ha sido aplicado también a las imágenes de rango, constituyendo el sistema verificador 2.5D.

- Por otro lado, se ha optado por la fusión de ambos tipos de información para crear un sistema de reconocimiento facial multimodal que aproveche las ventajas de cada uno de ellos. Para poder realizar la fusión de estas dos representaciones faciales distintas, es determinante la estandarización o normalización de los datos. Por ello se ha dedicado un especial esfuerzo a la creación de un sistema de localización de rasgos faciales en 3D muy robusto que permita una posterior normalización.

1.4.- Dificultades esperadas del problema.

Uno de los primeros problemas que aparecen al realizar cualquier trabajo en Reconocimiento Facial es la obtención de la base de datos de caras con la que realizar las pruebas del sistema. No existe actualmente ninguna base de datos multimodal 2D y 3D que se haya convertido en un estándar entre la comunidad científica. Es muy difícil conseguir datos 3D, y más aún que estos datos sean satisfactorios: un número representativo de personas, con varias imágenes por persona y en diferentes condiciones de adquisición. Por esta razón, se procedió a adquirir nuestra propia base de datos, FRAV3D, para que de este modo fuera controlada y cumpliera los requisitos antes descritos. Tampoco existe un protocolo de adquisición de una base de datos facial, a pesar de que se trata de un aspecto de especial relevancia en el resultado final. Tras varias pruebas iniciales, se estableció un protocolo que se cumplió de manera estricta durante todo el proceso de adquisición de datos.

Finalizada la captura de los datos, se observó que éstos presentaban algunos errores inherentes al propio sensor de adquisición 3D, el escáner láser. Aparte de estos datos incorrectos, era necesario también eliminar la información que no contribuyera al reconocimiento facial: pelo, orejas, cuello, etc. El aprovechamiento de todas las ventajas de la información 3D requería de una normalización muy precisa de los datos 3D. La existencia de los errores debidos a la adquisición de los datos, y las diferentes condiciones extremas de giros

faciales que se han considerado, han complicado enormemente el nivel de dificultad de la normalización 3D.

1.5.- Estructura de la memoria.

La presente memoria se divide en siete capítulos, relacionados directamente son los objetivos parciales descritos en el apartado 1.2. El primero de ellos corresponde a la Introducción aquí presentada. En el segundo capítulo se presentan los antecedentes disponibles en la bibliografía actual respecto a los sistemas de verificación facial, tanto 3D como multimodales 2D+3D. En el capítulo tercero se ha descrito en detalle el proceso de creación de la base de datos utilizada en esta tesis, la FRAV3D. El cuarto capítulo se centra en la normalización facial tridimensional realizada, presentando los distintos métodos utilizados. El capítulo quinto muestra los sistemas de verificación 2D y 3D diseñados y desarrollados, recogiendo los resultados y características de cada uno de ellos. En el capítulo sexto se ha presentado la fusión de datos 2D y 3D, y en el último capítulo se recogen las aportaciones originales de este trabajo, así como las conclusiones más importantes y las posibles líneas de trabajo futuro.

Finalmente, se incorporan todas las referencias bibliográficas citadas en este trabajo, seguidas de unos apéndices cuya inclusión se ha considerado que aclara o amplía algún elemento importante de la tesis. En el Anexo A se explica un método diseñado en el entorno de esta tesis para la determinación automática del umbral de aceptación óptimo en un sistema de verificación facial. Se ha considerado que este método no corresponde propiamente con el núcleo de la tesis, pero a pesar de ello es interesante su consideración, por lo que ha sido finalmente incluido como anexo. En el Anexo B se explica el proceso de ejecución en paralelo de la verificación facial tridimensional en un cluster de ordenadores. Para terminar, en el Anexo C se presentan todos los resultados experimentales obtenidos.

Capítulo 2

Antecedentes.

En este capítulo se va a presentar una revisión del estado de la técnica actual respecto a los sistemas de reconocimiento facial tridimensionales, y aquellos que usen también información complementaria bidimensional. No se han incluido los antecedentes de sistemas que únicamente utilicen información bidimensional, ya que consideramos que los principales objetivos y aportaciones de esta tesis no se centran en este aspecto, y existen en la bibliografía actual abundantes recopilaciones en este campo [Che95] [Zha03a] [Tor04] [Kon05] [Li05].

2.1.-Introducción a los Sistemas Biométricos.

¿Qué tipos de características biológicas pueden llegar a ser utilizadas como medidas biométricas para la identificación de los individuos? En principio, cualquier característica física o algunos tipos de comportamiento pueden ser utilizados como características biométricas, siempre que cumplan las siguientes condiciones:

- Universal: toda persona debe poseer la característica biométrica utilizada.
- Distintiva: las diferencias entre las características biométricas de dos personas diferentes deben ser lo suficientemente significativas para permitir distinguirlas.
- Permanente: deber permanecer relativamente invariante a lo largo del tiempo.

- Coleccionable: debe poder ser medida y cuantificada.

Además, en un sistema biométrico real debe haber otras cuestiones que deben ser consideradas:

- Funcionamiento: el porcentaje de reconocimiento debe superar un determinado umbral y el tiempo de ejecución debe ser asequible.
- Aceptabilidad: debe ser aceptado por las personas como un método de reconocimiento que puedan integrar en su vida diaria.
- Robustez: frente ataques fraudulentos.

Las aplicaciones de los sistemas biométricos pueden dividirse en tres grupos principales:

- Comerciales: aplicaciones para la introducción de un usuario en redes de ordenadores, seguridad electrónica, acceso a Internet, cajeros automáticos, tarjetas de crédito, controles de acceso, teléfonos móviles, etc.
- Gubernamentales: documentos identificativos (DNI), permisos de conducir, seguridad social, control de fronteras, control de aeropuertos, etc.
- Forenses: investigaciones criminales, identificación de cadáveres, terrorismo, identificación de personas desaparecidas, etc.

Actualmente existe un gran número de sistemas biométricos basados en diferentes características físicas, como se muestran en la Figura 2. 1. Cada uno de ellos posee ciertas ventajas e inconvenientes, por lo que la elección final debe realizarse en función de la aplicación que se dé al sistema.

Existen también sistemas que utilizan más de una característica biométrica: son los llamados sistemas multibiométricos. Por ejemplo, utilizan datos del iris más datos faciales, o datos de iris más huella dactilar, etc. En el caso de que los distintos datos biométricos correspondan a la misma característica, pero mediante modos de representación diferentes, los sistemas biométricos son denominados multimodales. Un ejemplo de este último tipo de datos podrían ser aquellos que utilizan información facial de textura y de termografía, o información facial 2D y 3D.

Principalmente, podemos seleccionar dos parámetros que describen a los sistemas biométricos y que son contrapuestos: el poder de discriminación del rasgo biométrico (capacidad de identificar a una persona a partir de ese rasgo), y la dificultad de ser obtenido, o lo que es lo mismo, el grado de intrusismo que se realiza sobre la persona durante la adquisición de datos. En la Figura 2. 2 se ha representado en un eje de coordenadas el poder discriminante del rasgo vs. la facilidad de adquisición. Puede verse que por ejemplo, el ADN posee un enorme grado de discriminación (fiabilidad absoluta) y que a su vez es muy difícil de obtener, ya que hay que someter al individuo a un análisis relativamente agresivo. Por otra parte, la huella dactilar, posee también un alto grado de discriminación, y su adquisición es mucho más sencilla, pero la actitud del sujeto debe ser colaborativa. En el caso de la cara, el poder de discriminación es alto, y su facilidad de obtención es muy alta.

De entre todas estas técnicas, destaca la biometría facial, tanto por su facilidad de adquisición (en principio todo el mundo pone a disposición de los demás su cara en su interacción diaria con otras personas), como por el bajo grado de cooperación necesario por parte del individuo del cual se toma una imagen facial.

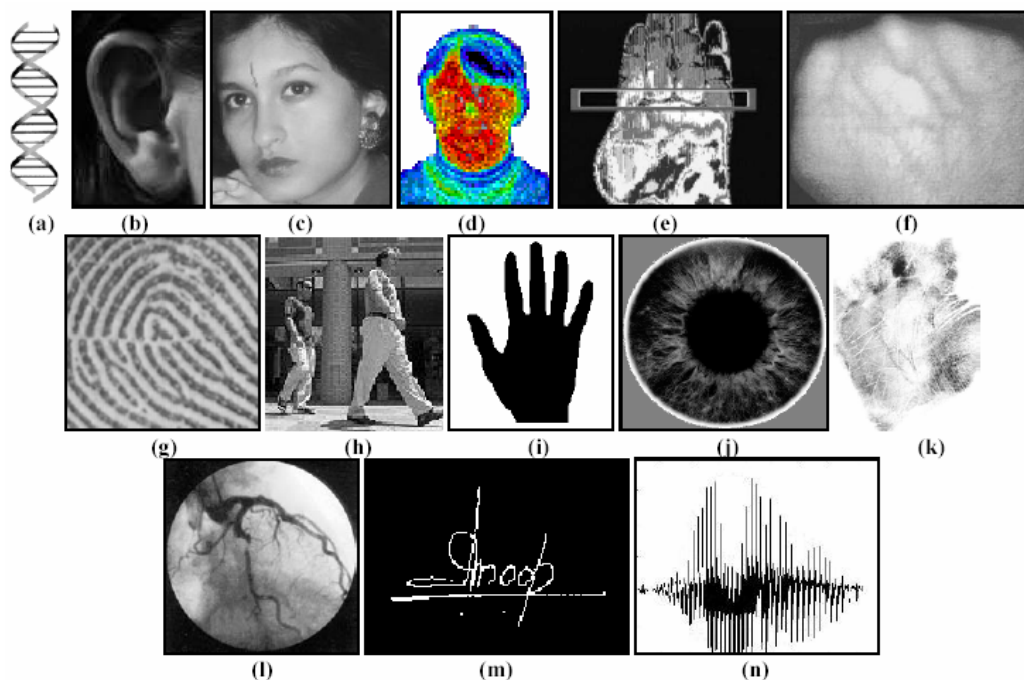


Figura 2. 1. Ejemplos de distintas características biométricas: a) ADN, b) oreja, c) cara, d) termografía facial, e) termografía de la mano, f) venas de la mano, g) huella dactilar, h) forma de andar, i) geometría de la mano, j) iris, k) huella palmar, l) retina, m) firma y n) voz. [Jai04]

Todo sistema biométrico puede dividirse en cuatro módulos [Jai04] (Figura 2.3):

- Módulo de normalización: en este módulo los datos biométricos son modificados para que cumplan unas determinadas condiciones de posición, iluminación, etc. Un ejemplo sería la normalización de la posición facial.
- Módulo de extracción de características: procesa los datos para extraer el “conjunto de características”, es decir, una representación compacta de los rasgos biométricos.
- Clasificador o módulo de emparejamiento: compara las características o rasgos extraídos con los modelos o plantillas de referencia que contiene la base de datos. Genera como salida un valor que indica el grado de similitud entre los datos biométricos introducidos y los de los individuos de la base de datos.
- Módulo de decisión: es el que decide la aceptación o rechazo de un determinado individuo. La decisión final es tomada comparando la salida del clasificador y el valor umbral que es considerado límite o frontera entre aceptación y rechazo.

Además de estos módulos, se ha de tener en cuenta también el dispositivo con el que se adquieren los datos biométricos: el sensor. Por ejemplo, la cámara con la que se toman las imágenes faciales, o el escáner láser con el que se toman los datos faciales tridimensionales.

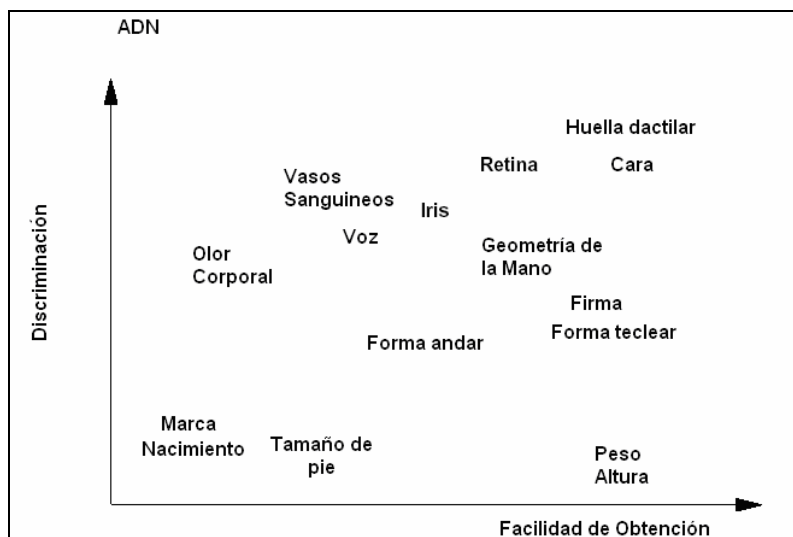


Figura 2. 2. Poder de discriminación vs. Facilidad de Obtención de distintas técnicas biométricas. [Bol04]

Dada la complejidad de los métodos utilizados en cada uno de los módulos descritos, y las características particulares de cada uno de ellos, en este capítulo se presentarán los antecedentes respecto a cada uno de estos módulos en un apartado diferente. Inicialmente, se va a presentar una revisión de las bases de datos faciales tridimensionales que pueden encontrarse

actualmente a libre disposición de la comunidad científica y se describirán sus principales características. A continuación se presentarán las distintas aproximaciones existentes al problema de la normalización de caras en 3D y a la localización de rasgos característicos faciales. Posteriormente, se presentarán los distintos métodos relativos a la verificación facial en tres dimensiones. Finalmente, se explicará en qué consiste la fusión de datos biométricos, y qué modalidades de fusión existen. Como veremos en el apartado 2.5, la fusión puede en cada una de las etapas descritas en la Figura 2.3.

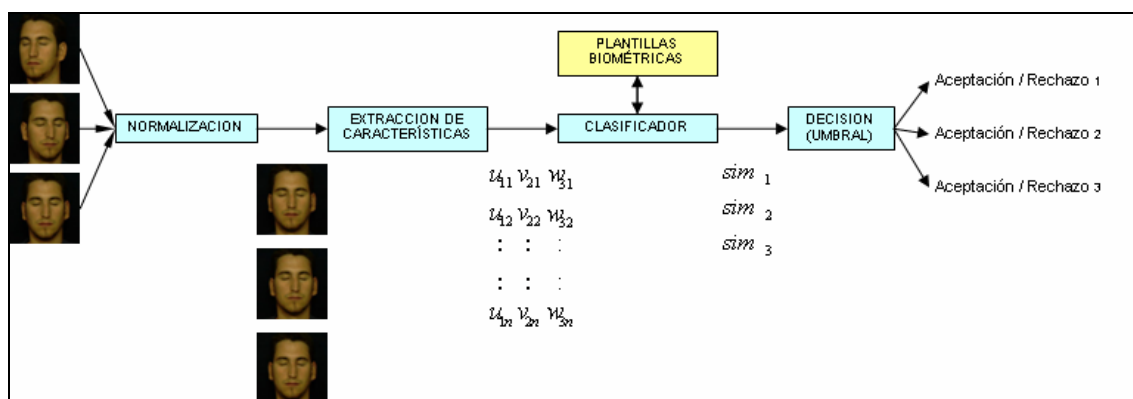


Figura 2.3. Esquema general de todo sistema biométrico

2.2.- Bases de Datos Tridimensionales.

Desde los primeros inicios de la biometría facial, se ha hecho patente la necesidad de experimentar los distintos algoritmos y métodos utilizados sobre una muestra lo más amplia y representativa posible de caras, organizada a modo de base de datos. Con respecto a la biometría facial, las bases de datos pueden consistir en fotografías de caras, en caso de basarse en datos 2D, o en mallas o imágenes de rango, en caso de datos 3D. También pueden considerarse bases de datos multimodales, que fusionen datos en 2D y 3D, o datos faciales con los de otro rasgo biométrico, como por ejemplo la voz, entre otros. La mayor parte de las veces no se almacenan datos identificables en sí, sino más bien plantillas calculadas como resultado de los algoritmos utilizados, y con las que no se puede reconstruir la información original [Nav02].

Uno de los principales problemas a la hora de construir base de datos es la estandarización de métodos y la comparación de resultados obtenidos con distintas bases de datos. Aparte de las bases de datos que cada grupo de investigación haya podido crear en su propio laboratorio, probando sobre ellas de manera específica algún algoritmo particular, existen otras que se han puesto a disposición de la comunidad científica [Gro02]. En ese sentido

el establecimiento de protocolos como los del programa FERET [FER98] o la competición BANCA [BAN03] para la evaluación de resultados obtenidos con distintos algoritmos de reconocimiento facial ha servido de gran ayuda. El procedimiento general a la hora de evaluar los algoritmos de verificación facial, es dividir las imágenes de la base de datos en dos grupos. Por un lado, un primer grupo de imágenes es utilizado en el entrenamiento de los algoritmos, mientras que otro segundo grupo, disjunto pero relacionado con el anterior, con el que se realizan las pruebas.

Otro de los problemas a la hora de adquirir la base de datos se refiere al grado de objetividad y repetibilidad que ha de caracterizar todo estudio científico. Las bases de datos han de tomarse intentado abarcar el mayor número de casos posibles (sexo, edad, raza, etc.) para entrenar mejor los algoritmos, pero a su vez garantizando el perfecto control sobre cada una de las variables que influyen en los resultados. Debido a que las condiciones de iluminación tienen un gran impacto en el rendimiento de los algoritmos de reconocimiento facial bidimensional, las bases de datos suelen ser interiores, tomadas en laboratorios con iluminación controlada. Otros factores que han de vigilarse pueden ser la posibilidad de giros de la cabeza, presencia de gestos, partes tapadas de la cara, etc.

No todas las bases de datos para biometría facial se adquieren con los mismos fines. Algunas, como la MIT/CMU [Sun98], se utilizan para probar algoritmos de detección de la cara. Suelen utilizar en este caso imágenes variadas, algunas con varias caras y otras con ninguna, pues el problema de clasificación consiste en determinar si existe cara o no cara. Otras bases de datos sirven para encontrar los rasgos faciales [Jes01]. Por otro lado, otras sirven para reconocimiento, como las ya citadas FERET [FER98] y BANCA [BAN03], entre muchas otras.

Después de los grandes avances en reconocimiento de caras en 2D, así como del gran número de bases de datos que ha proliferado en los últimos años, se está manifestando actualmente un creciente interés en la biometría facial 3D, especialmente dada la reducción de precios de los escáneres de adquisición.

2.2.1.- Bases de Datos Tridimensionales disponibles.

A continuación vamos a presentar diferentes bases de datos faciales (BBDD) que están disponibles actualmente para la comunidad científica con propósitos no comerciales. En este apartado nos hemos centrado en aquellas BBDD que contengan información tridimensional pudiendo contener también otro tipo de información, como imágenes en color, imágenes en infrarrojo o incluso otro tipo de información biométrica, como la voz.

Como resumen incluimos en la Tabla 2.1 las características principales de las bases de datos mencionadas. Las diferentes condiciones y los criterios de adquisición de datos son muy heterogéneos haciendo que la comparación de las distintas bases de datos sea hartamente complicada. Se ha incluido tanto el número de sujetos diferentes en la base de datos, como el número total de imágenes o capturas. En cuanto a las condiciones de adquisición se incluyen cada uno de los parámetros que se han variado (aparte de la condición neutra que se identifica como imagen frontal) y el número de condiciones diferentes de adquisición utilizadas para cada parámetro. Por ejemplo, la BBDD 3D RMA contiene 120 individuos con un total de 720 imágenes adquiridas en 2 períodos temporales diferentes, y contemplando 3 orientaciones faciales distintas. En la columna *referencia* se presenta la página web oficial de la base de datos, la institución que la ha creado, así como una publicación relevante donde se describa y se haya utilizado. Se ha incluido también la base de datos FRAV3D adquirida en el marco del trabajo de esta tesis para poder realizar una comparación con el resto de bases de datos existentes. Se explicará en detalle en el capítulo 3 de la presente tesis.

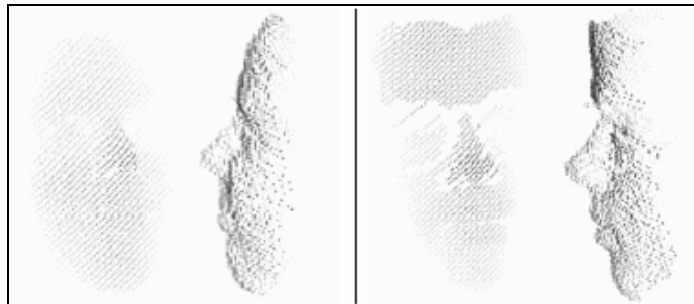


Figura 2.4. Dos ejemplos de modelos pertenecientes a las 3D RMA.

3D RMA

Adquirida por el “*Signal and Image Centre (SIC) of the Royal Academy of Belgium*”, en el contexto del proyecto M2VTS (“*Multimodal Biometric Person Authentication*”). El sistema de adquisición de datos 3D se basa en luz estructurada. Se capturaron 120 personas, en dos sesiones diferentes (noviembre de 1997 y enero de 1998), realizando 3 capturas por sesión con diferentes orientaciones de la cabeza (frente, derecha o izquierda, mirando arriba o abajo). Dos tercios de los individuos son estudiantes del mismo origen étnico y aproximadamente la misma edad. El tercio restante consiste en personal de la academia, entre 20 y 60 años de edad. La resolución de los modelos es de 0.1 mm. En la Figura 2.4 se muestran dos ejemplos pertenecientes a esta base de datos.

Tabla 2.1: Selección de bases de datos disponibles que contienen información tridimensional. Las condiciones de adquisición especifican el número de diferentes iluminaciones, posiciones, expresiones o sesiones presentes en la base de datos. Aún cuando las condiciones frontales y neutrales están siempre presentes, sólo se mencionan cuando es la única condición disponible.

BBDD	Tipo dato	N° individuos	N° total de imágenes	Condiciones de Adquisición		Referencia
3D RMA	3D	120	720	Tiempo Giros	2 3	Signal and Image Centre (SIC) de la Royal Academy of Belgium http://www.sic.rma.ac.be/~beumier/DB/3d_rma.html [Xu04a]
XM2VTS	2D	295	5900	Tiempo Giros Iluminación	4 2 2	University of Surrey http://www.ee.surrey.ac.uk/Research/VSSP/xm2vtsdb/ [Mes99]
	3D	293	293	Frontal		
UND	2D	>300	>15000	Tiempo Iluminación Expresión Facial	10 3 2	University of Notre Dame http://www.nd.edu/%7Ecvrl/UNDBiometricsDatabase.html [Fly03]
	3D	277	1906	Frontal y Neutral		
	Infrarrojo	>200	2492	Frontal y Neutral		
UOY	3D	350	5250	Orientación facial Expresión Facial Distancia a la cámara	6 5 2	University of York http://www-users.cs.york.ac.uk/~tomh/3DFaceDatabase.html [Hes04]
ATR-HIS	3D	200	1800	Gestos y Giros	9	Advanced Telecommunications Research Institute International, Human Information Science Laboratories. Japan. http://www.his.atr.jp/~kuratate/face_estimation/ [Kur04]
USF	2D	138	138	Frontal		University of South Florida http://marthon.csee.usf.edu/HumanID/ [Zha03b] [USF]
	3D		138			
FRGC	2D	>300	>40000	Tiempo Iluminación	2 años 2	Face Recognition Grand Challenge Competition http://www.frvt.org/FRGC/ [Phi05]
	3D		>5000	Frontal		
FRAV3D	2D	105	1680	Giros	8	Universidad Rey Juan Carlos http://frav.escet.urjc.es [Con05b]
	3D		1680	Expresión Facial Iluminación	2 2	

XM2VTS

Adquirida por la Universidad de Surrey (Reino Unido). Es una BBDD multimodal (cara y voz) [Mes99]. Hay disponible información 2D (295 sujetos) y modelos VRML¹ 3D (293 sujetos). El sensor 3D es un sistema de alta precisión basado en un par estéreo 3D desarrollado por el Instituto Turing.

Se realizaron capturas a lo largo de cuatro meses, en cuatro sesiones. En cada sesión se realizaron dos capturas con la cabeza girada y seis grabaciones de habla (los sujetos leyeron tres frases repetidas dos veces). En la tercera sesión se realizó la captura del modelo facial tridimensional, uno por persona, y de manera simultánea se capturó también una imagen de textura de cada individuo. Todas las adquisiciones 3D se realizaron de caras frontales. La resolución de las imágenes es 720x576. En el caso de las imágenes asociadas al modelo 3D la resolución es menor, 512x512. El número de puntos de cada modelo facial es aproximadamente 4000. En la Figura 2.5 pueden verse dos ejemplos de los modelos 3D de la BBDD, con textura incluida.

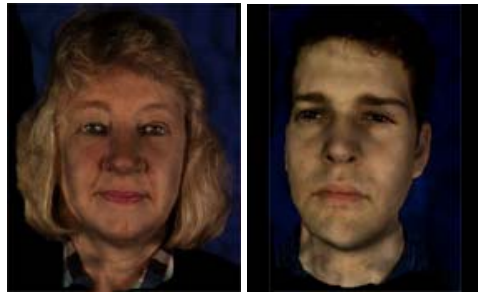


Figura 2.5. Modelos tridimensionales con textura correspondientes a la base de datos XM2VTS

Notre Dame Face Database (UND):

Esta base de datos multimodal, que contiene información facial y de oreja (visible, mapa de profundidad e infrarrojo), es una de las más completas que existen actualmente. Fue adquirida por la Universidad de Notre Dame (EEUU) mediante un escáner láser Minolta Vivid 900. Contiene imágenes de más de 300 individuos. Consta de dos sesiones de cuatro semanas de duración cada una, con un intervalo temporal entre ambas de seis semanas. Se realizó al menos una captura 3D y cuatro imágenes por sesión. Se utilizaron diferentes condiciones de adquisición: tres iluminaciones diferentes y dos expresiones faciales (neutral y sonrisa).

¹ VRML: Virtual Reality Modeling Language

Las condiciones de iluminación utilizadas son las siguientes: “*FERET style*”, usa dos focos, uno a la derecha y otro a la izquierda del sujeto; “*mughshot lighting*”, donde se utiliza una tercera luz adicional que ilumina frontalmente; y “*unstructure lighting*”, con condiciones no controladas fuera de laboratorio, pero en un escenario interior, sin luz natural.

La resolución de las imágenes, tanto de profundidad como de textura, es de 640 x 480 píxeles. El número medio de puntos en el modelo 3D es aproximadamente 83.000. En la Figura 2.6 se muestran dos ejemplos de las imágenes de intensidad y de rango contenidas en la base de datos.



Figura 2.6. Dos ejemplos de la imagen de textura y la imagen de rango correspondiente a la base de datos UND.

University of York 3D Face Database (UOY)

Esta base de datos fue adquirida por la Universidad de York (Reino Unido). El sensor utilizado fue una cámara con un sistema de luz estructurada, y únicamente se capturó información tridimensional. Contiene 350 individuos, con 15 imágenes por persona adquiridas en condiciones de iluminación no controladas.

Las condiciones de adquisición fueron: seis orientaciones diferentes (45° izquierda, perfil izquierdo, 45° derecha, perfil derecho, 45° arriba y 45° abajo); cinco expresiones faciales diferentes (sonrisa, ojos cerrados, enfado, cejas levantadas y oclusión parcial); y dos distancias a la cámara diferentes (una distancia óptima de 1.7 m. y otra distancia más alejada de 1.9 m.). La resolución de los mapas de profundidad es de 60x105 píxeles. La Figura 2.7 muestra un ejemplo de los datos adquiridos para un individuo.



Figura 2.7. Ejemplos de adquisición de la base de datos UOY

ATR-HIS

Adquirida por el “*Advanced Telecommunications Research Institute International, Human Information Science Laboratories*”, mediante un escáner láser *Cyberware’s 3D color digitizers*. Esta base de datos (Figura 2.8) se ha utilizado principalmente en animación. Se adquirieron imágenes de 200 personas con 9 gestos diferentes. Todos los individuos son japoneses.

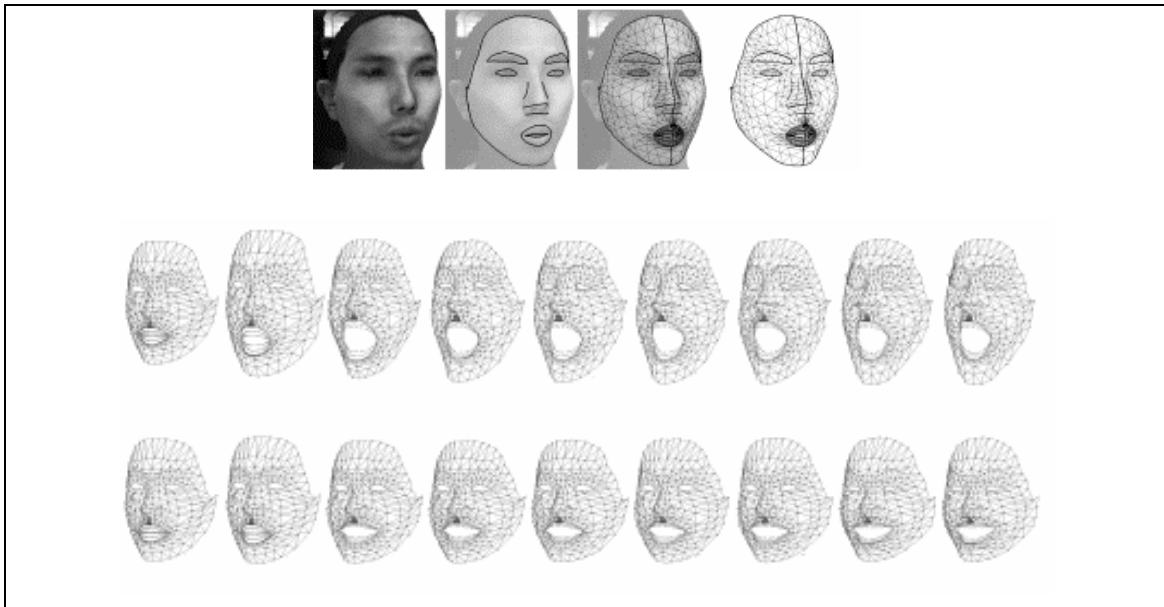


Figura 2.8. Ejemplos base de datos ATR-HIS. Arriba adaptación de un mallado genérico a la captura 3D, abajo ejemplos de gestos incluidos en la base de datos.

USF

La USF DARPA HumanID 3D Face Database fue adquirida en la Universidad de South Florida [USF]. Contiene información tridimensional adquirida con un scanner láser e información de textura. Consta de 138 individuos (97 hombres y 41 mujeres) de diferente edad y raza. En la Figura 2.9 se muestran tres ejemplos pertenecientes a la base de datos.

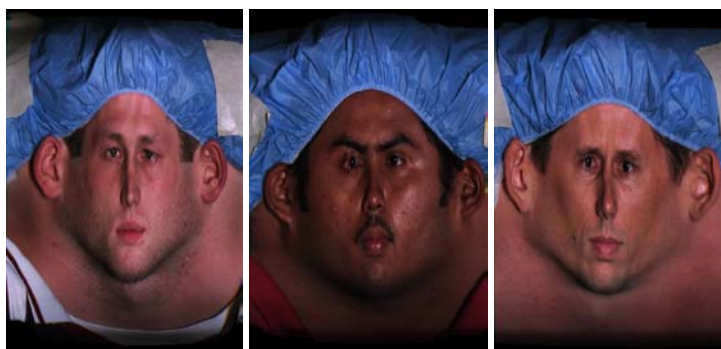


Figura 2.9. Ejemplos imágenes de la base de datos USF.

FRGC. Face Recognition Grand Challenge

FRGC es una competición que tiene como finalidad promover los avances en la tecnología de reconocimiento facial [Phi05]. Actualmente está en fase de registro de los distintos sistemas competidores y suministro de la base de datos a utilizar. Se espera la publicación de resultados para el año que viene. Consta de una serie de elementos puestos a disposición de las distintas entidades participantes: una base de datos multimodal llamada FRGC, un protocolo de evaluación y una herramienta software para la comparación de resultados. Consiste en seis experimentos diseñados para medir la calidad de los sistemas de verificación facial en condiciones de iluminación controladas y no controladas, disponiendo de información tridimensional, de una o varias imágenes, y de ambos tipos de datos: tridimensionales y color.

La base de datos FRGC consta de información tridimensional adquirida con un escáner láser y de imágenes de alta resolución, tomadas en diferentes condiciones de iluminación, y con varias expresiones faciales. Está formada por 200 individuos, con diferentes sesiones de capturas realizadas a lo largo de once semanas, durante dos años académicos. Cada sesión de captura está compuesta por cuatro imágenes tomadas en condiciones controladas, dos adquiridas en condiciones no controladas, y una captura tridimensional (modelo 3D e imagen de textura adquirida a la vez). En la Figura 2.10 puede verse una sesión completa de un individuo. Las imágenes adquiridas en condiciones controladas fueron tomadas bajo dos iluminaciones

diferentes (con dos o tres luces de estudio) y con dos expresiones faciales distintas (neutral y sonrisa). Las imágenes tomadas bajo condiciones no controladas fueron adquiridas bajo una iluminación variable (en un escenario exterior, en un pasillo y en un patio) y con los mismos gestos anteriormente descritos (neutral y sonrisa). Las capturas 3D fueron realizadas en condiciones de iluminación controladas, pero diferentes a las imágenes 2D controladas.

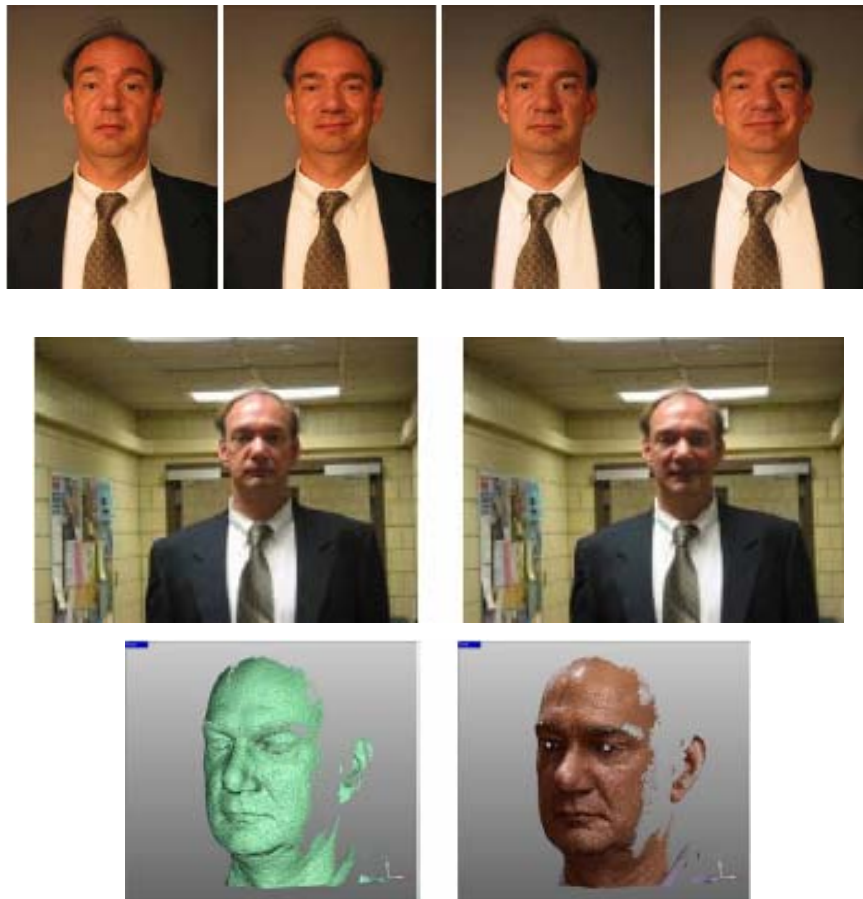


Figura 2.10. Imágenes de la base de datos FRGC correspondientes a una sesión de captura de un individuo. En la primera fila, las cuatro imágenes con iluminación controlada, en las segunda fila, las dos imágenes no controladas, y en la tercera, el modelo 3D y su textura.

El conjunto de datos está dividido en dos particiones diferentes: conjunto de validación y conjunto de entrenamiento. El primero de ellos consta de 12.776 imágenes de 222 sujetos diferentes, y 943 capturas tridimensionales. El segundo conjunto está formado por imágenes de 446 sujetos adquiridas en 4.007 sesiones diferentes.

La resolución de las imágenes es de 1704 x 2272 píxeles, o de 1200 x 1600 píxeles, adquiridas con cámaras de alta resolución. Las capturas 3D fueron realizadas con un escáner Minolta Vivid 900/910 que adquiere una imagen de profundidad de resolución 640 x 480 píxeles y su correspondiente imagen en color registrada.

Futuras Bases de Datos disponibles: FRVT2005, BIOSEC y MPI.

Existen otras bases de datos faciales que aunque actualmente no estén disponibles, sí lo harán en un corto espacio de tiempo. A continuación se detallan sus características:

FRVT2005. Face Recognition Vendor Test 2005

Face Recognition Vendor Test 2005 es la última de una serie de evaluaciones dedicadas a los sistemas de reconocimiento facial [FRVT]. FRVT2005 incluirá datos faciales bidimensionales y tridimensionales. Actualmente no se han hecho públicas las características concretas de la base de datos que se utilizará en esta evaluación.

BIOSEC. Biometric Security European Project

Biosec es un proyecto del Sexto Programa Marco de la Unión Europea [BIOSEC]. La base de datos que se utilizará a lo largo de este proyecto está actualmente siendo adquirida. Se tratará de una base de datos multimodal con información de huella dactilar, iris, voz, cara 2D y cara 3D. Los datos faciales tridimensionales están siendo adquiridos con un sistema basado en luz estructurada. En este momento no hay disponible información más detallada.

MPI (Max Planck Institute for Biological Cybernetics Face Database)

El Instituto Max Planck adquirió una base de datos facial tridimensional [MPI] consistente en capturas de 200 personas (100 hombres y 100 mujeres). A partir de los modelos tridimensionales, se creó una base de datos en 2D con imágenes sintéticas con diferentes grados de giro. Sólo se permitió la distribución de esta base de datos bidimensional dentro del campo de la investigación, dejando únicamente disponibles los modelos 3D de 7 personas. Actualmente se está adquiriendo una base de datos mayor que será de libre disposición.

2.3.- Normalización Facial Tridimensional.

Como se ha presentado en el apartado anterior, en los últimos años han aparecido diferentes bases de datos tridimensionales, cada vez más numerosas y con datos más precisos a medida que los dispositivos de adquisición 3D se iban abaratando y haciéndose más exactos. La gran ventaja de la adquisición de datos en 3D es por un lado su independencia de las condiciones de iluminación, y por otro lado la gran cantidad de información geométrica que proporciona, permitiendo realizar una normalización muy exacta de los datos.

Un paso de importancia relevante en cualquier sistema de verificación facial en 3D es la etapa de normalización, ya que unos datos mal normalizados provocarán un pobre resultado final. La estimación automática de la posición de la cara para una posterior normalización es un campo de investigación muy nuevo, por lo que no existe un gran número de trabajos en la literatura actual.

Los métodos de normalización facial automática pueden clasificarse en métodos basados en puntos característicos y métodos globales. Los primeros tratan de estimar la posición de la cara a partir de relaciones geométricas entre ciertos rasgos faciales (nariz, ojos, etc.). Por el contrario los métodos globales consideran la cara como una entidad única. La gran mayoría de los trabajos existentes en la literatura actual pertenecen al primer grupo.

Como métodos globales podemos citar dos que utilizan estrategias diferentes. En el primero de ellos [Sar01] se realiza un ajuste de un elipsoide a la nube de puntos tridimensionales que representan la cara. La posición es estimada a partir de los ejes mayor y menor del elipsoide. El segundo método global está basado en registro de superficies. En [Sim94] las superficies faciales adquiridas con un sensor de baja resolución son registradas mediante el algoritmo Iterative Closest Point (ICP) [Bes92]. Éste método requiere de una estimación inicial de la posición de la cara.

Las aproximaciones basadas en la localización de puntos característicos son más numerosas. De entre todas ellas, existe un subgrupo que realiza la localización de los rasgos mediante técnicas basadas en el cálculo de curvaturas de la superficie.

La geometría diferencial trabaja con una serie de magnitudes (curvaturas principales, direcciones principales, normales, etc.) que pueden ser utilizadas en visión computacional 3D para resolver una gran variedad de problemas, como en este caso, tareas de normalización y reconocimiento facial. En [Krs98] y [Nut88] pueden encontrarse estos conceptos explicados más en detalle.

En cada punto de una superficie podemos suponer que existen curvas de superficie que la atraviesan; localmente estas curvas están contenidas en planos que intersecan con la superficie en ese punto. El vector normal \mathbf{n} se define como el vector unitario perpendicular a la superficie en cada punto. Como puede verse en la Figura 2.11 (donde se ha representado una superficie genérica), elegido en concreto un plano Π que pase por p y contenga a \mathbf{n} , la intersección de Π con S es una curva plana $\gamma \subset \Pi$ que pasa por p . Se define curvatura normal, que denotaremos por k_n , al valor de la curvatura de la curva γ en el punto p . El valor

del la curvatura normal varía de acuerdo con la dirección del plano de intersección Π (que rotará en torno al vector \mathbf{n}). Repitiendo este proceso para todos los planos normales Π , se definen las curvaturas principales de S en p , denotadas por k_1 y k_2 , como el mínimo y el máximo de las curvaturas con signo obtenidas. Las direcciones principales son las correspondientes a los planos tangentes para los cuales se obtienen las curvaturas principales.

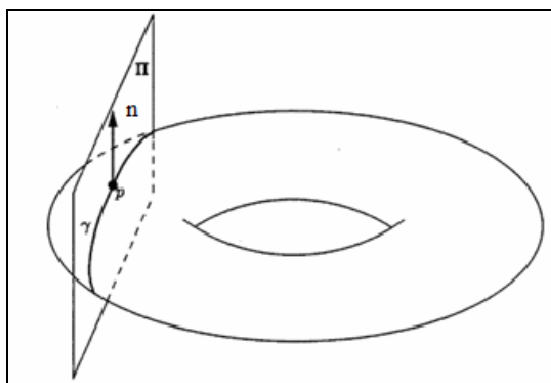


Figura 2.11. Intersección del plano normal a un punto con una superficie genérica. Curvatura normal.

Aunque las curvaturas principales proporcionan mucha información sobre la geometría de una superficie, no permiten discernir la geometría intrínseca de la misma.

Dos curvaturas esenciales para superficies son la curvatura de Gauss y la curvatura media. Se define curvatura de Gauss y se denota por K como:

$$K = k_1 \cdot k_2$$

Se define curvatura media y se denota por H , como el valor medio de las curvaturas principales:

$$H = \frac{1}{2}(k_1 + k_2)$$

Existen distintos métodos para estimar los valores de la curvatura Gaussiana y la curvatura media en un mapa de profundidad. Quizá el método más usual es la aproximación del mapa de profundidad a un paraboloides, superficie analítica de segundo orden. Una vez calculado el paraboloides que mejor se ajusta localmente a cada zona del mapa de profundidad, se procederá a calcular analíticamente los valores de la curvatura Gaussiana y media para cada punto del mapa de profundidad. Para poder utilizar este método la superficie debe ser univaluada en un entorno del punto.

El paraboloides más adecuado para ajustar a los datos faciales es uno con ejes paralelos al eje z (coordenada de profundidad), ya que normalmente la captura se realiza frontalmente al dispositivo de adquisición de datos 3D. El paraboloides de ajuste al mapa de profundidad viene dado por:

$$z = ax^2 + bxy + cy^2 + dx + ey + f$$

donde $A = [a, b, c, d, e, f]$ son los parámetros del paraboloides y $[x, y, z]$ son las coordenadas del punto perteneciente al mapa de profundidad.

Los coeficientes del paraboloides son obtenidos a partir de las soluciones del sistema lineal de ecuaciones (por una aproximación por mínimos cuadrados por ejemplo):

$$X \cdot A^T = z$$

es decir:

$$\begin{pmatrix} x_1^2 & x_1 y_1 & y_1^2 & x_1 & y_1 & 1 \\ \vdots & & \ddots & & & \\ x_n^2 & x_n y_n & y_n^2 & x_n & y_n & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a \\ b \\ c \\ d \\ e \\ f \end{pmatrix} = z$$

Una vez determinados los parámetros del paraboloides de ajuste, las curvaturas Gaussiana y media son calculadas analíticamente a partir de las expresiones:

$$K = \frac{\delta(xx) \delta(yy) - \delta(xy)^2}{(1 + \delta(x)^2 + \delta(y)^2)^2} \quad [\text{Eq. 2. 1}]$$

$$H = \frac{(1 + \delta(x)^2) \delta(xx) - 2 \delta(x) \delta(y) \delta(xy) + (1 + \delta(y)^2) \delta(yy)}{2(1 + \delta(x)^2 + \delta(y)^2)^{3/2}}$$

donde $\delta(x)$ es la derivada primera respecto a x; $\delta(y)$ es la derivada primera respecto a y; $\delta(yy)$, $\delta(xy)$, $\delta(xx)$ son las derivadas segundas respecto a las variables indicadas.

Una de las primeras aproximaciones al uso de curvaturas para reconocimiento facial tridimensional fue la de Gordon et al. [Gor92], en el que a partir del cálculo de las curvaturas principales en la superficie facial interpolada se localizaban varios puntos característicos. La base de datos utilizada para realizar las pruebas constaba de 24 sujetos. En la Figura 2.12 puede

verse una representación de las curvaturas principales calculadas en cada punto de la imagen de rango facial. Existe una evidente relación entre puntos con máxima y mínima curvaturas principales y la localización de los rasgos faciales. Suikerbuik et al. [Sui04] propusieron el uso del valor de la curvatura Gaussiana para encontrar cinco puntos característicos en el modelo facial 3D.

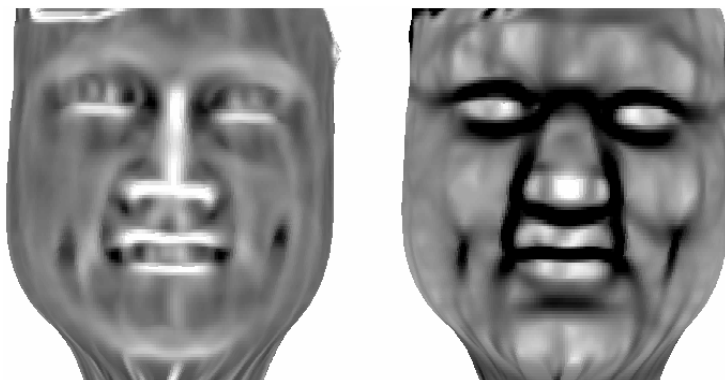


Figura 2.12. Representación en nivel de gris del valor de las curvaturas principales en la superficie facial.

En [Col05] Colbry et al. Presentan un método en el que se realiza una detección de varios “puntos ancla” en la imagen de rango o representación 2.5D. La localización de estos puntos se realiza a partir del “*shape index*” o índice de forma [Eq. 2. 2] calculado en cada punto. El “*shape index*” recoge información de la curvatura en un entorno local de un punto y se define a partir de los valores de las curvaturas principales (k_1 y k_2). Una vez localizados los puntos candidatos a partir de las curvaturas, se aplica un modelo estadístico de la posición de los rasgos dentro de la cara. Una vez localizados los puntos característicos realizan una normalización fina a partir del algoritmo ICP. El porcentaje de éxito descrito en el trabajo alcanza un 95% en el caso de imágenes frontales, y de un 86% en imágenes con variaciones en posición y expresión. En la Figura 2.13 pueden verse los “puntos ancla” localizados.

$$S(p) = \frac{1}{2} - \frac{1}{\pi} \tan^{-1} \frac{k_1(p) + k_2(p)}{k_1(p) - k_2(p)} \quad [\text{Eq. 2. 2}]$$



Figura 2.13. Puntos ancla localizados en la aproximación de Colbry et al.

Lu et al. en [Lu04] presentan una aproximación basada también en el “shape index”. Combinan 5 capturas faciales realizadas con un escáner láser para generar un modelo 3D. A partir del “shape index” localizan el lagrimal de uno de los ojos mediante una convolución en el espacio del “shape index”. En la Figura 2.14 pueden observarse las representaciones faciales en el espacio del “shape index” y los puntos localizados. A partir de un modelo estadístico que contempla las distancias relativas entre los puntos buscados y otras heurísticas basadas en curvatura local de la superficie, encuentran el lagrimal del otro ojo y la punta de la nariz. El sistema es aplicado a una base de datos de 113 escaneados de 18 individuos con cambios en posición, expresión e iluminación. El resultado obtenido es de un 3.5 % de error en la normalización.

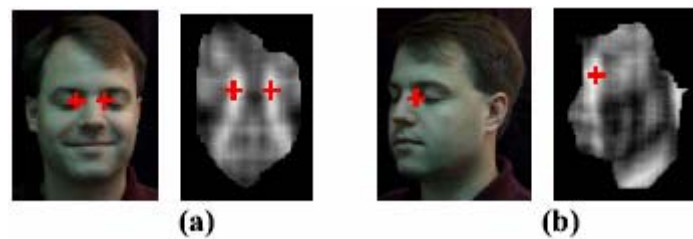


Figura 2.14. Convolución realizada en el espacio del shape index en una imagen frontal (a) y girada (b).

A continuación vamos a presentar otros métodos de normalización automática basados en la localización de rasgos característicos y no basados en curvaturas. En [Boe04] la información de la que se dispone es la imagen de rango y la imagen de textura registrada. Se localizan cuatro rasgos: ojos, nariz y boca. Los ojos y la boca son localizados a partir de la imagen en color, que es representada en el espacio $YCbCr^2$ que produce una imagen representada en escala de grises donde los valores mayores corresponden con los rasgos buscados. En el proceso de localización de los ojos se realiza en primer lugar un preprocesado, donde se aplica una serie de filtros con el objetivo de resaltar las áreas donde se encuentran los ojos y atenuar el resto de áreas. En la Figura 2.15 pueden verse los filtros aplicados y el resultado obtenido. Una vez realizada la imagen, a partir de los valores mínimos e imponiendo la condición de simetría existente entre los ojos, éstos son localizados. El proceso de localización de la boca se realiza de manera semejante en el mismo espacio de color. Por el contrario, la localización de la nariz se realiza a partir de la información de rango, suponiendo que se encuentra en el área entre los ojos y la boca, e imponiendo que sea el punto más saliente. Una vez localizados los candidatos a puntos característicos, se aplica una métrica que mide la confianza en estos rasgos analizando las distancias relativas entre los cuatro rasgos encontrados,

² Y Cb Cr: luminancia, crominancia rojo y crominancia azul.

y las distancias entre un modelo ideal de una cara humana. Este algoritmo se aplicó a la base de datos de la Universidad de Notre Dame [Fly03] obteniendo resultados de un 99.6% de localización correcta en imágenes de alta resolución, y de un 82.33% en imágenes de baja calidad.



Figura 2.15. Filtros aplicados en el proceso de localización de los ojos en la aproximación de Boehnen et al. De izquierda a derecha: mapa de ojos, suavizado, filtro valor mínimo, filtro-Z.

En [Irf04] el objetivo principal es establecer correspondencias entre los puntos de diferentes caras que pertenezcan al mismo rasgo: ojos, mejillas, boca, etc. Es ésta una tarea complicada, ya que los gestos, posición y las propias diferencias entre las caras de los individuos afectan enormemente a la situación de los rasgos. La aproximación utilizada consiste en la determinación automática de 10 puntos de control o “landmark points” (Figura 2.16) para, a partir del cálculo de autovalores y autovectores aplicados a modelos de distribución de los puntos en torno a estos puntos de control, aprender las variaciones de la forma de los rasgos en las distintas caras. La localización automática de estos puntos de control es explicada a continuación.

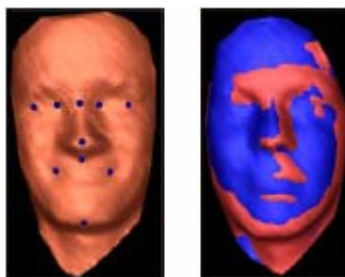


Figura 2.16. Puntos de control buscados en la aproximación de Irfanoglu et al. (izquierda) y caras registradas a pesar de la pérdida de puntos (derecha).

Para realizar este proceso, el conjunto de caras es dividido en dos subconjuntos: entrenamiento y validación. A partir del conjunto de entrenamiento construyen el mallado base, que es aquel que contiene todos los puntos que serán contenidos en todas las caras. Mediante este mallado base, localizarán los “puntos de control” en cualquier cara del conjunto de validación. El proceso de creación de este mallado base es el siguiente: en primer lugar, del conjunto de entrenamiento se selecciona aquella cara que contenga menos puntos, y se marcan manualmente los puntos de control. Mediante el algoritmo “*Thin Plate Spline warping*”

[Boo97] las caras del conjunto de entrenamiento son ajustadas o registradas con ésta cara inicial. A continuación se eliminan los vértices del mallado cuya distancia a cualquier cara registrada sea mayor que un determinado umbral. El resultado obtenido es el mallado base.

Una vez construido el mallado base, se realiza el proceso de la localización automática de los 10 puntos de control buscados en el conjunto de caras de prueba. Esta etapa puede dividirse en varios pasos:

1. Se realiza el cálculo de las curvaturas media y gaussiana en cada punto de la cara.
2. Mediante ICP se registra la cara con el mallado base.
3. Una primera aproximación de los puntos de control es obtenida a partir de los puntos más cercanos de la cara prueba a los puntos del mallado base.
4. Mediante la proyección de todos los puntos sobre el plano de proyección determinado por el mallado base, se elige aquel cuya distancia al plano sea menor, seleccionando este punto como la punta de la nariz.
5. Se realiza una localización fina de la posición de la punta de la nariz a partir de los valores de las curvaturas.
6. Se calcula el plano de simetría de la cara prueba, a partir del plano de simetría del mallado base.
7. A partir de este plano de simetría se obtienen los puntos del entrecejo, la parte inferior de la nariz y la barbilla (Figura 2.16). Se realiza un ajuste fino mediante el valor de las curvaturas.
8. Se localizan los ojos y la boca a partir de sendos planos que contienen estos rasgos, y basándose en el valor de las curvaturas.

Tras este proceso, los 10 puntos buscados son localizados automáticamente, y es posible realizar el registro de dos superficies faciales incluso si una de ellas contiene grandes áreas de datos perdidos, como puede verse en la Figura 2.16. El método se aplica a la base de datos 3D RMA [Beu00], pero no se presenta el porcentaje de localización correcta.

Wang et al. en [Wan02] presentan un método de localización de rasgos faciales a partir de imágenes de rango y de textura. En el espacio 2D, los rasgos son localizados mediante la aplicación de un filtro de Gabor [Wis97], y en el espacio 3D el método de “point signature” [Chu96] o puntos firma es utilizado. En la Figura 2.17 pueden verse los puntos localizados en 2D y 3D. El sistema fue probado en una base de datos de 50 individuos.



Figura 2.17. Los diez puntos característicos localizados en la aproximación de Wang et al., señalados con un punto los localizados en 2D, y con una X los localizados en el espacio 3D.

Existen diversas aproximaciones que realizan la localización de los rasgos mediante métodos basados en perfiles, es decir, el análisis de las curvas resultantes del corte de la superficie facial con un plano determinado. Estos métodos requieren de una exacta determinación del plano de extracción del perfil, ya que una mínima variación en posición puede generar una gran variación en el perfil resultante. En [Coo04] la superficie es aproximada con una representación B-spline y a partir de diferentes perfiles se obtienen la punta de la nariz, el puente de la nariz y las cejas. En la Figura 2.18 pueden verse los puntos localizados en el perfil.

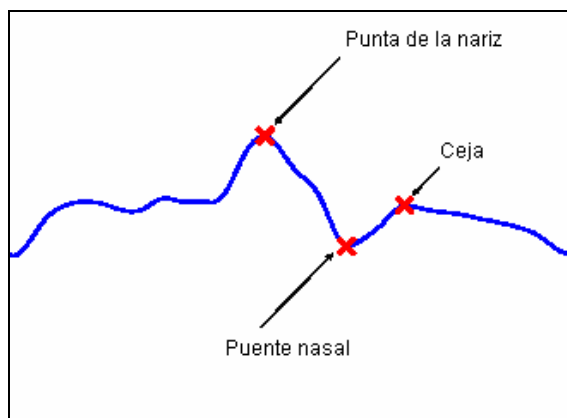


Figura 2.18. Puntos característicos localizados en el perfil en Cook et al.

En [Lee05] se presenta un sistema que localiza ocho puntos característicos (Figura 2.19) basándose en características geométricas de curvatura y profundidad. Para ello utilizan un sistema basado en el cálculo de perfiles o cortes de la superficie facial con distintos planos. A partir del perfil o silueta de la cara obtienen una serie de curvas, a las que aplican un estudio de curvaturas obteniendo cinco puntos característicos. Los otros tres puntos característicos los localizan a partir de la curvatura de la superficie, calculada mediante derivadas en la componente de profundidad, y localizando las zonas cóncavas de la cara. Se realizan pruebas en una base de datos de 100 individuos.

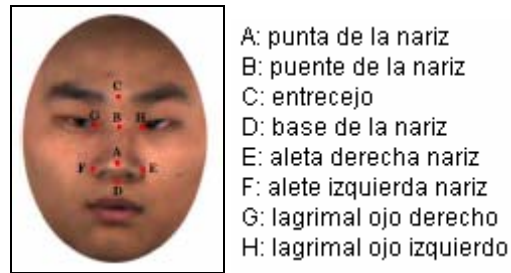


Figura 2.19. Puntos característicos localizados por Lee et al.

Un original trabajo es el presentado por Lao et al. en [Lao00], donde como puntos característicos para realizar la normalización se localizan los iris y la boca. Como sensor de adquisición utilizan un par estéreo, obteniéndose imágenes de baja resolución en profundidad. La localización de los iris se realiza buscando arcos cuyos radios estén dentro de un cierto rango. Suponen que el tamaño del iris es aproximadamente el mismo en todas las personas. Postulan un modelo de iris (Figura 2.20) como un par de círculos de 1 cm. de diámetro, con una distancia entre ambos variable de entre 6 y 7 cm. La boca la encuentran en el plano perpendicular a la línea central entre los iris. Mediante estos tres puntos (iris y boca) realizan la normalización.

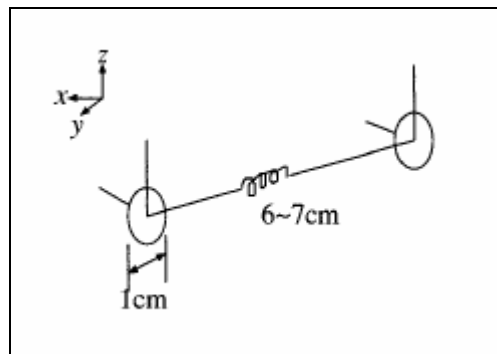


Figura 2.20. Modelo 3D genérico de los iris propuesto por Lao et al.

Finalmente presentamos el trabajo de Malassiotis y Srinizis [Mal05] en el que se realiza una detección de la cara, estimación de la posición y seguimiento en vídeo. El sensor de captura ha sido desarrollado por ellos mismos y está basado en luz estructurada [Tsa05] (Figura 2.21). La detección de la cara la realizan a partir de un modelo estadístico cabeza-torso en el espacio 3D. El proceso de estimación de la posición de la cara se basa en una localización muy robusta de la punta de la nariz y en la aplicación de condiciones de simetría. La punta de la nariz es localizada en el mapa de profundidad a partir de un análisis de la curvatura 3D, suponiendo que debe haber un mínimo de curvatura en ese punto ya que su forma se aproxima a una esfera. Una vez este punto es localizado, hallan el puente de la nariz mediante la detección de los

puntos locales de mínima profundidad por encima de la punta de la nariz, y cuya posición sea lineal (Figura 2.22). Se realiza entonces la estimación de la posición de la cara aproximando el puente de la nariz con un segmento en el espacio 3D y calculando los parámetros de esta recta. Mediante estos parámetros se estiman dos de los tres grados de libertad de rotación. El tercero (rotación en torno al puente de la nariz) se estima mediante simetría bilateral.

El sistema se aplica a una base de datos de más de 2000 imágenes, obteniendo únicamente 8 imágenes con los puntos característicos mal localizados. Se realiza también un estudio del ángulo mínimo de rotación que puede ser determinado correctamente (resolución en grado de rotación). Para ello se utiliza una base de datos de 10 hombres (imágenes cercanas a la cámara) y cinco hombres y cinco mujeres (imágenes lejanas a la cámara). El error resultante es de aproximadamente 5° en el ángulo de rotación y 5 mm. en posición.



Figura 2.21. Sistema de luz estructurada e imagen de rango de Malassiotis y Srinatzis

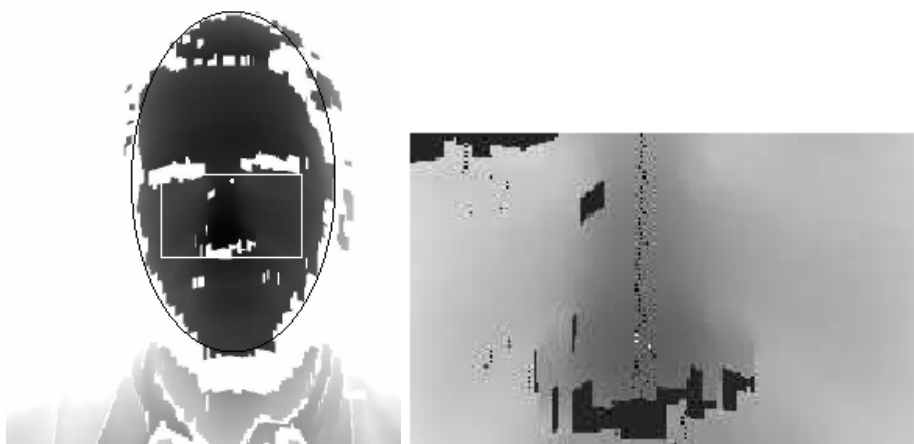


Figura 2.22. Localización de la nariz y del puente nasal en Malassiotis y Srinatzis

2.4.- Reconocimiento Facial en 3D.

Diferentes evaluaciones y competiciones realizadas en los últimos años, como el “*Face Recognition Vendor Test 2002*” [Phi02] o el BANCA [BAN03], evidencian que el estado actual de las técnicas de reconocimiento facial no es lo suficientemente maduro como para dar respuesta a la gran demanda social y comercial existente. Existen otras técnicas biométricas que ofrecen un alto grado de seguridad, como por ejemplo la huella dactilar o el iris, pero requieren de una gran cooperación por parte del individuo. En el caso del reconocimiento facial, la adquisición de datos es mucho menos intrusiva, pudiendo realizarse sin que la persona sea consciente de ello. Este hecho hace que el reconocimiento facial sea muy prometedor a la hora de realizarlo en zonas como aeropuertos o fronteras, donde es importante no interferir en gran manera en el movimiento de personas.

Habitualmente el término reconocimiento facial es usado de manera general para hacer referencia a dos aplicaciones diferentes: reconocimiento y verificación. Hablaremos de reconocimiento o identificación en el caso de que la identidad del sujeto sea deducida únicamente a partir de sus características faciales. La entrada del sistema sería la imagen del individuo, y como salida se indicaría de qué persona se trata. Los sistemas de Verificación o autenticación son aquellas en que además de la imagen, se indica qué persona reclama ser la correspondiente a esa cara. El sistema autentifica esta relación, indicando mediante una salida bivaluada si esta aseveración es correcta o es falsa.

En ambos tipos de reconocimiento, se dispone de una base de datos donde se recoge la información facial de los diferentes individuos. Esta base de datos es introducida en el sistema, para que aprenda alguna de sus características. A este conjunto se le llama conjunto de entrenamiento o de galería. Imágenes de otras personas que pueden estar o no incluidas en el conjunto de entrenamiento, son utilizadas como conjunto de prueba o validación. En el caso de un sistema de reconocimiento o identificación, se trata de un sistema de relación uno-a-muchos, en el sentido de que cada imagen de prueba es comparada con todos los individuos del conjunto de entrenamiento, para encontrar con cuál de ellos el resultado del sistema es mejor. Un sistema de verificación o autenticación se trata de un sistema de relación uno-a-uno, ya que la imagen de prueba sólo es comparada con la persona que se “reclama” ser.

Actualmente existen muchas más aproximaciones al problema de la verificación facial que a la identificación. Esto es debido a que por un lado, la identificación es una tarea de mayor

complejidad, y por otro lado a que la gran mayoría de las técnicas de verificación podrían adaptarse a identificación, aunque con un coste computacional mayor.

La evaluación de la calidad de un sistema de verificación requiere de un detallado análisis de los posibles aciertos y fallos del sistema. Como hemos explicado anteriormente, un sistema de verificación tiene como salida dos valores: aceptación o rechazo. Una salida con valor “aceptación” indicará que efectivamente la imagen introducida y la persona que se reclama ser corresponden. En caso contrario indicaría que se trata de un impostor, y la salida del sistema sería “rechazo”. Si se repitiera esta prueba para un conjunto de individuos, se obtendrían unas distribuciones de impostores y de auténticos semejante a la mostrada en la Figura 2. 23.

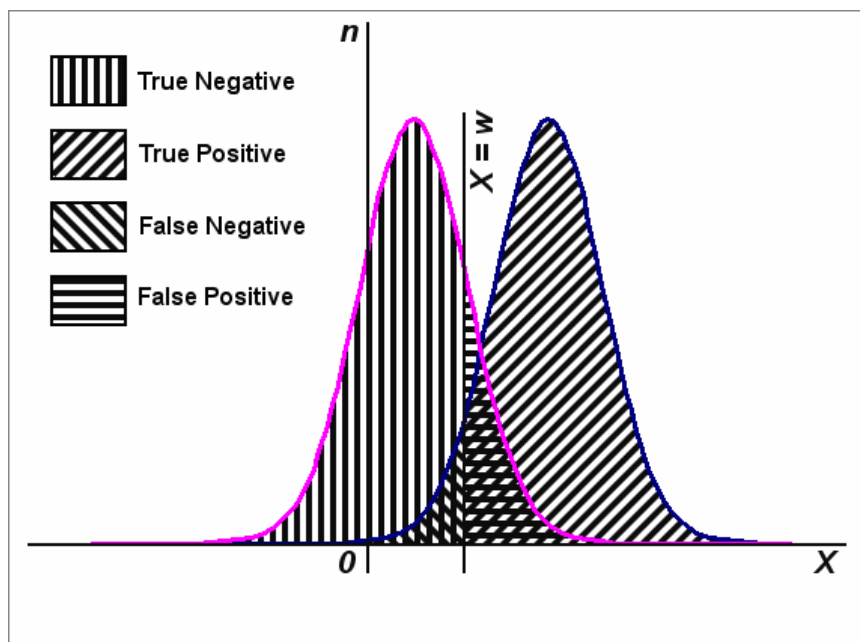


Figura 2. 23. Ejemplo de distribución de casos auténticos e impostores, en función de un valor de salida X de un clasificador. El valor $X=w$ es el umbral que separa los casos auténticos de los impostores.

Existen por lo tanto cuatro posibilidades, como se indica en la Figura 2.24:

- Una persona se identifica correctamente ante el sistema y éste le acepta: verdadero positivo (TP, de “*True Positive*”).
- Una persona se identifica correctamente ante el sistema, pero este le rechaza: falso negativo (FN, de “*False Negative*”).
- un impostor se identifica con la identidad de otro y el sistema acepta: Falso Positivo (FP, de “*False Positive*”).

- un impostor se identifica con la identidad de otro y el sistema le rechaza: Verdadero Negativo (TN, de “*True Negative*”).

Es decir, las salidas del sistema pueden ser aciertos (a los que llamaremos como Verdaderos positivos o negativos) o pueden ser fallos (serán los Falsos positivos y negativos). En todo sistema de verificación obviamente se pretenden minimizar los Falsos Positivos y los Falsos Negativos. En la Figura 2. 23 pueden verse esta clasificación de las salidas del sistema en función de las distribuciones de densidad de las salidas del clasificador y del valor del umbral de aceptación ($X=w$).

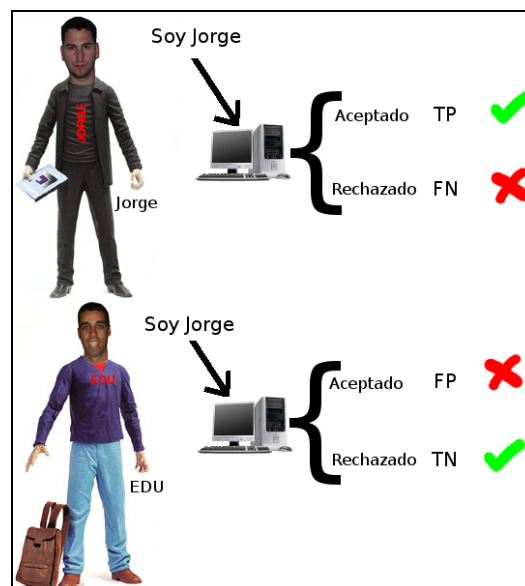


Figura 2.24. Aciertos y Fallos posibles en un sistema de Verificación Facial.

Si se tienen en cuenta todas las salidas del sistema para la confrontación de todos los sujetos del conjunto de validación, incluidos la confrontación con ellos mismos, se obtendrá una serie de valores para estos parámetros. La representación de estos fallos y aciertos en porcentajes, se realizará mediante las siguientes expresiones:

$$\%TP = \frac{TP}{TP + FN} \quad \%TN = \frac{TN}{TN + FP} \quad \%FN \text{ ó } FRR = \frac{FN}{FN + TP} \quad \%FP \text{ ó } FAR = \frac{FP}{FP + TN}$$

Mediante estas expresiones se cumple que:

$$\begin{aligned} \%FP + \%TN &= 100\% \text{ de impostores} \\ \%FN + \%TP &= 100\% \text{ de auténticos} \end{aligned}$$

Por lo tanto los errores del sistema serán de dos tipos: el %FN o FRR (*False Rejection Rate*) y el %FP o FAR (*False Acceptance Rate*). La decisión de aceptar o rechazar del sistema

verificador viene impuesta por la medida de la similitud entre la imagen introducida y la imagen almacenada en la base de datos de la persona que se “reclama” ser. Si el valor de similitud, supera un determinado umbral, se considerará una aceptación. En caso contrario, se rechazará al individuo. El valor del umbral utilizado definirá si se trata de un sistema de alta seguridad, o si se trata de un sistema más “amigable” pero de más baja seguridad. En función del valor de este umbral, el sistema generará un número concreto de FN, FP, TP y TN. Una manera global de representar la evolución del sistema en función del valor del umbral es la llamada curva ROC (“*Receiver Operator Characteristic*”). Esta curva, que puede verse en la Figura 2.25, representa el porcentaje de falsos positivos vs. el porcentaje de falsos negativos.

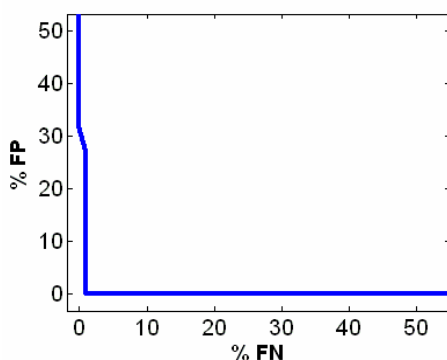


Figura 2.25. Ejemplo de curva ROC

Para caracterizar la calidad del sistema verificador mediante un único valor, habitualmente se elige el punto de la curva ROC en que el %FN es igual al %FP. Este punto es el corte de la curva ROC con la sección $y=x$ del primer cuadrante, como puede verse en la Figura 2.26, y se denomina “*Equal Error Rate*” (EER). Cuanto más bajo sea el EER nos indicará que el sistema tiene menos fallos.

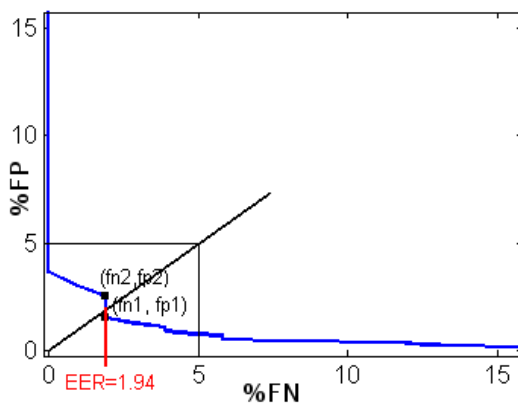


Figura 2.26. Cálculo del “*Equal Error Rate*” (EER).

La gran mayoría de los sistemas de verificación facial tanto a nivel comercial como de investigación usan imágenes de color o de intensidad. A estas imágenes nos referiremos como imágenes 2D o de textura, en contraposición a las representaciones faciales tridimensionales, a las que llamaremos modelos o imágenes 3D. Existen diferentes maneras de representar la información tridimensional. Por un lado simplemente pueden representarse como una nube de puntos en el espacio. Estos puntos pueden representarse también en forma de mallado, donde cada punto es un vértice y a su vez los vértices están unidos por aristas. El polígono o geometría a utilizar para realizar esta unión es habitualmente un triángulo, ya que es la manera más simple de aproximar una nube de puntos a una superficie. Otra aproximación diferente muy utilizada son los mapas de profundidad o imágenes de rango. Son imágenes en escala de grises donde el nivel de intensidad de cada píxel está relacionado con la coordenada de profundidad z de un punto tridimensional. también es muy habitual disponer de información tridimensional registrada con la imagen de textura. En la Figura 2.27 puede verse un ejemplo de estos diferentes tipos de información facial tridimensional.

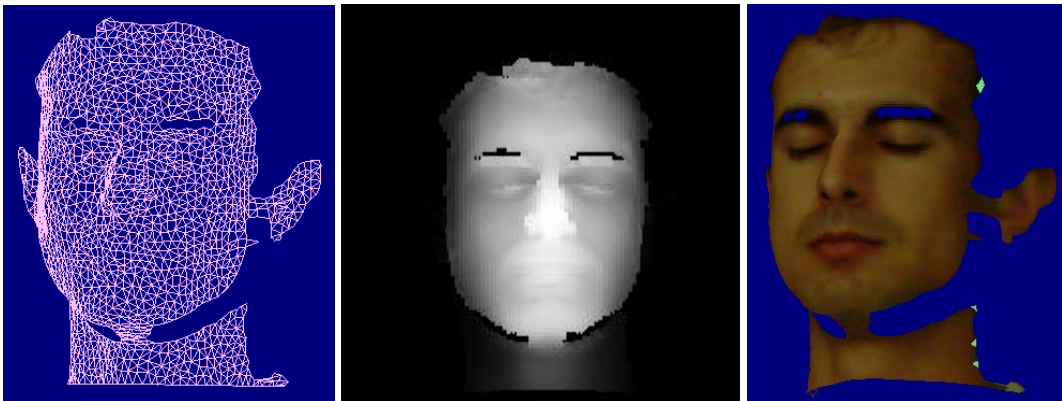


Figura 2.27. Diferentes modos de representación de la información facial 3D. De izquierda a derecha: mallado, mapa de profundidad, mallado+textura.

En este apartado nos vamos a centrar en la realización de un análisis del estado de la técnica actual de los sistemas de verificación facial en 3D, mostrando los trabajos que hemos considerado más interesantes y que han tenido más repercusión.

A principios de los años 80 los primeros dispositivos de información 3D comenzaron a mostrarse eficaces, haciendo prever un futuro prometedor en el campo del reconocimiento de objetos. Actualmente ese interés se ha trasladado a la comunidad científica biométrica. Existen diferentes razones para este incremento de los sistemas de verificación facial 3D: por un lado, los sensores de adquisición 3D han rebajado enormemente su coste; por otro lado, la capacidad de cálculo cada vez mayor de los computadores permite una manipulación de los datos 3D, muy costosa debido a la enorme cantidad de información que proporciona.

Tabla 2.2: Trabajos publicados en Reconocimiento Facial 3D. Se indica el número de individuos usados en el entrenamiento (entr.) y en la validación (prueba).

Autores (primero) y año	Numero individuos BBDD	Numero de imágenes	Diferentes Condiciones adquisición	Porcentaje aciertos	Tipo de sensor
Cartoux 89	5	18 entr.	No	100%	Rango
Lee 90	6	6	No	No se dan	Rango
Gordon 91	26 entr. 8 prueba	26 entr. 24 prueba	No	100%	Ciberware
Nagamine 92	16	160	No	100%	Rango
Acherman 97	24	120 entr. 120 prueba	5 posiciones	No	Rango
Chua 98	6	24	4 expresiones	85%	Rango
Tanaka 98	37	37	No	No se dan	Rango
Lao 00	10	360	9 posiciones 2 iluminación	91%	3 cámaras estéreo
Beumier 01	26	26	No	EER=2.5%	Luz Estructurada
Blanz02	68	21	Frontal Perfil	99.8% 89%	Modelo genérico + textura
Hesher 03	37	222	6 expresiones	97%	Rango
Medioni 03	100	700	7 posiciones	98%	Par estéreo
Pan 03	30	360	Posiciones	EER=3-7%	Rango
Chang 03	166	332	No	82.8%	Rango
Xu 04a	120	720	Expresiones	96% en 30 personas 72% en 120 personas	Rango
Russ 04	200	468	Tiempo	98%	Rango
Lu 04	18	113	Expresiones Posiciones	96%	Rango
Wong 04	5	5	No	80%	Rango
Bronstein 05	157	157	Sí	EER=2.5%	Luz estructurada

Durante la década de los 90 aparecieron ya algunos trabajos de reconocimiento facial tridimensional [Car89] [Gor92] [Lee90] [Nag92]. En los últimos años ha aumentado enormemente el interés por éste área de investigación, como puede verse en la tabla 2.1, aunque la cantidad de trabajo publicado es todavía muy inferior a la de 2D.

En el último año han aparecido algunos trabajos de recopilación [Bow04] [Sch05] [Kit05], aunque es un campo muy novedoso en el que todavía no hay una literatura muy abundante.

Podemos clasificar los métodos de reconocimiento facial en tres grandes grupos: aquellos basados en alguna caracterización o medida de la superficie facial; aquellos donde la clasificación se realiza por comparación con una plantilla o modelo; y otra serie de métodos que no encajan en ninguna de estas dos categorías. Los métodos basados en superficies, pueden a su vez dividirse en métodos locales y métodos globales.

2.4.1. Métodos basados en características superficiales.

Dentro de este apartado vamos a distinguir entre los métodos que se basan en características locales y globales de la superficie.

a) Métodos Locales:

Gordon et al. [Gor91] propuso características geométricas (curvaturas principales), descriptores de superficies (líneas de puntos silla y puntos valle) y descriptores estructurales (posición de los rasgos, distancia entre ellos, etc.) para caracterizar las caras, que son representadas mediante una superficie. En el apartado 2.2 se ha explicado más detalladamente cómo realizaban la localización de los puntos característicos a partir de las curvaturas principales. También calculaban los puntos umbilicales que dan una información relevante a la hora de describir la superficie facial. Como parámetro de clasificación utilizaron la diferencia de volúmenes entre dos superficies. Los resultados experimentales son bastante escasos en este trabajo.

Chua et al. [Chu00] aplicaron el método de “*point signature*” o puntos firma para la representación de superficies de forma libre, y lo aplicaron a la representación de la superficie facial. El método propuesto primero realizaba un registro de superficies de caras 3D con distintos gestos mediante el método de puntos firma aplicado a regiones de la cara rígidas, ya que el método de puntos firma sólo puede aplicarse a objetos 3D rígidos. Una vez que el modelo facial era creado, se usó un umbral adaptativo para dada una superficie clasificarla en zonas

rígidas y no rígidas. Como proceso de clasificación se utilizó un sistema de votación que comparaba los distintos puntos firma de los distintos modelos de la base de datos.

En [Xu04a], Xu et al. presentaron un método de reconocimiento 3D basado en la realización de un análisis PCA a un conjunto de rasgos localizados en la cara. A partir de la nube de puntos 3D se construía el mallado. La nariz era localizada y a partir de su posición se localizaban otros rasgos como la boca y los ojos. A partir de estos rasgos locales se extrae un vector de características y se reducía la dimensión del espacio de características mediante un análisis PCA. Para ello se basan en el cálculo de momentos de Gauss-Hermite como descriptores locales combinados con el mallado 3D. El reconocimiento se realiza mediante la aplicación de la distancia mínima entre el vector de características locales y también entre algunos componentes globales, tomando como conjunto de entrenamiento 5 imágenes por individuo. Se realizaron diferentes experimentos sobre una base de datos de 120 personas con un resultado del 72% de reconocimiento correcto.

Souros y Buxton propusieron en [Dou02] el uso de la curvatura Gaussiana para definir “parches” o áreas de la superficie mediante ecuaciones cuadráticas, y su utilización para extraer áreas significativas del cuerpo. Los autores afirman que este método puede utilizarse para realizar reconocimiento en cualquier modelo 3D.

b) Métodos Globales:

Cartoux et al. [Car89] fue una de las primeras trabajos relativos al Reconocimiento Facial 3D. El sistema planteado se basaba en la creación de perfiles mediante la intersección de diferentes planos con los datos 3D, y en el análisis de la propia superficie facial 3D. Realmente no combinaron ambos tipos de información, sino que los perfiles fueron utilizados como información complementaria en la tarea de verificación. En primer lugar se calculó el plano de simetría y su perfil correspondiente. La posición de este plano se calculaba de manera iterativa, hasta encontrar el óptimo para la tarea de verificación. Se presentaron resultados por separado usando el perfil y la superficie facial 3D, mediante un método basado en distancia más cercana. Afirman que obtenían el 100% de aciertos, aunque este resultado no es representativo ya que la base de datos constaba únicamente de cinco individuos. El porcentaje correcto de verificación se ve más afectado por la calidad de los datos adquiridos en el sistema basado en perfiles que en el de superficie.

Lee y Milios [Lee90] propusieron representar las caras mediante las “*Extended Gaussian Images*” (EGI) para realizar la comparación entre dos superficies. Las caras son segmentadas en diferentes zonas según los signos de las curvaturas principales en las áreas

convexas (nariz, mejilla, barbilla y frente), y cada una de estas áreas es representada mediante una EGI. Usando el coeficiente de correlación entre dos EGIs se mide la similitud entre las dos caras, realizando el proceso de verificación. Usan una función tipo OR para fusionar los resultados de clasificación de cada una de las EGIs y obtener un resultado final. Wong et al. [Won04] presentaron otro método global en el que la superficie facial era representada también con EGIs. De este modo el problema de reconocimiento en 3D se reduce a un problema de comparación de histogramas en 2D. Como método de comparación utilizaron un clasificador basado en una función de probabilidad condicional múltiple (MCPMFC). Testaron el sistema en una base de datos de 5 individuos obteniendo un 80.08% de tasa de reconocimiento. Estos resultados no pueden considerarse relevantes debido al pequeño tamaño de la base de datos.

Nagamine et al. [Nag92] propusieron un método para reconocimiento facial basado en los perfiles creados al intersecar la superficie facial con un plano vertical, un plano horizontal y un cilindro. La base de datos de la que disponían constaba de 10 individuos, con 9 imágenes 3D por persona. Realizaron la media de las 9 imágenes disponibles para cada persona y extrajeron los perfiles antes descritos para cada cara media. Estos perfiles son usados para caracterizar a cada individuo como vector de características, extrayendo un vector de características por perfil. La clasificación se realizó mediante distancia euclídea entre los vectores de características, de manera independiente para cada uno de los perfiles. Los resultados muestran que mediante el perfil con el plano vertical y con el cilindro se obtuvo un 100% de aciertos, mientras que a partir del perfil horizontal se obtuvo un 96.3% de tasa de reconocimiento. La extracción de los perfiles debe ser cuidadosa ya que el porcentaje de reconocimiento es muy sensible a variaciones en la localización de éstos. Beumier y Acheroy en [Beu00] propusieron un método también basado en perfiles, en este caso verticales. Inicialmente usaron tres perfiles verticales de cada cara y obtuvieron un 9% de error al testarlo en una base de datos de 30 individuos. En un trabajo posterior [Beu01], añadieron información del nivel de gris de las imágenes de textura a los perfiles, reduciendo la tasa de error al 2.5% al aplicar el nuevo método a la misma base de datos. Wu et al. en [Wu03] utilizaron un método de reconocimiento basado en perfiles horizontales extraídos a partir del modelo 3D. Comparando estos perfiles con los de otros sujetos en un base de datos de 30 personas, obtuvieron una tasa de error entre el 1% y el 5.5%.

Acherman et al. en [Ach97] realizaron una comparación entre la técnica de autocaras [Tur91] y los Modelos Ocultos de Markov (HMM) [Rab86] aplicados a imágenes de rango. Disponían de varias imágenes de rango por persona, adquiridas con la cara girada, y realizaban la unión de ellas para obtener una imagen global. La base de datos utilizada constaba de 24 individuos capturados con cinco grados de rotación diferentes. Los resultados mostraron que el método de autocaras era más eficaz que el método HMM.

Tanaka et al. en [Tan98] afrontaron el problema del reconocimiento facial como un problema de reconocimiento de superficies. Cada cara 3D es representada mediante una “*extended gaussian image*” (EGI) y proyectada a un espacio de vectores 3D correlados calculados a partir de las principales curvaturas y las direcciones principales. Se comprobó la efectividad de esta representación en un subconjunto de puntos de máxima curvatura y otro de mínima curvatura. El método de clasificación usado era la correlación esférica de Fisher [Fis86] [Fis87]. Los autores afirmaban en este trabajo que el método presentado era robusto frente a diferentes condiciones faciales como gafas, pelo facial o corte de pelo. La base de datos utilizada para la realización de experimentos constaba de 37 individuos. Como resultado final indican que el coeficiente de similitud entre caras de un mismo individuo obtenido era del 44%, y la similitud entre caras de distintos individuos era de un 13%.

Hesher et al. en [Hes03] analizaron caras 3D frontales con seis diferentes expresiones mediante un análisis de componentes principales PCA y un análisis de componentes independientes (ICA). Inicialmente las caras eran normalizadas y sus coordenadas eran trasladadas a un origen situado en el plano XY en una posición de z predefinida. El tamaño del conjunto de entrenamiento fue variado en distintos experimentos. Los resultados mostraron que los mejores resultados se obtenían al utilizar el conjunto de entrenamiento y aplicando el método ICA con 10 componentes independientes. Sin embargo no se muestra un estudio independiente para cada una de las diferentes expresiones.

Medioni y Waupostitsch en [Med03] presentan un sistema de adquisición de datos 3D basado en un par estéreo. Se mide la similitud de dos mallados a partir de diferentes medidas estadísticas entre dos superficies, y se muestran diferentes resultados de comparación para caras adquiridas en diferentes posiciones.

Pan et al. en [Pan03] compararon dos métodos de reconocimiento 3D: uno basado en la medida de la distancia Hausdorff entre superficies, y otro un método basado en análisis de componentes principales (PCA). Se realizaron diferentes pruebas con la base de datos M2VTS [Mes99], obteniéndose un Equal Error Rate (EER) de entre el 3% y el 5% mediante el método basado en la distancia Hausdorff, y un EER entre el 5% y el 7% en el método basado en PCA.

Russ et al. presentaron en [Rus04] realizaron el proceso de reconocimiento mediante la medida de la distancia Hausdorff entre imágenes de rango. En los experimentos presentados utilizaron parte de la base de datos de la Universidad de Notre Dame [Fly03]. El primer experimento constaba de 200 personas en el conjunto de entrenamiento, y las mismas 200 personas más 68 impostores en el conjunto de validación. Los resultados presentados son de un

porcentaje de “verdaderos positivos” igual a 98%, y de “falsos positivos” igual a cero. En el segundo experimento, realizado con 30 personas, incluyen un lapso de tiempo entre las imágenes del conjunto de entrenamiento y de validación, obteniéndose en el punto de “falsos positivos” igual a cero, un porcentaje de reconocimiento correcto igual al 50%.

2.4.2. Métodos basados en comparación con una plantilla.

Lu et al. [Lu04] utilizaron un sistema de reconocimiento facial basado en el algoritmo de registro de superficies “*Iterative Closest Point*”. Como restricción imponen que el conjunto de modelos 3D de galería sean más completos que los del conjunto de entrenamiento, y toman como modelo de comparación una imagen 3D frontal del individuo. En experimentos realizados con una base de datos de 18 personas obtienen una tasa de reconocimiento de un 97%.

Lao et al. propusieron en [Lao00] un método para reconocimiento facial basado en la comparación de los modelos faciales con una plantilla. Los modelos fueron adquiridos mediante un sistema estéreo con tres cámaras. Una vez que los modelos fueron adquiridos, el sistema localizaba los iris y la boca en la cara. Mediante estos rasgos se realizaba la normalización en posición. El método planteado para realizar el reconocimiento se dividía en cuatro pasos: en primer lugar se normalizaban las coordenadas de las caras a un mismo sistema de coordenadas; después, las caras eran divididas en regiones de 5 mm. por 5 mm. no solapadas entre sí; el tercer paso consistía en la determinación de la distancia media entre todas las subregiones del modelo prueba y el resto de modelos que se quisieran comparar; finalmente se seleccionaba como modelo identificado aquel cuya distancia media con la cara de prueba fuera menor. Como resultados experimentales los autores indican que el porcentaje de reconocimiento correcto varía desde un 87% en el caso de caras giradas hasta un 96% en el caso de caras frontales.

Blanz, Vetter y Romdhani propusieron el uso de un modelo 3D deformable para su uso en el reconocimiento de imágenes 2D [Bla02] [Bla03] [Rom03]. Probaron este método en una base de datos de 68 personas, obteniendo un 99.8% de tasa de reconocimiento en el caso de imágenes frontales y neutras, y de un 89% en imágenes de perfil. Huang et al. [Hua03] añadió al modelo genérico 3D información mediante un método basado en componentes, presentado en el trabajo de Heisele et al. [Hei03]. La tasa de reconocimiento mediante este método vario entre el 75% y el 99% según las condiciones de las imágenes.

En [Naf02] se realiza una detección automática de los puntos característicos faciales en modelos 3D adquiridos con un par estéreo de cámaras. Los puntos faciales son encontrados en la información de textura mediante un modelo ASM (“*Active Shape Model*”) y mediante los

datos del par estéreo son localizados en el modelo 3D. El sistema fue testado en una base de datos de 25 individuos con un resultado de un 80% de tasa de reconocimiento. Un método basado en una idea similar fue presentado en [Ans03] por Ansari y Abdel-Mottaleb, en el que usaron el modelo genérico CANDIDE-3 [Ahl01]. Mediante un par estéreo se adquirieron tanto imágenes de textura como modelos faciales 3D. A partir de las imágenes de textura se localizaron puntos característicos alrededor de los ojos, la boca y la nariz, y mediante el algoritmo del par estéreo de cámaras se halló la correspondencia de estos puntos con los datos 3D. El modelo genérico CANDIDE-3 fue deformado para ajustarse a estos puntos localizados en los datos 3D adquiridos por el par estéreo, obteniendo como resultado un mallado 3D para cada individuo. El reconocimiento facial se realizó de manera independiente para los ojos, la nariz y la boca. Aplicando este método a una base de datos de 26 individuos se obtuvo un 96.2% de tasa de verificación correcta.

2.4.3. Otros métodos.

Los hermanos Bronstein y Kimmel presentaron en [Bro03] un original método basado en la representación canónica de las superficies faciales de modo invariante a isometrías (como cambios de expresión o de posición) y su transformación a un espacio euclídeo plano. La representación canónica se realiza mediante la extracción de características geométricas intrínsecas de las superficies faciales usando invariantes geométricas. Para ello usan el método de reducción espacial “*bending-invariant canonical form*” [Ela01] con el que construyen una representación canónica o “firma” de superficies isométricas al transformar las superficies a un espacio plano. Este método requiere la medida de distancias geodésicas entre superficies, siendo un proceso extremadamente costoso. Un punto crucial para poder aplicar este método en un caso real es su optimización aplicada a superficies representadas como mallados triangulares, presentado por Kimmel en [Kim98]. La incorporación de la información de textura a esta representación canónica de la superficie tridimensional es posible ya que se dispone de la información 2D registrada con la 3D. De este modo representan la información de textura en el espacio canónico, llamada “*flattened texture*” o textura aplanada; y la información tridimensional en el espacio canónico, a la que llaman “imagen canónica”. En la Figura 2.28 puede verse un ejemplo de estas dos imágenes del mismo individuo. El método de verificación utilizado está basado en el Análisis de Componentes Principales. La base de datos utilizada en la realización de experimentos consta de 64 niños y 93 adultos (115 hombre y 42 mujeres). Los resultados experimentales que se muestran hacen referencia únicamente a la comparación entre dos gemelos idénticos (los hermanos Alex y Mike Bronstein autores del trabajo). Se muestra una mejora en la capacidad de verificación al utilizar las imágenes canónicas (tanto textura

como rango) en lugar de usar las imágenes capturadas. Estos mismos autores han publicado recientemente en [Bro05] una variación de este método donde la estructura geométrica de la superficie se proyecta en un espacio esférico en lugar de plano. Los resultados experimentales previos muestran una evidente mejora en la tasa de reconocimiento, obteniendo un EER aproximado del 2.5% en el caso del primer vecino más cercano, usando una métrica basada en armónicos esféricos.

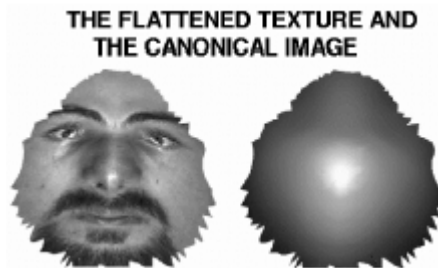


Figura 2.28. Ejemplo de las dos formas canónicas del trabajo de los hermanos Bronstein y Kimmel: izquierda la textura y a la derecha la información de rango.

Mavridis et al. en [Mar01] introdujeron el concepto de componentes principales aplicados a modelos 3D obteniendo las autocaras 3D. Tsalakanidou et al. [Tsa03] propusieron la combinación de mapas de profundidad con imágenes de textura. En un primer trabajo usaron un método de autocaras sobre una base de datos de 40 personas, obteniendo un 99% de tasa de reconocimiento. En un segundo trabajo [Tsa04] usaron modelos ocultos de Markov (HMM) en lugar del autocaras, obteniendo una tasa de error entre el 7% y el 9%.

En el trabajo de Xu, Wang y Tan en [Xu04b] el mallado 3D de cada una de las caras es generado a partir de la nube de puntos en el espacio, de tal manera que todos los nodos de todas las caras están situados en las mismas posiciones x, y , variando únicamente la coordenada z . De este modo, tratan la información 3D como si se tratase de una imagen donde la intensidad corresponde con la profundidad, la posición de los píxeles está fijada, y son equidistantes. La normalización se realiza mediante un método de localización de la nariz basado en curvaturas, y la corrección del modelo facial mediante la comparación con el mallado medio. En el proceso de clasificación, únicamente se tienen en cuenta las partes rígidas de la cara, que serán las menos afectadas por cambios de expresión. Las características 2D y 3D son extraídas mediante un análisis PCA, y el clasificador utilizado es un KNN, distancia euclídea a K vecinos más cercanos. La base de datos utilizada ha sido adquirida con un escáner láser, y consta de 30 personas, con diez imágenes por persona. Se tienen en cuenta cinco posiciones distintas (frente, izquierda, derecha, arriba y abajo), y cinco gestos (sonrisa, risa, tristeza, sorpresa y ojos

cerrados). Concluyen que el porcentaje correcto de clasificación siempre es superior en el caso de los datos 3D.

2.5.- Fusión de datos biométricos.

Existen muchas y muy diversas características biométricas que pueden contribuir a la identificación de un individuo. Cada una de ellas proporciona un tipo de información diferente y debe ser adquirida de manera distinta. Los sistemas biométricos que usan un único tipo de información tienen una serie de limitaciones:

- Ruido en la adquisición: debido a sensores defectuosos o malas condiciones de adquisición.
- Variabilidad intra-usuario: por una interacción incorrecta del usuario con el sensor, o las propias variaciones de distintos sensores o de las características del individuo.
- El poder discriminante de cada dato biométrico es limitado.
- No universalidad: existen individuos para los que físicamente es imposible adquirir algún tipo de dato biométrico.
- Ataques al sistema: uso de rasgos artificiales por parte de impostores.

Estas limitaciones, y el hecho de poder adquirir distintos datos biométricos de un mismo individuo, hacen que aparezca de manera inmediata la idea de unir estos distintos tipos de información, para aprovechar las ventajas de cada uno de ellos.

Debido a la gran variedad de técnicas biométricas y a las particularidades de cada una de ellas, las aproximaciones a la fusión de datos pueden ser muy diferentes. De manera general, pueden ser clasificadas en dos tipos: aquellas donde la fusión hace referencia al tipo de datos biométricos con los que se trabaja (tipos de datos, condiciones de adquisición, sensores utilizados, etc.), y aquellas donde la fusión se realiza basándose en la propia estructura del sistema biométrico, que fue mostrada en la Figura 2.3 (página 13). [Ros03] [Jai04] [Tis05].

En la Figura 2.29 se muestra un esquema de los distintos tipos de sistemas biométricos, en función de los datos utilizados:

1. Múltiples ejemplos: se utilizaría el mismo rasgo biométrico capturado con el mismo sensor, pero en distintas condiciones de adquisición. Por ejemplo, el caso de sistemas de

reconocimiento facial que capturan imágenes del mismo individuo en diferentes posiciones.

2. Distintos sensores: el rasgo es el mismo, pero es adquirido con distintos sensores. Por ejemplo, el caso de la huella dactilar adquirida por un sensor óptico, capacitivo, de presión, etc.
3. Diferentes representaciones físicas del mismo rasgo biométrico: son los llamados sistemas multimodales, ya que se utilizan representaciones diferentes, con distinta información física, de un mismo rasgo biométrico. Por ejemplo, el caso del reconocimiento facial mediante información de intensidad (2D) e información geométrica (3D). O la representación de la huella dactilar por minucias o por textura.
4. Múltiples unidades biométricas: es el caso de características biométricas humanas que no son únicas para un mismo individuo. Sería el caso de los ojos, que podrían proporcionar dos patrones de iris, o las orejas.
5. Múltiples fuentes biométricas: son los llamados sistemas multibiométricos. Fusionan datos de diferentes rasgos biométricos de un mismo individuo. Por ejemplo, la fusión de la información de cara y huella, o iris y cara.

En función de en qué punto del sistema biométrico se realice la fusión de la información, podremos clasificar los métodos de fusión en (Figura 2.30):

- Fusión realizada en el módulo del sensor: en este caso a partir de datos adquiridos en distintas condiciones (caso 1 Figura 2.29) o con distintos sensores (caso 2 de la misma figura) se genera una información biométrica completa que es introducida en el sistema. Por ejemplo, un sistema en el que a partir de distintas imágenes en diferentes posiciones faciales, se generase un modelo 3D, con el que se realizaría el reconocimiento.
- Fusión en las características: los datos son adquiridos y normalizados, y se extraen las características de cada una de ellos. En ese momento se realiza la fusión de las distintas características extraídas. Los tipos de datos que pueden integrarse en este tipo de fusión son los casos 1, 2, 4 y 5 vistos en la Figura 2.29. Por ejemplo, en la Figura 2.30 se muestra un ejemplo de un sistema de clasificación por iris. Se realiza la captura de la imagen de cada ojo y se extrae el patrón de iris de cada uno de ellos en el módulo de extracción de características (FE), realizándose la fusión en ese punto (FM).

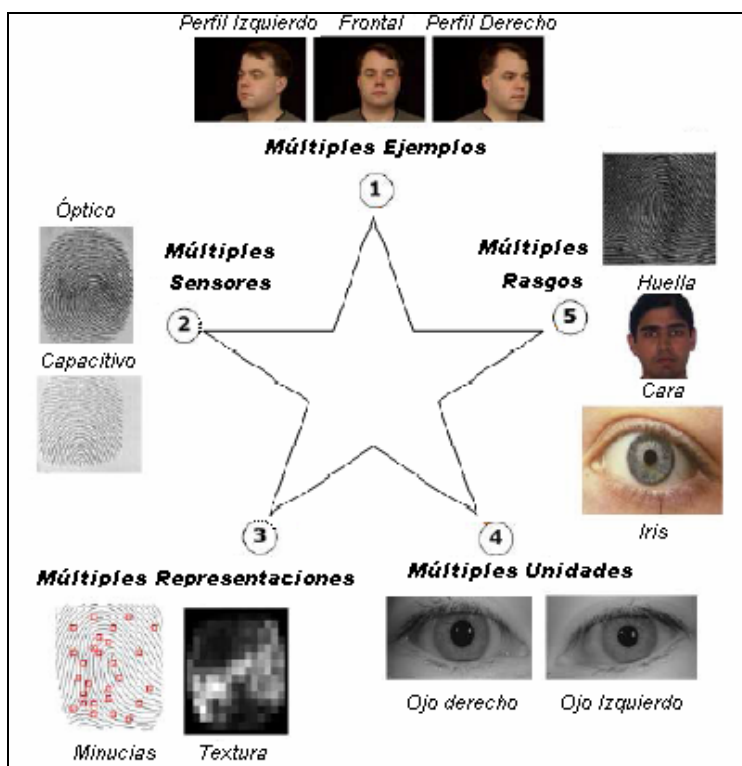


Figura 2.29. Clasificación de sistemas biométricos en función del tipo de datos. [Jai04]

- Fusión en la salida del clasificador o similitud (puntuación, *score*): en este caso, los datos biométricos son analizados de manera independiente hasta llegar al punto en que se mide la similitud de los individuos, mediante un clasificador. La fusión se realizaría en ese momento, generando un valor de similitud fusionado, que sería introducido en el módulo de decisión. En la Figura 2.30 puede verse un ejemplo de la estructura de un sistema multibiométrico que trata con información facial, de iris y de huella. El clasificador de cada uno de estos subsistemas (MM) genera un valor de la similitud, que en ejemplo correspondería respectivamente con 0.4, 58 y 275. Este valor sería fusionado mediante una regla matemática e introducido en el módulo de decisión (DM). Este esquema podría aplicarse a cualquiera de los sistemas vistos en la Figura 2.29.
- Fusión realizada en el módulo de decisión: el proceso de reconocimiento es realizado de manera independiente para cada uno de los tipos de datos biométricos. Una vez generada una salida de aceptación o rechazo para cada uno de ellos, se realiza la fusión de todas ellas generando una salida fusionada. La regla de fusión habitual en estos casos es la votación. Este método de fusión puede ser aplicado a todos los tipos de sistemas de la figura 2.26. En la figura 2.27 podemos ver un ejemplo de este tipo de fusión, donde se utilizan dos representaciones diferentes de la huella dactilar (minucias y textura).

Cada una de ellas es aceptada (*yes*) o rechazada (*no*), realizándose la fusión en el módulo FM.

En esta tesis se va a presentar en el Capítulo 6 el sistema verificador fusionado diseñado. En éste sistema se realiza una fusión de tipo salida de los clasificadores o scores, por lo que a continuación se van a presentar algunas de los métodos utilizados en este tipo de sistemas.

Un aspecto muy importante a la hora de fusionar las salidas de los distintos clasificadores utilizados, es la normalización de los datos para que puedan ser comparados y fusionados. Normalmente, los datos son extraídos de fuentes muy diferentes, con características distintas, por lo que no pueden ser fusionados directamente. A continuación se van a enumerar algunos de los métodos de normalización presentes en la bibliografía actual [Sne05]. Denotaremos como s los valores de salida de los distintos clasificadores sin ser manipulados, obtenidos durante los emparejamientos o verificaciones, siendo el conjunto completo de valores S , y como n los valores ya normalizados:

- Mínimo-máximo (MM): los datos son normalizados en un rango de $[0,1]$, en función del valor máximo y mínimo del conjunto de salidas obtenidas de los clasificadores. La expresión de normalización aplicada es la siguiente:

$$n = \frac{s - \min(S)}{\max(S) - \min(S)} \quad [\text{Eq. 2. 3}]$$

- Z-score (ZS) o estandarización: normaliza los datos a una distribución de media 0 y desviación estándar 1:

$$n = \frac{s - \text{media}(S)}{\sigma(S)} \quad [\text{Eq. 2. 4}]$$

- Tanh (TH): normaliza los datos entre 0 y 1 mediante la siguiente expresión:

$$n = \frac{1}{2} \left[\tanh \left(0.01 \frac{(s - \text{media}(S))}{\sigma(S)} \right) + 1 \right]$$

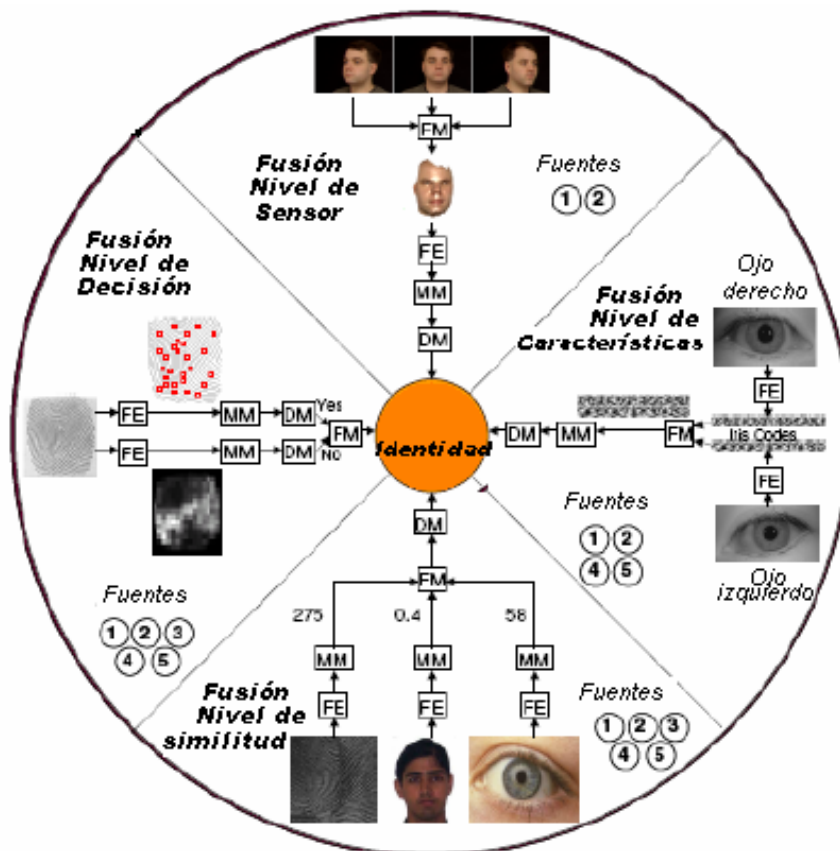


Figura 2.30. Clasificación de sistemas biométricos en función del tipo de fusión. FM: módulo de fusión; FE: módulo de extracción de características; MM: módulo de emparejamiento o clasificador; DM: módulo de decisión [Jai04]

Una vez los datos son normalizados, se puede proceder a la fusión de los mismos. Existen distintas funciones o reglas de fusión en el estado de la técnica actual. A continuación presentamos algunos de los más utilizados [Sne05]. Si representamos como n_i^m las salidas de los clasificadores normalizadas para los emparejamientos m ($m=1,2,\dots,M$, donde M es el número de emparejamientos realizados), realizadas con la persona i ($i=1,2,\dots,I$, donde I es el número de individuos de la base de datos). El resultado de fusionar las salidas de los clasificadores para el individuo i es denominada como f_i .

- Suma simple: $f_i = \sum_{m=1}^M n_i^m, \forall i$
- Valor -mínimo: $f_i = \min(n_i^1, n_i^2, \dots, n_i^M), \forall i$
- Valor -máximo: $f_i = \max(n_i^1, n_i^2, \dots, n_i^M), \forall i$

- Suma ponderada: $f_i = \sum_{m=1s}^M w_i^m n_i^m, \forall i$. Los pesos w_i^m pueden ser fijados mediante distintas estrategias: de manera heurística, en función del Equal Error Rate de cada clasificador individual, por usuario, etc.

Una vez expuestos los distintos tipos de fusión, y la clasificación de los sistemas biométricos en función del módulo en el que se realiza la fusión, vamos a presentar una serie de métodos presentes en la bibliografía actual, en los que se realiza una fusión de datos faciales 2D y 3D. Ya se han presentado algunos trabajos en los que se utilizaba tanto la información de textura como de profundidad en el apartado anterior, como por ejemplo [Bro03] [Won04] [Lee90], pero en este apartado vamos a señalar trabajos que inciden especialmente en la fusión realizada.

Chang et al. en [Cha03] compararon el resultado de aplicar el método autocaras [Tur91], y usando como medida de similitud la distancia de Mahalanobis, las imágenes de rango e imágenes de textura. Los resultados indicaron que se obtenían resultados semejantes, excepto en el caso de que se combinaran ambos tipos de información, donde el porcentaje de reconocimiento correcto aumentaba. Tras aplicar ambos métodos y su combinación (usando una suma ponderada en función de la distancia a los tres vecinos más cercanos) a una base de datos de 166 personas se obtuvo una tasa de reconocimiento del 92.8%.

Chang et al. en [Cha05] realizan un estudio en el que se estudia el poder de clasificación de las imágenes de intensidad, las de rango, y la fusión de ambas (fusión de puntuaciones de los clasificadores o scores). Pretenden analizar cuánto del porcentaje de mejora de un sistema fusionado se debe a la combinación de los datos 2D y 3D, y cuánto al hecho de estar utilizando más imágenes por individuo. Para ello realizaron una serie de experimentos sobre la base de datos UND [Fly03], con 275 personas diferentes. Consideran tres iluminaciones diferentes y dos expresiones faciales: neutra y sonrisa. La normalización tanto en 2D como 3D se realiza mediante la localización manual de puntos característicos. El sistema verificador utilizado está basado en PCA y utiliza como medida de similitud la distancia coseno de Mahalanobis. La fusión se realiza entre las distintas distancias medidas, mediante una suma ponderada. El peso de cada uno de los factores es fijado en función de las distancias a los cuatro primeros vecinos. Realizan distintos experimentos considerando sólo imágenes 2D, sólo imágenes de rango y ambas fusionadas, para un ejemplo o varios ejemplos. Concluyen que el porcentaje de verificación correcta es ligeramente superior en el caso de utilizar información multimodal, que en el caso de utilizar más ejemplos de imágenes unimodales. Presentan unos resultados de EER multimodal de 0.019, y un EER de múltiples imágenes de rango de 0.045.

En [Ben05], se realiza una comparación de la calidad de verificación de dos sistemas diferentes sobre los datos 2D, 3D y la combinación de ambos. Los sistemas utilizados son el sistema comercial FaceIt, basado en *Local Features Analysis* (LFA), y el método global de *Fisherfaces*, basado en PCA. La base de datos utilizada consta de 185 personas, con dos capturas por persona. La normalización de las caras se realiza a partir de la localización manual de siete puntos fiduciales. El punto en el que se realiza la fusión es diferente para cada uno de los sistemas: en el caso de FisherFaces, utilizan una fusión en el módulo del sensor, introduciendo en el sistema una yuxtaposición de las imágenes; en el sistema FaceIt, la fusión se realiza en los scores o puntuaciones de los clasificadores, mediante una suma ponderada. Como resultados presentan los EER obtenidos para cada sistema y cada tipo de datos: FaceIt 3D 0.027, FaceIt 2D 0.15, FaceIt fusión 0, Fisherfaces 3D 1.82, Fisherfaces 2D 1.55 y Fisherfaces combinado 0.96.

Capítulo 3

Creación de la Base de Datos FRAV3D.

En este capítulo vamos a presentar el proceso de creación completo de la Base de Datos utilizada en esta tesis, la FRAV3D. La creación de una base de datos destinada a reconocimiento facial es una tarea compleja, ya que la gran cantidad de factores que influyen en las condiciones de adquisición de los datos requiere de una estricta aplicación de un protocolo para conseguir que todas las imágenes de los individuos sean comparables. Prueba de esta complejidad es la gran variedad de bases de datos faciales bidimensionales existentes, y la no existencia de una homogeneidad entre ellas. Realmente los factores de adquisición pueden ser tan diferentes en cuanto a número de individuos, de imágenes por individuos, de sesiones de adquisición de datos, de protocolos de adquisición, etc. que actualmente no existe un estándar que indique cómo crear una base de datos óptima.

En el caso de las bases de datos tridimensionales, como se ha visto en el capítulo anterior, existen muy pocas disponibles actualmente. La gran mayoría de ellas representan la información tridimensional como mapas de profundidad, y no como mallados, con la consiguiente limitación en la información disponible. Un ejemplo de esta limitación son los métodos de normalización facial automática presentados en esta tesis, donde es necesario disponer de la disposición espacial de los puntos, no simplemente su proyección sobre la imagen de rango. Otra limitación de las bases de datos disponibles es la cantidad de imágenes por individuo. Habitualmente, se opta por crear bases de datos con muchos individuos, pero el número de imágenes de cada individuo es bajo. Por estas razones, se decidió adquirir una base de datos multimodal propia que cubriera todas estas necesidades. El grupo de investigación FRAV (*“Facial Recognition and Artificial Vision Group”*) de la Universidad Rey Juan Carlos, en cuyo seno ha sido

desarrollada esta tesis, posee una amplia experiencia en la elaboración de bases de datos faciales. En este apartado vamos a presentar todo el proceso que ha llevado a la creación finalmente de la base de datos multimodal FRAV3D.

3.1.- Adquisición de la Base de Datos FRAV3D.

La FRAV3D es una base de datos multimodal, ya que tiene información bidimensional o de textura, e información tridimensional. Fue adquirida mediante un escáner láser de Minolta [MIN], modelo VIVID-700, con el software *Polygon Editing Tool v 1.11 (PET)*. Este software permite manipular el mallado de puntos 3D, así como realizar operaciones sobre él (rellenado de huecos, suavizados de datos, fusión de datos, etc.). Como uno de los objetivos de esta base de datos es que fueran datos reales, se optó por no manipular los datos durante la fase de adquisición, dejando esta tarea para una posible etapa de preprocesado. Este escáner proporciona también información de textura registrada con información 3D. Sus características técnicas se enumeran a continuación:

Tipo: Laser Light-stripe triangulation rangefinder
Zoom: 9mm - 46mm, 8 tipos de zoom distintos (BBDD adquirida con zoom nº 6)
Distancia del objetivo: 0.6m - 2.5m
Área Escaneada (x, y): 70mm x 70mm a 1100mm x 1100mm
Rango de Profundidad: Iguales a cada lado en el caso de que el objeto este a 1.5 m
X, Y Resolución (sobre la distancia): 0.35mm (0.6m) a 5.50mm (2.5m)
Z Resolución (sobre la distancia): 0.11mm (0.6m) a 7.23mm (2.5m)
Resolución de la Cámara Digital: 400 x 400 píxeles
Tiempo de Escaneo: 0.6 segundos
Tiempo de Transferencia a la computadora: 2 segundos
Tamaño de Archivo: 1.1 megas (*.cam)
Interfaz: SCSI
Potencia del láser: Clase II
Peso: 9 KG
Dimensiones: 210mm x 367mm x 326mm

La información 3D es proporcionada en dos formatos: un mallado triangular en formato VRML, que llamaremos imagen 3D, y una imagen de rango o mapa de profundidad, que llamaremos imagen 2.5D. Como se ha descrito en el Capítulo 2 de la presente tesis, un mapa de profundidad es una imagen en escala de grises, donde el nivel de intensidad de cada píxel corresponde con la profundidad tridimensional de ese punto. Como se trata de una representación bidimensional de información tridimensional se denomina a menudo imagen 2.5D. En la Figura 3. 1 puede verse un ejemplo de estos dos formatos de representación de la misma información 3D.

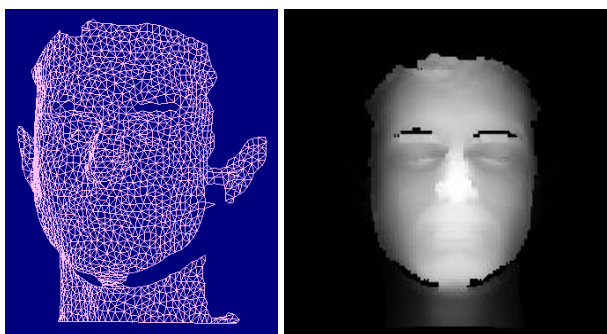


Figura 3. 1. Mallado 3D y mapa de profundidad del mismo sujeto.

Las imágenes fueron adquiridas en condiciones controladas, con dos iluminaciones diferentes: controlada y no controlada. La iluminación controlada consiste en dos focos halógenos de luz difusa, que mantienen las condiciones de iluminación invariables en el tiempo. La cara del individuo se sitúa entre ambos haces de luz, de este modo se disminuye la aparición de sombras. En el caso de la iluminación no controlada, además de los dos focos halógenos de luz difusa se incluye una iluminación cenital de una lámpara fluorescente. Este tipo de luz es muy variable, de ahí que se considere en este caso iluminación no controlada. En la Figura 3. 2 puede verse el escáner láser, su orientación respecto al individuo y colocación en el laboratorio, así como los dos focos de luz halógena con los dos paraguas que difuminan la iluminación. El sujeto se sienta en un taburete, regulable en altura, frente al escáner y los focos, de espaldas a una pared con un fondo azul oscuro. Este fondo fue elegido para simplificar las tareas de segmentación de la cara en la imagen completa. La posición del individuo fue fijada, así como la distancia al escáner láser, de 2 metros. En la Figura 3. 3 puede verse un esquema de la colocación del escáner en el laboratorio y los ejes del escáner. Como puede observarse, la captura del individuo se produce en la zona negativa del eje z , por lo que la coordenada de profundidad de todos los puntos adquiridos será negativa.

La base de datos consta de imágenes de 105 individuos (81 mujeres y 24 hombres), todos ellos de raza caucásica. La mayoría de ellos pertenecen al ámbito de la Universidad (estudiantes y profesores), todos ellos adultos. El período de adquisición duró 10 meses, desde septiembre del 2004 hasta junio del 2005, y cada individuo ha participado en una sesión completa de adquisición. De este modo todos los individuos tienen el mismo número de imágenes, adquiridas en idénticas condiciones. Todas las imágenes fueron adquiridas teniendo el sujeto los ojos cerrados, para garantizar una absoluta seguridad frente al láser (aunque se trate de un láser clase 2 que no resulta dañino). No se permitió el uso de sombreros, gafas ni otros accesorios que alteraran el aspecto facial.



Figura 3. 2. Escáner láser utilizado en la adquisición de la FRAV3D e iluminación utilizada.

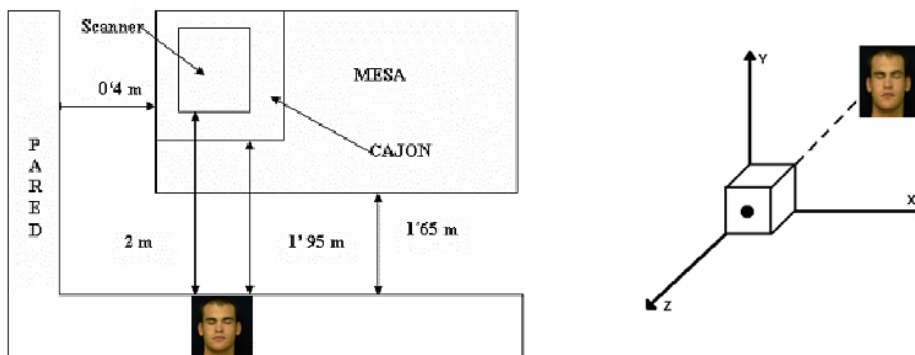


Figura 3. 3. A la izquierda, esquema colocación del escáner en el laboratorio. A la derecha, esquema de los ejes del escáner.

Se adquirieron 16 capturas por individuo (cada una de ellas proporcionando la correspondiente información de textura y tridimensional). Se estableció un protocolo de adquisición de imágenes para que se estandarizara lo más posible la adquisición de todos los datos. Este protocolo incluye nomenclatura de las imágenes, orden de adquisición, configuración del escáner, condiciones de adquisición, etc. Mediante este protocolo se aseguró que sólo se variara una única condición entre cada una de las imágenes, permitiendo de este modo analizar la influencia de cada uno de los factores (posición, iluminación y gesto) por separado. Éste era uno de los principales objetivos a conseguir con la creación de la FRAV3D. Después de diferentes pruebas, el orden de adquisición de imágenes decidido fue el que se muestra en la tabla 3.2, y en las condiciones de adquisición indicadas. Se tomaron 4 imágenes frontales, ocho giros en diferente sentido y grado, dos gestos y dos iluminaciones diferentes. Para conseguir que los giros faciales fueran aproximadamente iguales para todos los individuos, se situaron marcas en el laboratorio, indicando al sujeto a qué marca tenía que mirar en cada caso. Las direcciones de los ejes X, Y y Z a las que se hace referencia corresponden con los ejes

del escáner, que son mostrados en la Figura 3. 3. En la tabla 3.2 pueden verse todas las capturas de un mismo sujeto, en el orden de adquisición establecido en el protocolo.

La resolución de las imágenes proporcionadas por el escáner es de 400x400 píxeles en el caso de las imágenes de textura y de 200x200 píxeles en el de las imágenes de rango. En el caso del mallado 3D el escáner es capaz de proporcionar cuatro niveles de resolución diferentes, como se muestra en la tabla 3.1. Como se verá en sucesivos capítulos de esta tesis, cada uno de estos niveles de resolución se ha considerado apropiado para las diferentes tareas de normalización y verificación facial que se presentarán.

Tabla 3. 1. Niveles de resolución del mallado proporcionados por el escáner

Resolución del mallado	Tasa de reducción	Número de puntos
r1	1/1	18.535
r2	1/4	4.657
r3	1/9	2.060
r4	1/16	1.161

A pesar de que el tiempo de adquisición de cada captura del escáner es sólo de dos segundos, la sesión completa de adquisición de 16 imágenes diferentes, unido al tiempo de explicación de las diferentes instrucciones dadas al individuo requiere de un tiempo mayor. Aproximadamente cada sesión de adquisición dura unos 6 minutos por persona. Los participantes fueron voluntarios y obedecieron las instrucciones correctamente.

La base de datos FRAV3D está actualmente disponible para la comunidad científica (sólo para fines de investigación, no comerciales), bajo demanda a través de la página Web del grupo de investigación [FRAV]. Consideramos que ésta es una importante contribución, ya que puede permitir la comparación de diferentes algoritmos mediante una misma base de datos, estandarizando los resultados de diferentes sistemas de reconocimiento facial.

Tabla 3. 2A Ejemplo capturas de un individuo de la base de datos FRAV3D, en el orden de adquisición.






















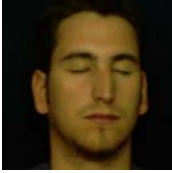







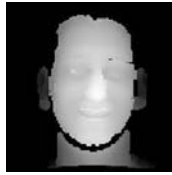



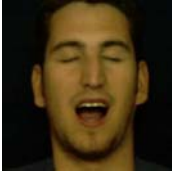





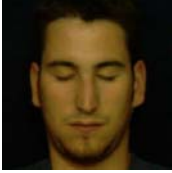


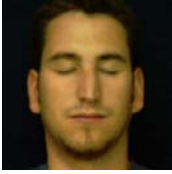


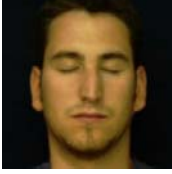


Orden de adquisición	Condición Adquisición	Ejemplo Imagen Textura	Ejemplo Modelo VRML	Ejemplo Mapa de Profundidad
1°	Frontal			
2°	Giro 25° dcha. eje Y			
3°	Frontal			
4°	Giro 5° izq. eje Y			
5°	Frontal			
6°	Giro 25° dcha. eje Y			
7°	Frontal			
8°	Giro 5° izq. eje Y			

Tabla 3. 2B Ejemplo capturas de un individuo de la base de datos FRAV3D, en el orden de adquisición.

Orden de adquisición	Condición Adquisición	Ejemplo Imagen Textura	Ejemplo Modelo VRML	Ejemplo Mapa de Profundidad
9°	Giro severo dcha. eje Z			
10°	Sonrisa			
11°	Giro leve izq. eje Z			
12°	Boca abierta			
13°	Giro arriba eje X			
14°	Giro abajo eje X			
15°	Frontal iluminación cenital			
16°	Frontal iluminación cenital			

3.2.- Problemas en la Adquisición.

Durante la adquisición de las imágenes, se observaron principalmente dos problemas: agujeros en zonas donde la señal del láser no era recibida, y picos de ruido en la superficie escaneada.

Por un lado, la pérdida de la señal del láser se produce en las áreas con pelo (cejas, pestañas, bigote, etc.), en áreas con un color azul o un tono oscuro (debido a la longitud de onda de la señal del láser, color rojo, puede anularse con su complementario azul) o en zonas donde existe una oclusión debido a la posición de la cara. El primer y el tercer caso son los que han afectado principalmente a la adquisición de caras. En la Figura 3. 4 pueden observarse estos tres casos.

La otra fuente de error observada son los picos que aparecen en zonas con bordes horizontales. En el caso de la cara, este hecho se produce especialmente en la zona bajo la nariz. Este pico de ruido puede introducir importantes errores a la hora de localizar o normalizar la cara, ya que en numerosas ocasiones el pico de error es mayor que la propia nariz del individuo. En la Figura 3. 5 puede observarse esta situación.



Figura 3. 4. Errores en la adquisición de datos 3D por pérdida de puntos. De izquierda a derecha: cejas, bigote y oclusión por giro de la cara.



Figura 3. 5. Ruido en la adquisición de datos. Ejemplos de pico de ruido bajo la nariz.

Aparte de estos problemas intrínsecos a la propia adquisición de los datos tridimensionales, se observó que las imágenes de rango creadas por el software del escáner no

eran de la calidad deseada. Como puede verse en la Tabla 3.2 se trataba de imágenes con niveles de contraste muy extremos, con poco rango en los niveles de gris. Esto es debido a que el escáner asigna automáticamente el valor 0 de intensidad al punto más lejano al escáner, y el 255 al punto más cercano, realizando una correspondencia lineal para valores intermedios. La consecuencia principal es que utiliza un rango de valores reducido para los puntos de la cara. Si pensamos en la estructura facial, es obvio que los rasgos de la cara se encuentran en un rango de valores de profundidad muy pequeño, desde la punta de la nariz hasta aproximadamente las orejas. El resto de puntos 3D correspondientes al pelo y hombros, no son interesantes en este contexto. El que la función de correspondencia entre profundidad y nivel de gris sea lineal provoca una pérdida de información, ya que no se está ajustando el rango de grises al rango de profundidad que más nos interesa (donde se encuentran los rasgos faciales), sino que se distribuye por igual entre todos los datos capturados por el escáner.

Todos estos hechos fueron la motivación para que posteriormente se realizase un cálculo del mapa de profundidad óptimo a partir de los datos 3D, en el que por un lado se rellenan los huecos propios de la falta de datos adquiridos por el escáner, y por otro lado se realizó un estudio del tipo de ecualización más adecuado a aplicar al mapa de profundidad de cara a la tarea de reconocimiento facial. Este estudio es presentado en el siguiente capítulo de esta tesis.

Capítulo 4

Normalización Facial Automática.

4.1.- Introducción.

En este capítulo vamos a presentar en primer lugar la necesidad de la realización de una normalización en posición en el problema del reconocimiento facial 3D. A continuación, mostraremos los sistemas originales de normalización automática que se han implementado en esta tesis: dos métodos basados en localización de puntos característicos y un método global. Se mostrarán y se compararán los resultados de los tres métodos al ser aplicados a la base de datos FRAV3D. Finalmente se explicará la creación del mapa de profundidad óptimo, calculado a partir de los datos faciales ya normalizados.

Los sistemas de verificación facial bidimensionales tienen como principales limitaciones las condiciones de iluminación y la posición del sujeto. No podemos olvidar que una cara es un objeto tridimensional, que al ser proyectado en una imagen siempre pierde información estructural de la cara. Aunque los sistemas de reconocimiento facial 3D son relativamente independientes de la iluminación, la variación de la posición de la cara sigue siendo un importante factor sobre el resultado final. La gran cantidad de información geométrica hace posible la estimación de la posición de la cara y su posterior normalización, pero las diferencias entre los individuos, los cambios de expresión facial, las oclusiones o áreas con datos no adquiridos, etc. contribuyen a aumentar la complejidad de esta tarea. Estos factores hacen necesario que todo sistema de reconocimiento facial 3D incluya en primer lugar una etapa

de normalización de la posición facial. Esta tarea ha sido a menudo realizada manualmente, pero el incremento del tamaño de las bases de datos, y la necesidad de un alto grado de precisión, han provocado que actualmente exista un gran interés en este área.

Como se ha dicho anteriormente, durante el transcurso de esta tesis, hemos diseñado tres métodos de normalización facial diferentes: dos métodos locales y un método global. Los métodos locales se basan en la localización de los rasgos o puntos característicos en la cara (habitualmente nariz, ojos o boca), y en una posterior normalización a partir de la relación entre estos tres puntos. A partir de tres puntos podemos normalizar la cara en posición y tamaño. Los métodos globales se basan en la estimación de la posición de la cara a partir de todos los puntos pertenecientes a la misma, sin realizar ninguna localización de rasgos.

El primero de los métodos locales, basado en curvaturas, fue diseñado para localizar en el mapa de profundidad las áreas donde se localizan los rasgos faciales: ojos y nariz. En la Figura 4.1 puede verse el resultado de esta localización. Este método tiene la limitación de que la normalización es realizada sobre el mapa de profundidad, que ya es una proyección de los datos 3D sobre una imagen 2D. De este modo, en esta representación no se cuenta con toda la información geométrica posible, así que la posible normalización se ve limitada a imágenes en posición frontal, con posibles giros laterales.

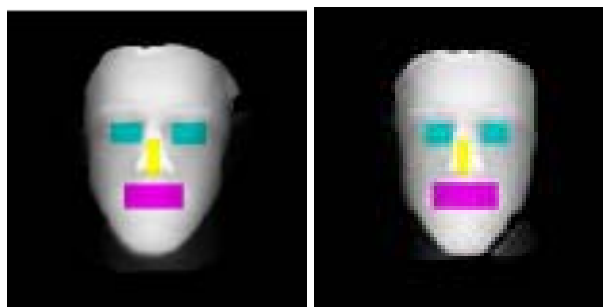


Figura 4.1. Localización de rasgos faciales en el mapa de profundidad mediante curvaturas.

El otro método local desarrollado tiene la gran ventaja de que los puntos característicos se localizan a partir del mallado 3D, permitiendo realizar una normalización previa a la creación del mapa de profundidad. El método presentado se basa en la técnica de registro global Spin Images, presentada por Johnson y Herbert [Joh97] [Joh98]. Mediante esta técnica serán localizados tres puntos característicos en la cara: la punta de la nariz y los lagrimales de los dos ojos. En la Figura 4.2 pueden verse los puntos localizados en el modelo facial 3D y la normalización realizada, situando la cara en posición frontal.



Figura 4.2. Localización de puntos característicos mediante Spin Images. Se señalan en rojo los tres puntos localizados: lagrimales de los ojos y punta de la nariz.

Finalmente, se implementó un método de normalización global, basado en el cálculo de planos de regresión y un conocimiento a priori de la estructura facial. Este método también se aplica directamente a los datos 3D, permitiendo una normalización previa al cálculo del mapa de profundidad. Este método se ha utilizado de manera complementaria con el de las Spin Images.

Para la creación de un mapa de profundidad óptimo y normalizado, se han utilizado los dos últimos métodos enumerados. En primer lugar se aplicó el método de las Spin Images, que ha demostrado ser el más potente de los tres. Para reforzar los resultados y corregir los posibles errores, en un segundo paso se aplicó el método de normalización global, basado en regresiones. Una vez normalizado el mallado 3D, se procedió a crear el mapa de profundidad óptimo. Como ya vimos en el capítulo anterior, existen distintos problemas que afectan a la adquisición de los datos 3D por parte del escáner, dando lugar a áreas con puntos perdidos. Para corregir estos fallos, se aplicaron técnicas de interpolación permitiendo el rellenado de estos huecos. Tras estos pasos, como resultado obtenemos un mapa de profundidad perfectamente normalizado, sin picos de ruido (eliminados en la etapa de normalización) y sin agujeros.

4.2.- Normalización mediante curvaturas.

El primer método de normalización facial automática se diseñó para ser aplicado a mapas de profundidad. Se deseaba comprobar la capacidad de discriminación de los rasgos faciales mediante la medida de la curvatura media de la superficie facial. Para ello se procedió a aproximar (localmente) el mapa de profundidad con una superficie analítica, y posteriormente se realizó el cálculo de curvaturas en la superficie. Un posterior análisis del valor de estas curvaturas permitiría discernir la posición de los rasgos faciales.

Un primer análisis de los datos faciales permitió descubrir que la superficie representada en el mapa de profundidad era en realidad muy irregular. Este hecho es inobservable en el mapa de profundidad como imagen, pero no es así si tratamos los datos como puntos extraídos de una superficie. Por lo tanto, se decidió realizar en primer lugar un suavizado de la superficie, de tal manera que el valor final de un píxel tras ser suavizado es igual a la media de los píxeles vecinos. En la Figura 4.3 puede verse la representación del mapa de profundidad como si de una superficie se tratase: a la izquierda los datos adquiridos, a la derecha, la superficie suavizada.

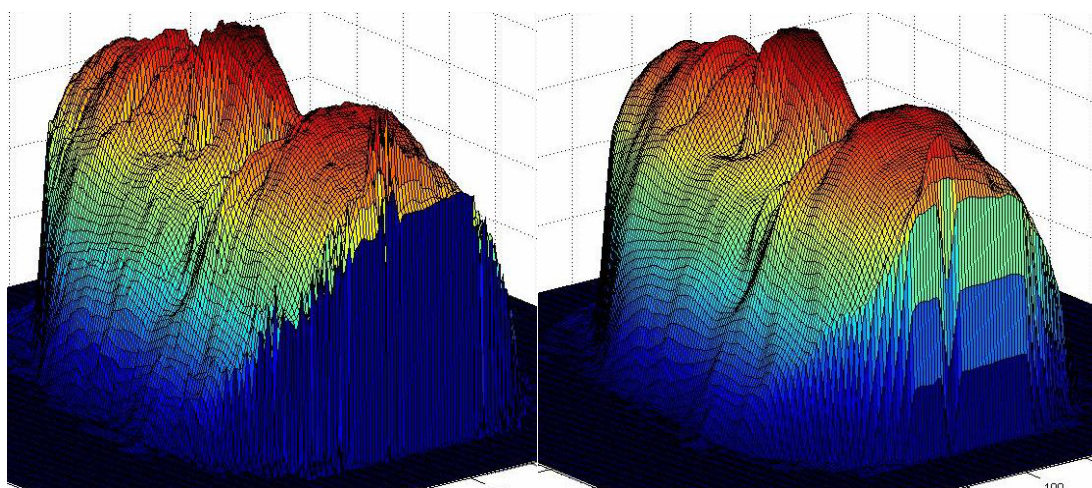


Figura 4.3. Suavizado de los datos correspondientes al mapa de profundidad. A la izquierda, los datos originales, a la derecha, la superficie suavizada.

Una vez realizado el suavizado de los datos, se procedió a aproximar los datos faciales a una superficie analítica. El método usado para aproximar el mapa de profundidad a una superficie es el ajuste de los datos de manera local a un paraboloides (descrito en el Capítulo 2, Apartado 2.3, de la presente tesis). El paraboloides es de la siguiente forma:

$$z = ax^2 + cxy + by^2 + dx + ey + f$$

donde $A = [a, b, c, d, e, f]$ son los parámetros del paraboloides y $[x, y, z]$ son las coordenadas del punto perteneciente al mapa de profundidad.

Realizando este cálculo del paraboloides de ajuste, en cada uno de los datos proporcionados por el mapa de profundidad, obtenemos la superficie aproximada. De este modo calculamos una expresión matemática que describe la superficie adquirida, en un entorno local a cada punto. A partir de esta expresión se realizará el cálculo de las curvaturas. En la Figura 4.4 podemos ver a la izquierda, los datos faciales originales, y a la derecha, la representación de la superficie analítica calculada. Se comprueba que ambas superficies son prácticamente iguales.

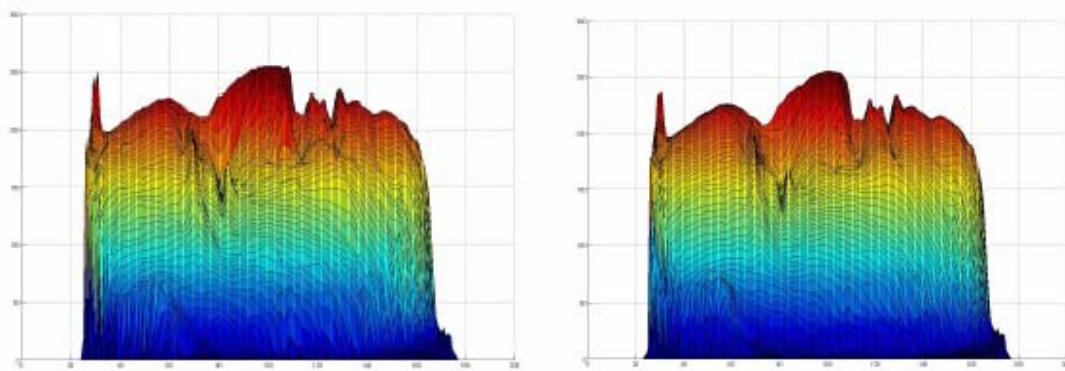


Figura 4.4. A la izquierda, representación de los puntos del mapa de profundidad. A la derecha, representación de la superficie analítica ajustada a los datos faciales.

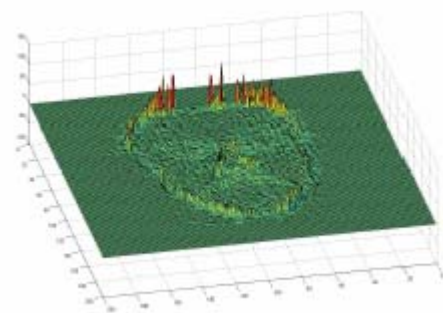


Figura 4.5. Medida del error en la aproximación mediante paraboloides a los datos faciales del mapa de profundidad.

En la Figura 4.5 se representa la diferencia entre los datos originales medidos en el mapa de profundidad, y el valor de la superficie analítica aproximada. Como puede verse, el error es prácticamente nulo (menor a 2 niveles de gris), excepto en los bordes, debido a la discontinuidad de los datos en esos puntos. Este error no afectará a la localización de los rasgos, ya que éstos no se encuentran en los contornos de la cara.

A partir de esta superficie ajustada a los datos, podemos calcular de manera analítica la curvatura media en cada punto dado por el mapa de profundidad. Para ello aplicamos la ecuación 2.3 del Capítulo 2 sobre el paraboloide local de ajuste, obteniendo finalmente el valor de la curvatura media a partir de los parámetros del paraboloide:

$$H = \frac{(1 + (2ax + by + d)^2)2a - 2(1 + (2ax + by + d))(bx + 2cy + e)b + (1 + (2ax + by + d)^2)2c}{2[(1 + (2ax + by + d)^2) + (bx + 2cy + e)^2]^{3/2}}$$

Si representamos el valor de la curvatura media correspondiente a cada píxel del mapa de profundidad obtenemos una imagen donde el nivel de gris depende del valor de la curvatura media. En la Figura 4.6 se representa un ejemplo de esta representación. Como puede verse, las zonas más claras corresponden con las zonas convexas de la cara (nariz, globos oculares, frente, pómulos y los labios), las zonas oscuras corresponden con las áreas más cóncavas (cuencas de los ojos, aletas de la nariz, comisuras de los labios). Por lo tanto, podemos intuir que mediante el valor de la curvatura media se pueden extraer los rasgos faciales.



Figura 4.6. Imagen que representa el valor de la curvatura media en cada píxel.

Una vez realizado el cálculo de la curvatura media, se procedió a localizar los ojos, la nariz y la boca. Para realizar la localización de los ojos existían dos aproximaciones diferentes: o bien buscar el globo ocular (zona convexa) o bien buscar la cuenca de los lagrimales (zona cóncava). Tras realizar distintas pruebas se decidió realizar la búsqueda de los ojos a partir de los lagrimales, ya que existen menos zonas cóncavas que convexas en la cara.

En primer lugar se realizó una búsqueda de los puntos de la cara con valores de la curvatura media negativos. Una vez seleccionadas las zonas candidatas, se procedió a aislar los puntos con valores mínimos. En la Figura 4.7 puede verse el proceso completo de localización del ojo izquierdo. La localización del ojo derecho se realizó mediante el mismo proceso.

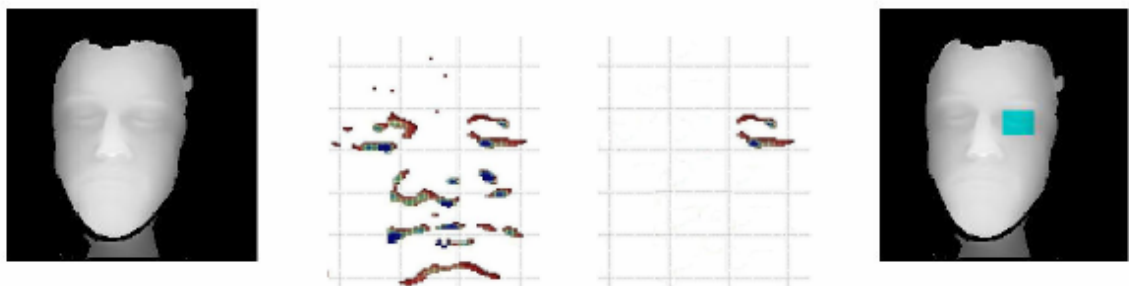


Figura 4.7. Búsqueda del ojo izquierdo a partir de la curvatura media. De izquierda a derecha: imagen de profundidad original, áreas con un valor de la curvatura media negativa, segmentación de los valores mínimos, y resultado de la localización sobre la imagen original.

Para realizar la localización de la nariz, se tuvo en cuenta el conocimiento a priori de la estructura facial, buscando la nariz sólo por debajo de los ojos. Claramente, la nariz en la zona más convexa de la cara, por lo que se procedió a buscar entre los valores máximos de la

curvatura media. Tras las primeras pruebas, surgieron algunos problemas en personas que tienen la nariz pequeña y los pómulos más salientes, con lo que no era suficiente utilizar el valor máximo de la curvatura. Se procedió a implementar un sistema en el que a partir de la localización de la nariz y pómulos, se seleccionaran únicamente los puntos de mayor curvatura entre los pómulos, es decir, la nariz. En la Figura 4.8 se muestra el proceso completo de localización de la nariz.

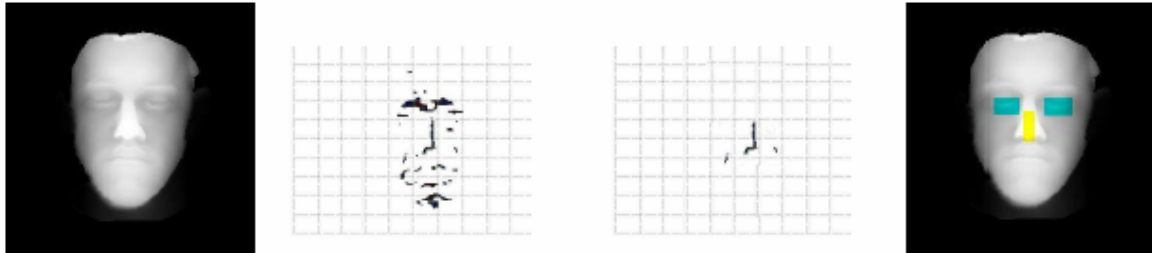


Figura 4.8. Búsqueda la nariz a partir de la curvatura media. De izquierda a derecha: imagen de profundidad original, áreas con un valor de la curvatura media positiva, segmentación de los valores máximos situados en una posición central, y resultado de la localización sobre la imagen original.

Finalmente se realiza la localización de la boca. El método utilizado es semejante al de localización de la nariz, aunque con algunas variaciones. En este caso, basándonos en el conocimiento a priori de la estructura facial general, únicamente se busca la boca en áreas por debajo de la nariz. La boca es una zona convexa, por lo que se realiza una búsqueda de los valores positivos de la curvatura media en este área. En concreto, basándonos en la forma de los labios, se realiza una búsqueda de filas horizontales de valores máximos de la curvatura, que corresponderán con el límite superior e inferior de los labios. Se decidió utilizar las zonas convexas (labios) y no las cóncavas (comisuras de los labios) para evitar errores en el caso de caras con la boca abierta. En la Figura 4.9 se representa el proceso de localización de la boca.

Una vez implementados los métodos de localización de rasgos descritos, se procedió a aplicarlos a la base de datos FRAV3D, que consta de 105 personas con 16 imágenes por persona. Esto hace un total de 1680 imágenes. La comprobación de la corrección de los resultados, únicamente se puede realizar de manera manual, supervisado por una persona, ya que sólo de este modo es posible ratificar que los rasgos han sido localizados en la posición correcta. Debido a la complejidad de esta tarea, se optó por realizar el análisis de resultados sobre un subconjunto de la base de datos de unas 53 personas, y extrapolar los resultados a la base de datos total. Por lo tanto, se han analizado de manera supervisada la localización facial de 861 imágenes. La tasa de error observada se ha representado en la tabla 4.1.

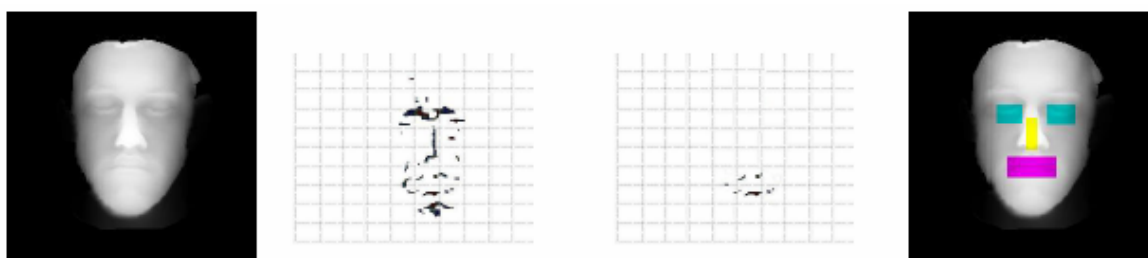


Figura 4.9. Búsqueda la boca de la curvatura media. De izquierda a derecha: imagen de profundidad original, áreas con un valor de la curvatura media positiva, segmentación de zonas horizontales con valores máximos de la curvatura media, situados por debajo de la nariz, y resultado de la localización sobre la imagen original.

En concreto, de las 861 imágenes seleccionadas, en 10 la localización de los ojos fue incorrecta, en 20 falló la localización de la nariz y en 38 falló en la localización de la boca. Los errores en la localización de la boca se deben principalmente a las imágenes gestuales (sonrisa y boca abierta). En cuanto al fallo en la localización de todos los rasgos, se dio en 7 imágenes. En 6 de estos 7 casos eran imágenes especialmente mal adquiridas, con grandes agujeros en la adquisición de datos, por lo que realmente el fallo de localización se dio en una única imagen. En la Figura 4.10 se representan diferentes ejemplos de rasgos localizados usando este método.

Tabla 4. 1. Tasa de error en la localización de rasgos faciales mediante cálculo de la curvatura media.

Rasgo Facial	Tasa de error
Ojos	1.16%
Nariz	2.32%
Boca	4.41%
Todos	0.81%

A la vista de estos resultados podemos extraer una serie de conclusiones:

- El cálculo de las curvaturas a partir de los datos del mapa de profundidad no puede considerarse exacto respecto a las medidas faciales reales del individuo, debido principalmente a la no uniformidad de los datos adquiridos. Este valor aproximado obtenido es suficiente para una localización de los rasgos, pero consideramos que no es suficientemente representativo como para realizar un reconocimiento facial únicamente a partir de esos valores.
- La medida de las curvaturas en la superficie es un método apropiado para la localización de los rasgos faciales, aunque no es lo suficientemente robusto

ante pérdida de la adquisición de puntos, imágenes con gestos, y otro tipo de condiciones que pueden darse.

- Este método está diseñado para ser aplicado sobre un mapa de profundidad. Ésta es su principal desventaja, ya que la transformación de los datos 3D al mapa de profundidad ya implica una manipulación de la información. Si los datos 3D no están normalizados, el mapa de profundidad no lo estará tampoco. El método presentado en este capítulo mejorará la posición del mapa de profundidad, pero nunca del mismo modo como si se utilizara un método normalizador directamente sobre los puntos en el espacio tridimensional.

Estas conclusiones nos llevaron a la necesidad de implementar un sistema de normalización facial más exacto y que actuara directamente sobre el mallado 3D proporcionado por el escáner. La información dada por las curvaturas era interesante de cara a una aproximación de la posición de los rasgos, pero no era suficiente como método único. En el siguiente apartado presentamos el método diseñado para cumplir todos estos requisitos: localización de puntos característicos faciales mediante Spin Images.

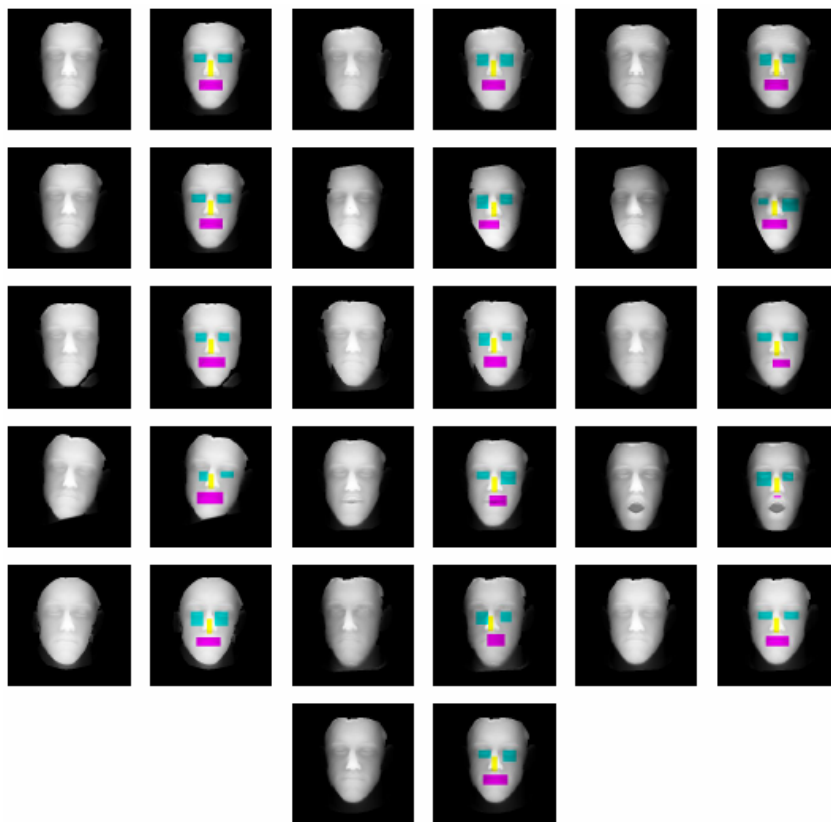


Figura 4.10. Ejemplos de localización de los rasgos mediante el cálculo de la curvatura media. Se presentan en todos los casos la imagen de rango original (izquierda) y los rasgos localizados señalados (derecha).

4.3.- Normalización mediante Spin Images.

Como hemos descrito en el apartado introductorio, se ha diseñado un segundo método de localización facial automática basado en rasgos locales, mediante la técnica de registro global Spin Images [Con05a][Con05b]. Este método realiza una caracterización local de una superficie en torno a un punto mediante un histograma espacial representado en forma de imagen, la Spin Image. Inicialmente, esta técnica fue diseñada para el reconocimiento de objetos en 3D mediante el registro entre superficies. Un profundo estudio del método de las Spin Images nos permitió intuir que se trataba de un método idóneo para el problema de la localización de rasgos faciales en 3D, ya que permite caracterizar de manera satisfactoria puntos con una geometría particular, como es el caso de los rasgos en la cara.

Se decidió localizar tres puntos característicos: la punta de la nariz y los lagrimales. Con estos tres puntos es posible normalizar la cara tanto en posición como en tamaño. La localización de los ojos se realizó mediante los lagrimales, y no mediante los bordes exteriores de los ojos, debido a que estos puntos tienen en un entorno local una geometría muy particular (entrecejo, nariz), y su localización se ajustaba adecuadamente a los requisitos de las Spin Images.

En este apartado, en primer lugar daremos una introducción al concepto de las Spin Images y su aplicación al reconocimiento de objetos 3D. Posteriormente, explicaremos en detalle el método completo de localización automática diseñado. Finalmente, mostraremos los resultados al aplicar este método a la base de datos FRAV3D, y se presentará un estudio de la influencia de la resolución de la spin image sobre la localización de rasgos.

4.3.1. Introducción a las Spin Images.

La técnica de las Spin Images es un método de registro global de superficies presentado por Johnson y Hebert [Joh97] [Joh98] [Joh99]. Se basa en la creación de imágenes, las llamadas Spin Images, que caracterizan cada una de ellas la geometría de la superficie localmente respecto a un punto. Analizando esta imagen es posible localizar zonas características en la superficie, y realizar su registro con otras superficies. El proceso puede repetirse en cualquier punto del mallado 3D, girando en torno a toda la superficie. De ahí el nombre de “Spin Image” o “imagen de giro” (Figura 4.11).

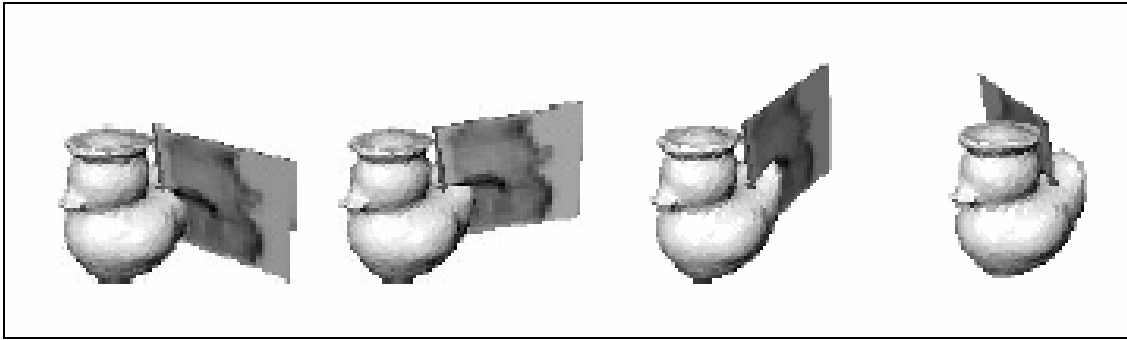


Figura 4.11. Creación de distintas Spin Images en diferentes puntos, en torno a la superficie [Joh97].

Una Spin Image asociada con un punto (origen) en la superficie, es un histograma 2D construido a partir de la posición de los puntos vecinos al origen, representando la geometría local de la superficie en torno al punto origen.

Como se muestra en la Figura 4.12, un punto orientado O (p : punto y n : vector normal perpendicular a la superficie) define una sistema de coordenadas local ($O(p, n)$) de cinco grados de libertad. Este sistema de coordenadas es definido a partir de:

P : plano tangente que contiene al punto p , perpendicular al vector unitario de orientación n .

L : recta que pasa por el punto p y es paralela al vector n

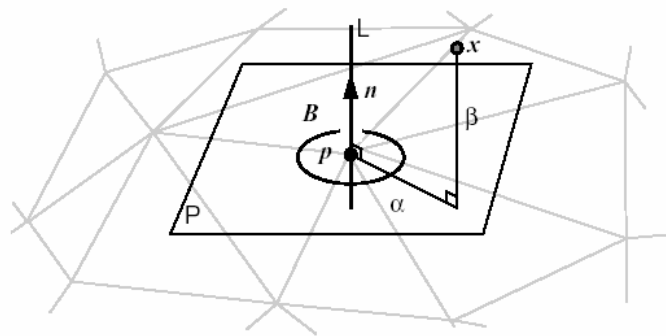


Figura 4.12. Ejemplos de localización de los rasgos mediante el cálculo de la curvatura media. Se presentan en todos los casos la imagen de rango original (izquierda) y los rasgos localizados señalados (derecha).

Las dos coordenadas del nuevo sistema son:

α : distancia perpendicular a la recta L

β : distancia con signo perpendicular al plano P

Se trata de un sistema de coordenadas cilíndrico donde se ha perdido la coordenada del ángulo polar (ésta no puede ser determinada únicamente a partir de un punto y la normal).

A partir del sistema de coordenadas $O(p, \mathbf{n})$ podemos definir el Spin-map S_o , como la función que proyecta un punto 3D, x , al sistema de coordenadas 2D $O(p, \mathbf{n})$, correspondiente al punto orientado:

$$S_o : R^3 \rightarrow R^2$$

$$S_o(x) \rightarrow (\alpha, \beta) = (\sqrt{\|x-p\|^2 - (\mathbf{n} \cdot (x-p))^2}, \mathbf{n} \cdot (x-p))$$

Una vez calculados los pares (α, β) de todos los puntos de la nube 3D respecto al punto orientado O , se procede a codificar la densidad de puntos (α, β) para crear la imagen “Spin Image”. Para ello debe realizarse una correspondencia entre la posición de los píxeles de la imagen, y la posición de los puntos (α, β) . En la Figura 4.13 puede verse la representación de las coordenadas de los píxeles de la imagen (i, j) , y las coordenadas α y β del Spin Map.

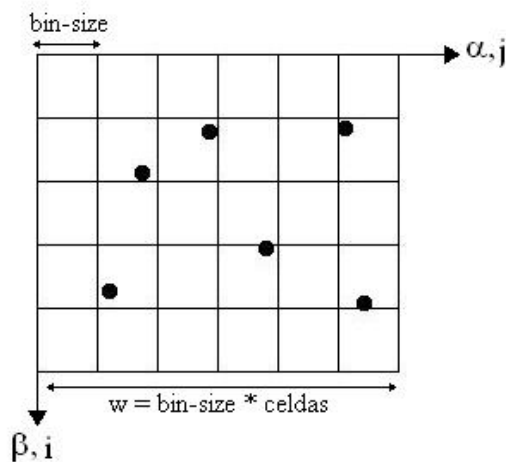


Figura 4.13. Creación de la Spin Image: relación entre las coordenadas de los píxeles (i, j) y las coordenadas (α, β) del sistema de coordenadas definido por el punto orientado O .

Existen tres parámetros a fijar durante la construcción de la Spin Image:

- “Bin Size” o tamaño de la celda: es la resolución espacial de la imagen, es decir, la distancia entre píxeles en el espacio S_o . Dependiendo del valor de este parámetro, la resolución de la Spin Image será mayor o menor (Figura 4.14). El valor de la anchura de la spin image, pero expresado en las coordenadas espaciales del “bin size”, será denominado W .

- “Support Angle” o ángulo máximo: máxima diferencia admitida en el ángulo formado entre el vector normal al origen y el vector normal al punto considerado. (Figura 4.15)
- “Support Distance” o distancia máxima: máxima distancia admitida entre el punto origen y el punto considerado. Si es pequeña, representará rasgos locales; si es grande, rasgos globales. Limitada por el coste computacional. (Figura 4.16)

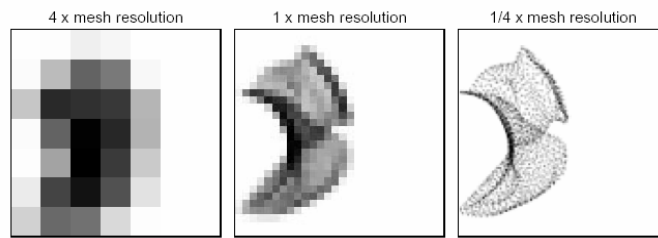


Figura 4.14. Spin Images creadas con diferentes valores para el parámetro “Bin Size” [Joh97].

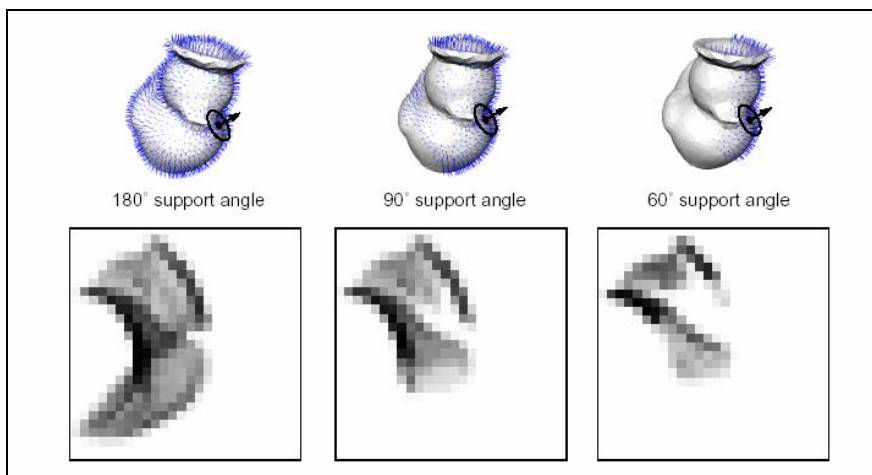


Figura 4.15. Spin Images creadas con diferentes valores para el parámetro “máximo ángulo” [Joh97].

Finalmente, las expresiones para obtener la posición del punto (α , β) dentro de la imagen son:

$$i = \frac{\left(\frac{W}{2.0}\right) - \beta}{\text{bin size}} \quad j = \frac{\alpha}{\text{bin size}}$$

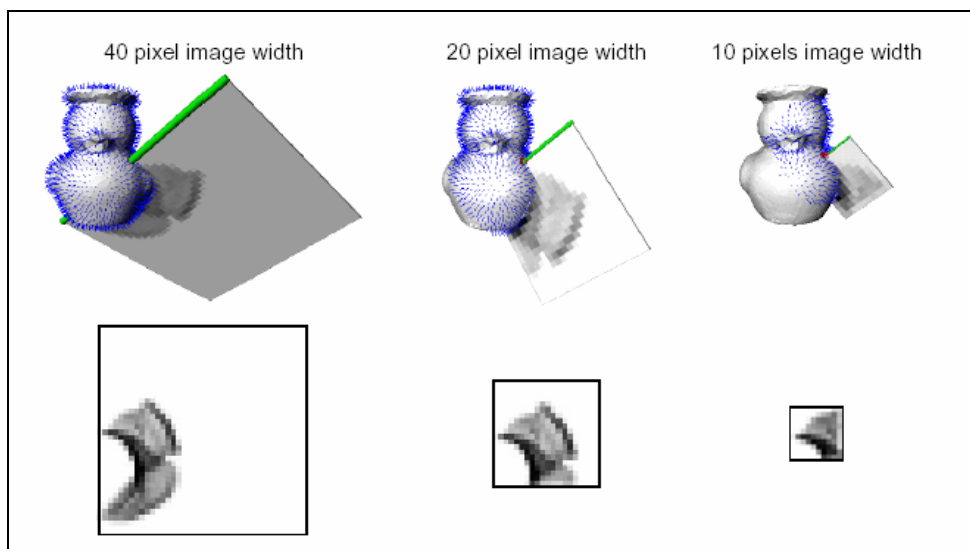


Figura 4.16. Spin Images creadas con diferentes valores para el parámetro “máxima distancia” [Joh97].

Una vez obtenidas las posiciones de cada punto, se establece mediante una interpolación bilineal la influencia sobre el nivel de gris de cada píxel, de cada punto (α, β) . En la Figura 4.17 se representa la posición del punto dentro de la celda (entre los cuatro píxeles), y la contribución de este punto al nivel de intensidad de cada uno de los píxeles, en función de su distancia a ellos. La distancia a los cuatro píxeles más cercanos (a la distancia vertical, b la distancia horizontal) viene dada por las siguientes expresiones:

$$a = \left| \beta - \left\lfloor i - \frac{W}{(2bin)} \right\rfloor * bin \right|$$

$$b = \alpha - j \cdot bin$$

En la Figura 4.18 puede verse un ejemplo de distintas spin images calculadas en distintos puntos de la superficie facial

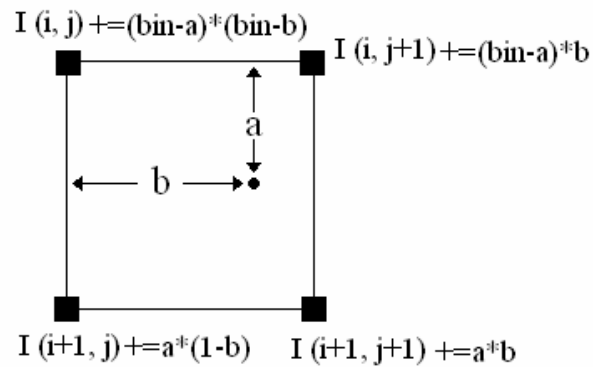


Figura 4.17. Distancia del punto (α, β) a los cuatro píxeles más cercanos, e influencia en su nivel de intensidad.

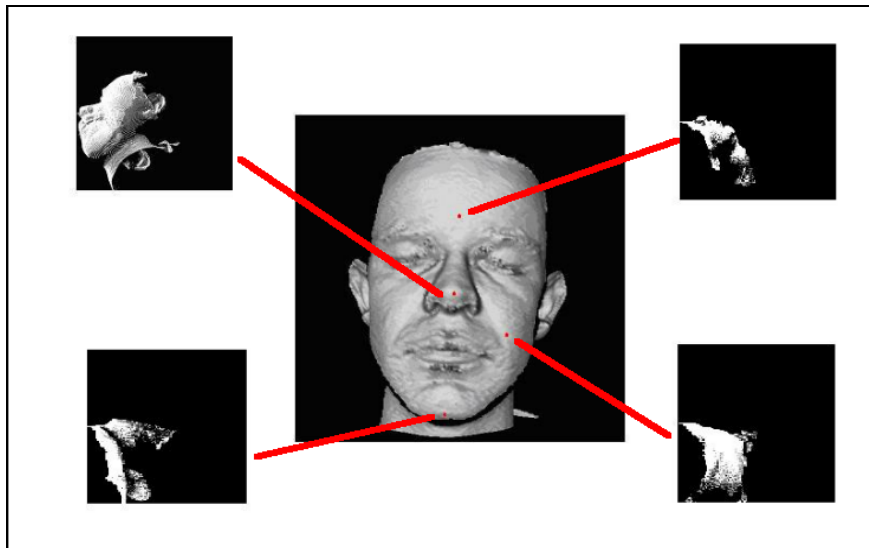


Figura 4.18. Diferentes spin images correspondientes a distintos puntos faciales.

4.3.2. Localización de los puntos característicos mediante Spin Images

La aplicación de la técnica de las Spin Images a la localización de rasgos faciales en una cara 3D es inmediata. En una cara, los puntos correspondientes a rasgos faciales tienen una geometría muy diferenciada, por lo que sus spin images serán muy características. Comparando las spin images, se podrá decidir si un punto corresponde a un rasgo facial o no.

El método de comparación de imágenes elegido ha sido un clasificador de máquinas de vectores soporte SVM [Cor95]. Se trata de un clasificador binario muy robusto, con gran capacidad de generalización, por lo que se consideró ideal para realizar esta tarea. Se han

entrenado tres clasificadores SVM diferentes, cada uno para un punto característico diferente. El proceso de entrenamiento del SVM es supervisado. En este caso se han introducido como imágenes de entrenamiento Spin Images correspondientes a los puntos buscados (como ejemplos positivos) y Spin images correspondientes a ruido, otras posiciones, puntos con posibilidad de crear confusión, etc. (como ejemplos negativos).

Tras un estudio inicial, se observó que la técnica de las Spin Images era efectiva, pero muy costosa computacionalmente, lo cual hacía necesario la selección inteligente de los puntos sobre los que aplicarla. Por lo tanto, se decidió introducir en el proceso una etapa de preprocesado, donde las áreas candidatas a contener los puntos característicos fueron seleccionadas. De este modo, sólo se calcularon las Spin Images de los puntos candidatos a ser puntos característicos, ahorrando una gran cantidad de tiempo de procesado. Además, se decidió no utilizar la resolución máxima dada por el escáner (r_1 , ver apartado 3.2), sino la resolución r_2 (unos 5000 puntos). Como se explicará en detalle al final de este apartado, la resolución r_2 es la más adecuada para realizar este proceso.

Finalmente el proceso se ha realizado en cuatro pasos:

- Paso 1: Localización de la punta de la nariz mediante las Spin Images.
- Paso 2: Selección de las áreas candidatas a contener los ojos: cálculo de curvaturas.
- Paso 3: Localización de los ojos mediante Spin Images.
- Paso 4: Normalización Facial mediante puntos característicos.

A continuación se van a explicar más en detalle cada uno de estos pasos.

Paso 1: Localización de la punta de la nariz

Debido a que la punta de la nariz es un punto con una geometría muy especial (punto más saliente y más convexo de la cara), se procedió a realizar su localización sin una etapa de preprocesado inicial.

Inicialmente, la primera aproximación que se realizó para localizar la punta de la nariz fue simplemente la elección del punto más saliente de la cara, es decir, el menos profundo. Tras un análisis de los resultados obtenidos al aplicar este método a la base de datos FRAV3D, se obtuvo tan sólo un 60% de aciertos. Una observación más detallada de los datos adquiridos por el escáner nos indica que las causas de este elevado porcentaje de error son varias.

En primer lugar, existen problemas con el pelo. Es muy habitual que un flequillo sobresalga más que la nariz. O el pelo largo también puede producir este efecto. Por otro lado, puede darse el caso de que el punto más saliente de la cara sea la barbilla. Puede ser debido a la propia estructura facial del individuo, o a la posición de la cara, o incluso a la ropa del individuo (solapas, abrigos). Finalmente, como se indicó en el apartado 3.3, en el proceso de adquisición de los datos con el escáner láser aparece a menudo un pico de ruido bajo la nariz, debido a que en ese punto existe una superficie horizontal. Puede verse un ejemplo de cada una de estas situaciones en la Figura 4.19.

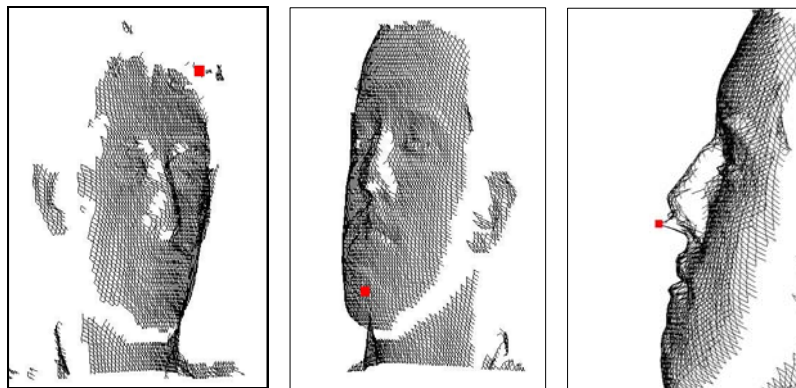


Figura 4.19. Ejemplos de detección errónea de la punta de la nariz mediante el método de selección del punto más saliente de la cara. Se señala en rojo el punto seleccionado. De izquierda a derecha: flequillo, barbilla y ruido bajo la nariz.

Por todos estos fenómenos observados, se consideró que basarse únicamente en la profundidad no era un método válido para localizar la nariz. Como alternativa mucho más robusta, se decidió utilizar las Spin Images.

Los parámetros de creación de las Spin Images seleccionados tras una serie de pruebas han sido los siguientes:

- Ángulo y distancia máxima: no se han limitado, se han introducido en la Spin Image todos los puntos considerados. En lugar de limitar estos parámetros, se ha optado por limitar el número de puntos 3D considerado, eligiendo en cada caso un área en torno al punto candidato, fijando las coordenadas xy. De este modo nos hemos quedado con un número de puntos semejante para todas las caras.
- Resolución de las Spin Images: se eligió una resolución de 60x60 píxeles, suficiente para contener todos los puntos seleccionados.

Los puntos candidatos considerados fueron los más salientes de la cara sucesivamente. Una vez seleccionado un candidato, a continuación se procedió a calcular la Spin Image correspondiente a este punto, y a clasificarla para comprobar si se trataba de la punta de la nariz o no. En la Figura 4.20 pueden verse las Spin Images correspondientes a dos puntos diferentes: la punta de la nariz, y a un pico de ruido. Es evidente la diferencia entre ambas. El clasificador SVM discriminaría entre las Spin Images correspondientes a puntos característicos y las que no lo son. Se entrenaron tres SVM diferentes: uno experto en diferenciar la punta de la nariz de los puntos cercanos (habitualmente se da este caso en caras giradas), otro experto en detectar el pico de ruido bajo la nariz, y otro en detectar el pelo (flequillo o pelo largo puede ser más salientes que la punta de la nariz). Mediante estos dos últimos modelos, se pudo reconocer estas dos situaciones y eliminar los puntos de ruido. El primer SVM se entrenó con 96 ejemplos de Spin Images correspondientes a la punta de la nariz (ejemplos positivos), y 32 ejemplos negativos (spin images de puntos cercanos); el modelo para detectar ruido bajo la nariz se entrenó con 15 ejemplos positivos y 15 negativos; finalmente, el modelo experto en diferenciar el pelo, fue entrenado también con 15 ejemplos positivos y 15 negativos.

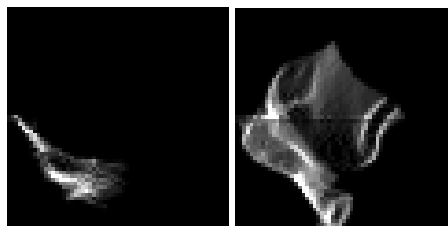


Figura 4.20. Spin Images correspondientes a la punta de la nariz (izquierda), y a un punto de ruido (derecha).

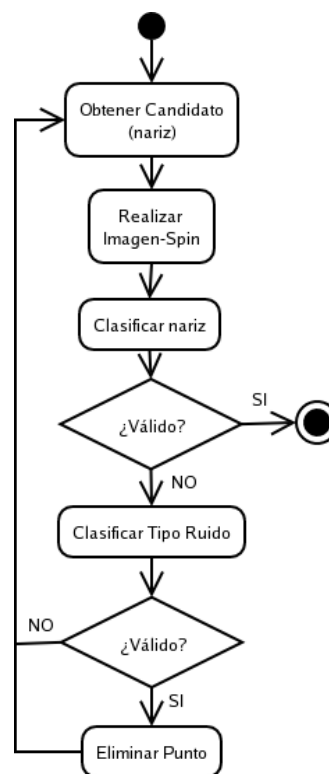


Figura 4.21. Diagrama del proceso de localización de la punta de la nariz y eliminación del ruido.

Con este procedimiento, se diseñó un método muy robusto para localizar la nariz en una cara 3D y además un método que permite eliminar los puntos no deseados. El proceso completo puede verse en el diagrama de la Figura 4.21.

En la Figura 4.22 podemos ver señalados en azul los puntos que han sido candidatos a ser punta de la nariz, y han sido rechazados por el SVM, y en rojo los que han sido finalmente aceptados. Los ejemplos mostrados corresponden con los mismos que se representaron al inicio de este apartado, en el método de localización de la nariz por punto más saliente. Como puede verse, en este caso la nariz ha sido localizada correctamente, ya que este método basado en Spin Images es robusto frente a las situaciones descritas.

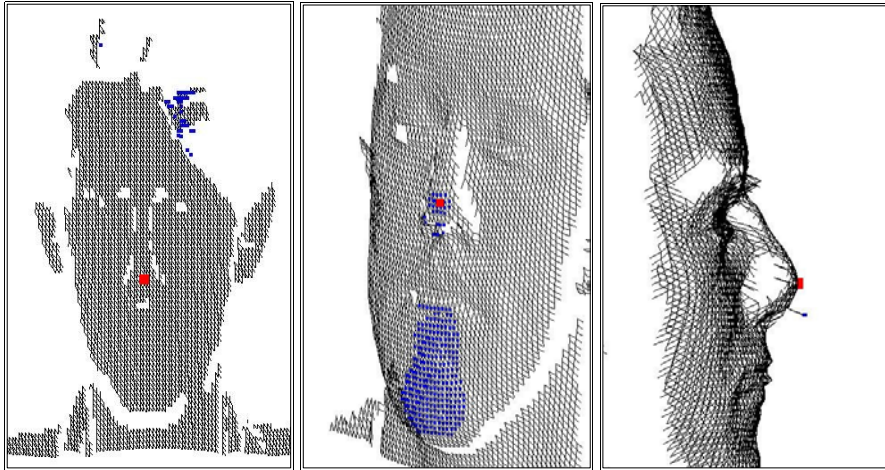


Figura 4.22. Ejemplos de detección correcta de la nariz, frente a situaciones difíciles, mediante el método de las Spin Images.

Paso 2: Selección de las áreas candidatas a contener los ojos: cálculo de curvaturas.

Una vez localizada la nariz correctamente, se procedió a la selección de las áreas de la cara donde era más probable encontrar los ojos. Los puntos característicos buscados fueron los dos lagrimales.

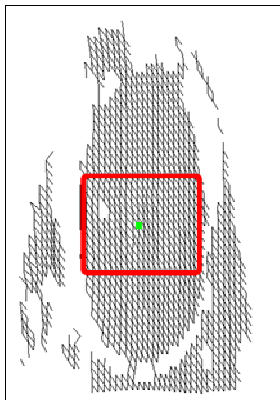


Figura 4.23. Selección de puntos en torno a la nariz.

Como primera aproximación, se eligió seleccionar los puntos contenidos en un cuadrado alrededor de la punta de la nariz (Figura 4.23). De este modo eliminamos puntos correspondientes al pelo, los hombros, la barbilla, etc., zonas que no aportan información para la localización de los ojos. Para ello se tuvo únicamente en cuenta información de la posición de los puntos en x e y .

La elección de los puntos candidatos a ser lagrimales requiere de un análisis geométrico más complejo que en el caso de la nariz. Se ha aplicado una etapa de preprocesado, donde mediante curvaturas y técnicas de clustering se han obtenido las áreas que contienen los puntos buscados. Sólo dentro de estas áreas se han buscado candidatos, y se ha aplicado la técnica de las Spin Images y SVM. Para realizar este proceso, se decidió utilizar una menor resolución de los datos del escáner (r4, unos 1200 puntos), ya que ésta es adecuada para el cálculo de las curvaturas, tanto desde un punto de vista de coste computacional, como considerando el que las curvaturas discretas se realzan de este modo.

Esta etapa puede dividirse en dos partes: en primer lugar las áreas con un mayor curvatura media discreta son seleccionadas; posteriormente, son separadas en tres grupos mediante clustering.

El cálculo de la curvatura media discreta [Lyc01] se realiza en cada punto. A continuación se describe el proceso de cálculo de la curvatura media discreta en un mallado 3D.

Para calcular las curvaturas en un mallado, es necesario disponer de la información de todas las facetas (triángulos en nuestro caso) y las normales a cada faceta. El formato VRML de los ficheros con el que se ha trabajado incluye toda esta información. El valor de la curvatura media discreta \overline{H} viene dado por:

$$\left(\overline{H}\right)=\frac{1}{4}\sum\|e_i\|*\|\beta_i\|$$

Donde β_i es el ángulo formado entre las normales para una faceta i ; y e_i es el vector que representa la arista común.

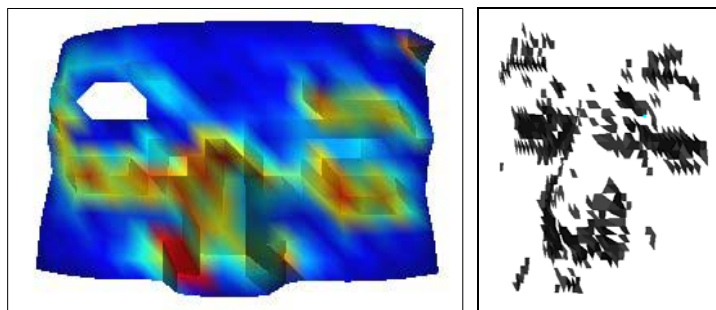


Figura 4.24. Valor de la curvatura media discreta en cada faceta de la cara (izquierda) y extracción de los valores máximos (derecha).

Las áreas con interés en la selección de rasgos son las que tienen una mayor curvatura. En la Figura 4.24 puede verse en rojo las zonas con mayor curvatura, y se aprecia que coinciden con la zona de los ojos y la nariz. Para realizar esta selección de curvaturas, se aplicó el método de los cuartiles [Peñ01] al conjunto de puntos y curvaturas calculadas. Consiste en la ordenación de los puntos en función del valor de la curvatura media calculado, y su separación en varios grupos (15 en nuestro caso). Después, se elige el porcentaje de grupos que se desea seleccionar. En nuestro caso, se eligió seleccionar el 30% de los grupos con mayor curvatura.

Aplicando técnicas clustering basadas en distancia euclídea [The99], separamos las áreas seleccionadas en tres grupos diferentes, uno para cada ojo y otro para la nariz. El procedimiento seguido para realizar el clustering o agrupamiento es el siguiente:

- Inicialmente, existen tantos grupos como puntos.
- Se crea una matriz en la que se almacena las distancias euclídeas entre todos los puntos.
- Se toma la menor distancia entre dos grupos, y se agrupan formando un único grupo. Se calcula el centroide del nuevo grupo (media de los puntos que lo forman).
- Si existen más de tres grupos, se vuelve al paso inicial.

Una vez los puntos son separados en tres grupos, se aplican una serie de filtrados para eliminar datos incorrectos: se eliminan los grupos que no tengan un mínimo número de puntos (y se procedería a repetir el proceso de creación de grupos, con este conjunto de puntos eliminado); y se eliminan dentro de un grupo aquellos puntos que estén demasiado alejados del centroide.

Una vez se han localizado las tres áreas candidatas, realizamos un cambio de resolución de la cara, volviendo a la resolución inicial r_2 . Para ello se calcula la envolvente convexa de cada uno de los clusters, y se “rellenan” con los puntos correspondientes a r_2 . En la Figura 4.25 pueden verse los grupos o clusters formados, inicialmente calculados en r_4 , y posteriormente con su resolución aumentada a r_2 . Este procedimiento es extremadamente sencillo, y permite incrementar enormemente la velocidad del proceso.

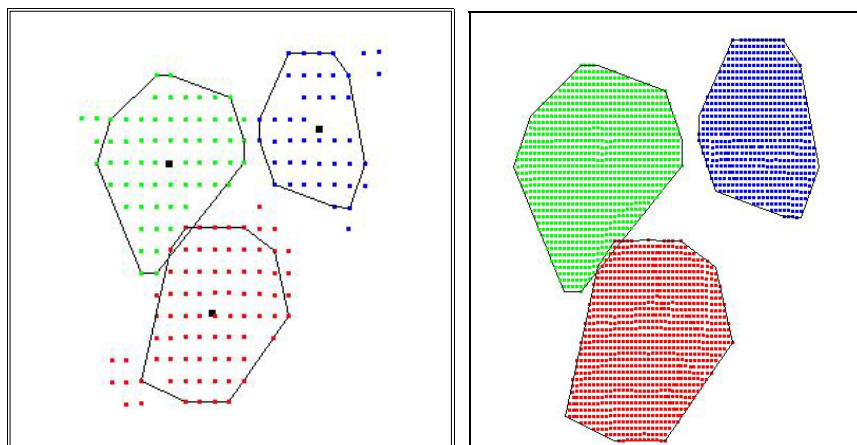


Figura 4.25. Grupos localizados en resolución r4 (a la izquierda) y completados con la información de la resolución r2 (a la derecha).

En la Figura 4.26 se representan los tres grupos localizados en la cara. Como puede verse, cada uno de estos grupos contiene uno de los puntos característicos buscados.

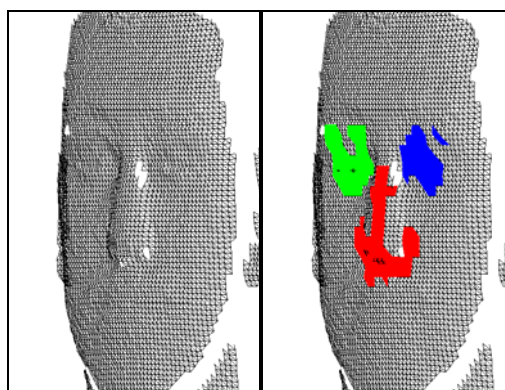


Figura 4.26. Áreas que contienen los puntos característicos buscados, halladas mediante clustering.

Paso 3: Localización de los ojos mediante Spin Images

Una vez localizadas las áreas de la cara que contienen los ojos, se aplicó la técnica de las Spin Images únicamente a estos puntos. Los puntos candidatos para los lagrimales se van eligiendo como aquéllos con mayor profundidad. Una vez seleccionado el candidato, la Spin Image se calcula teniendo en cuenta los puntos de la cara completa, no sólo los del cluster correspondiente. Esta imagen se introduce en el clasificador SVM (entrenado para localizar lagrimales) y es aceptada o rechazada. Se entrenaron dos SVM, uno especializado en localizar el lagrimal derecho y otro el izquierdo. Cada SVM se entrenó con 90 imágenes correspondientes a ejemplos positivos, y 90 imágenes correspondientes a ejemplos negativos.

En la Figura 4.27 se representan los puntos considerados como candidatos, los rechazados y los aceptados en el proceso de localización de nariz y ojos. Finalmente en verde aparecen los puntos localizados correctamente.

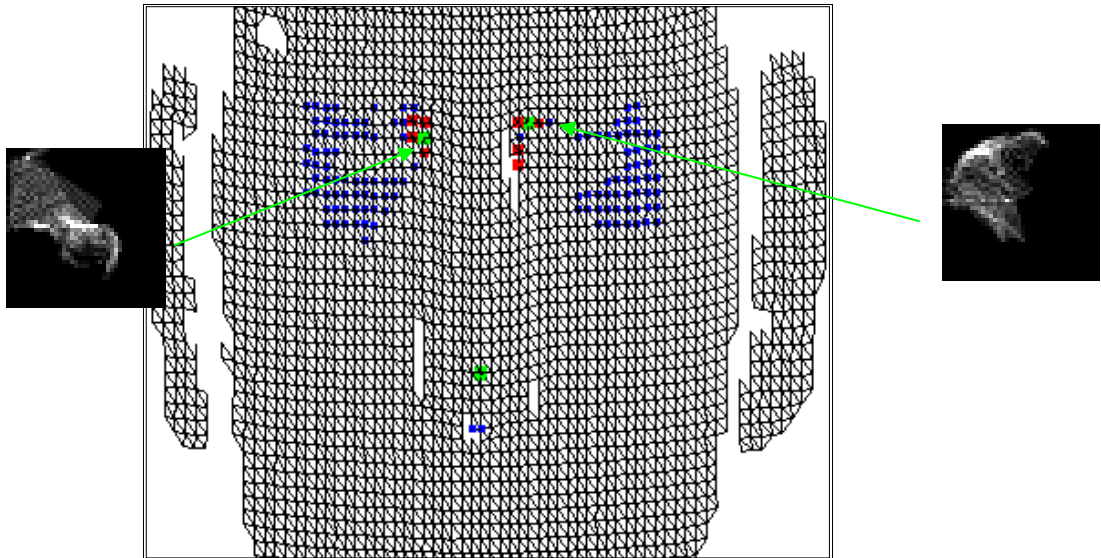


Figura 4.27. Puntos candidatos no clasificados (azul), rechazados (rojo) y aceptados (verde) en el proceso de localización de los ojos puntos característicos. Se representan también las Spin Images correspondientes a los puntos localizados: ojo derecho y el ojo izquierdo.

Para comprobar que la localización de los rasgos se había realizado correctamente, se introdujo una etapa de validación, basada en el conocimiento a priori de la estructura facial. Para ello se tuvo en cuenta que la punta de la nariz debía estar siempre entre los dos ojos, y que la distancia entre ojos no superara un determinado umbral. En la Figura 4.28 podemos ver el resultado final de la localización de puntos característicos en diferentes tipos de caras.

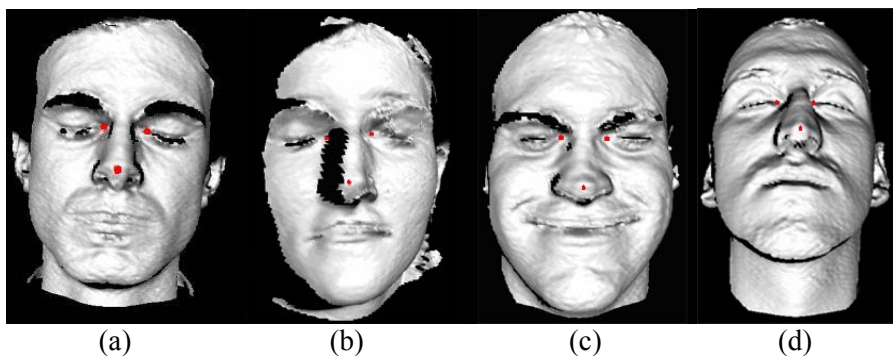


Figura 4.28. Resultado final en la localización de puntos característicos (señalados en rojo). De izquierda a derecha: frontal (a), girada en Y (b), sonrisa (c) y girada en X (d).

Paso 4: Normalización Facial mediante puntos característicos.

Una vez los tres puntos característicos son localizados, se procede a realizar una normalización de la posición facial. Este proceso ha sido realizado mediante varios pasos, con la finalidad de que se tratara de un proceso robusto a pequeñas variaciones en la localización de los puntos característicos.

En primer lugar, se procede a realizar una traslación de todos los puntos de la cara, tomando como origen de referencia la punta de la nariz.

Después, se procede a normalizar la cara rotando en torno al eje Y, en función de los valores de la coordenada de profundidad de los dos lagrimales localizados. En una cara en posición frontal los lagrimales se sitúan ambos en una profundidad similar. Por lo tanto, para realizar la normalización se girará la cara un ángulo tal que los dos lagrimales se coloquen en la misma posición Z. En la Figura 4.29 puede verse el proceso de giro.

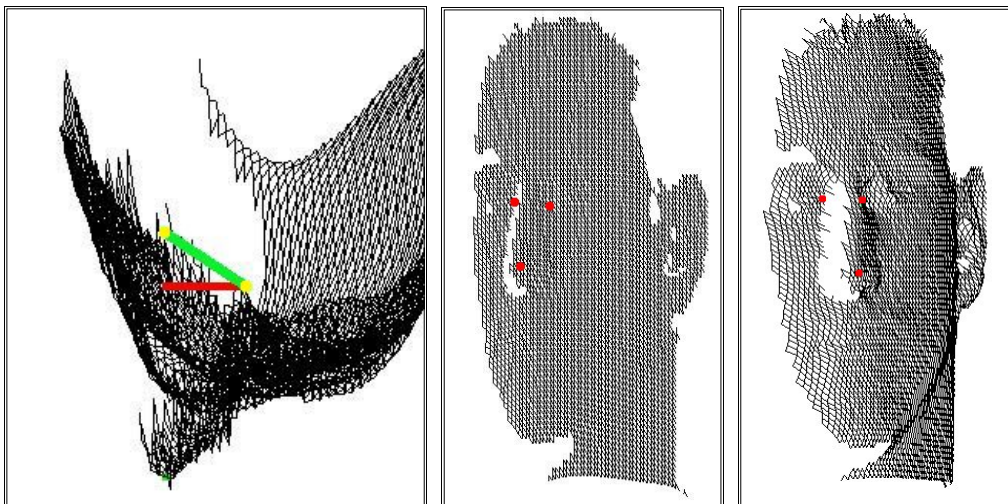


Figura 4.29. Giro en torno al eje Y para dejar ambos lagrimales en la misma posición de profundidad. En amarillo los lagrimales localizados, en verde el vector que los une, y en rojo la posición deseada frontal. En el centro y a la izquierda la cara antes y después de ser girada en Y.

El siguiente giro que se realiza es en torno al eje Z. La posición de los lagrimales en profundidad está muy definida (punto más profundo de su entorno), pero no lo está tanto en el caso de su coordenadas x e y. Es habitual que los lagrimales sean localizados de manera no tan precisa en el plano XY, como para que únicamente situándolos en la misma posición Y la cara sea normalizada. En la Figura 4.30 podemos ver esa situación, donde los lagrimales son localizados correctamente, pero no en una posición perfectamente horizontal. En un caso (ojo derecho) está ligeramente por encima de las pestañas, y en el otro caso (ojo izquierdo),

ligeramente por debajo. Por esta razón se decidió utilizar para calcular el ángulo en torno al eje Z, no únicamente la posición de los dos lagrimales, sino un conjunto de puntos seleccionado.

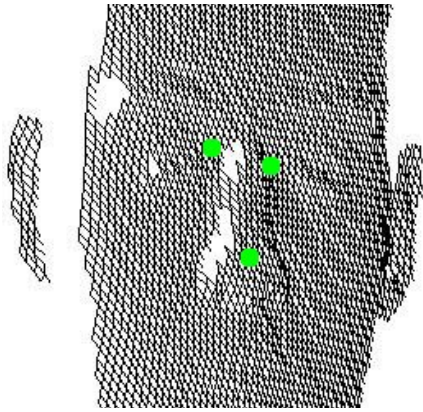


Figura 4.30. Lagrimales localizados de manera correcta, pero sin la precisión suficiente para realizar el giro en Z.

Se diseñó entonces un método más fiable, en el que el ángulo de giro en torno al eje Z se calcula en función de la posición del entrecejo y del puente de la nariz. El entrecejo es calculado a partir de la media de un conjunto de diez puntos localizados en la posición intermedia entre ambos lagrimales, que tengan una profundidad mínima. Una vez localizado el entrecejo, se procede a calcular el puente de la nariz a partir de la posición de la punta de la nariz, el entrecejo, y los puntos entre ambos que sean menos profundos.

A partir de este conjunto de puntos se calcula la recta de regresión, obteniendo de manera muy fiable el puente de la nariz. En la Figura 4.31 se presentan el entrecejo localizado, y el puente de la nariz.

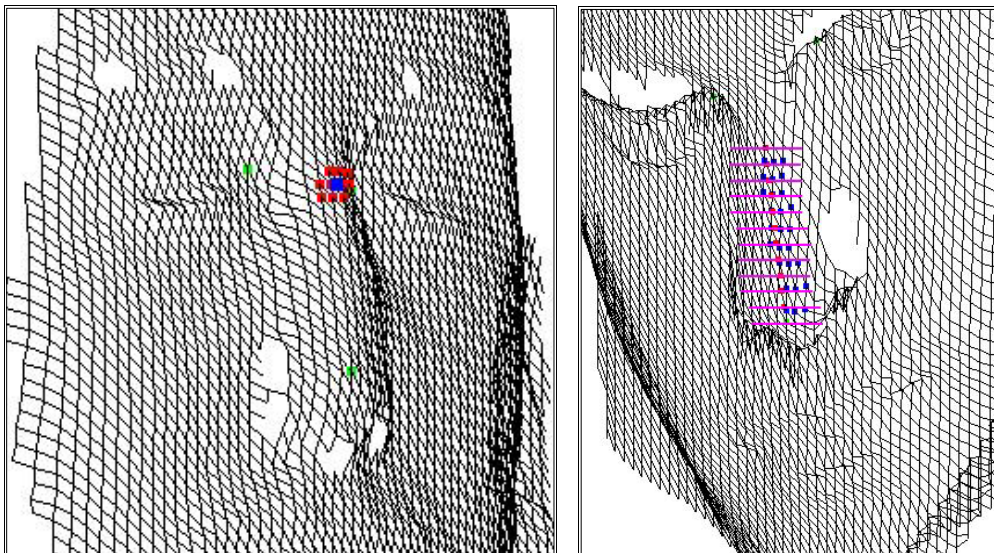


Figura 4.31. Posición del entrecejo (izquierda). Puntos considerados en el cálculo del puente de la nariz y el ángulo de giro en Z (derecha) (en azul los puntos, y en rojo la posición del puente de la nariz).

Finalmente, el giro en Z se ha realizado en función del ángulo formado por la recta de regresión que describe el puente de la nariz, y el eje Y. Como medida de seguridad, sólo se ha realizado el giro si la recta de regresión era lo suficientemente buena, es decir, sólo en el caso de

que el coeficiente de regresión $R^2 > 0.15$. En la Figura 4.32 puede verse el resultado de la normalización en Z.

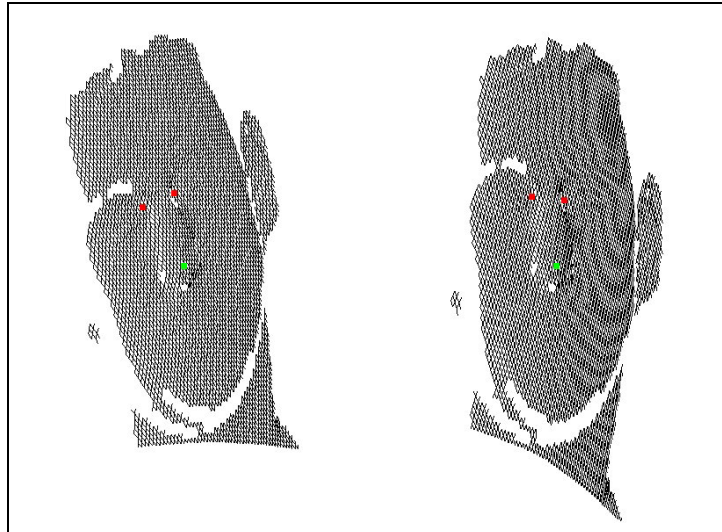


Figura 4.32. Normalización facial mediante puntos característicos: giro en Z. A la izquierda antes de la normalización, a la derecha, después.

Finalmente, la normalización en torno al eje X se realizará mediante el cálculo de la recta de regresión de los puntos en el plano YZ. Para el cálculo de la recta de regresión no se escogen todos los puntos de la cara, sino únicamente aquellos que estén dentro de un rango de profundidad determinado. Una vez calculada la recta, se procederá a rectificar la posición de la cara. En la Figura 4.33 podemos ver el proceso completo.

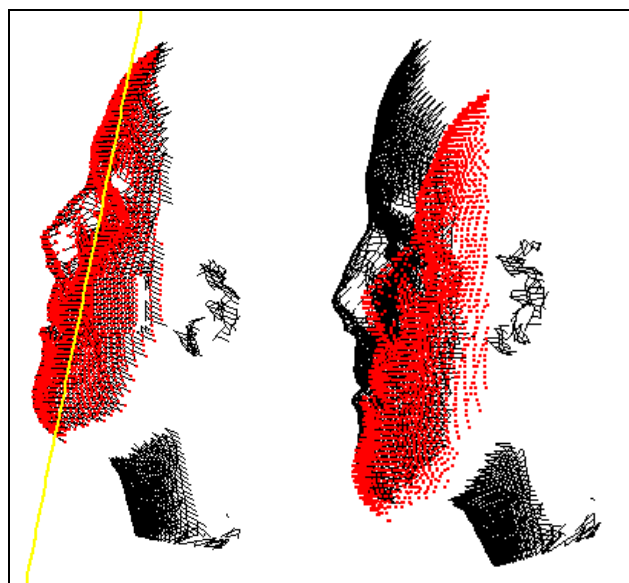


Figura 4.33. Normalización en el eje X. A la izquierda la recta de regresión (amarillo), y los puntos considerados para su cálculo (rojo). A la derecha, la cara antes (rojo) y después (negro) de ser normalizada.

Una vez normalizada la cara en Y y en Z, se procedió a ajustar la cara completa a una elipse, para evitar de este modo los puntos que pueden inducir a error, como son las orejas, el pelo, el cuello, etc. De esta manera, todas las caras tendrán un aspecto unificado. En la Figura 4.34 puede verse el resultado.

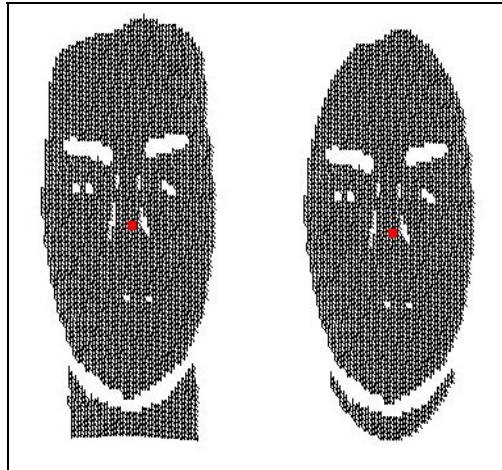


Figura 4.34. Ajuste de los datos faciales a una elipse.

4.3.3. Resultados Experimentales.

Para realizar una medida de la calidad del método de localización de rasgos faciales implementado, y su respuesta frente a diferentes condiciones de adquisición, se procedió a probar el sistema sobre toda la base de datos FRAV3D, y se analizaron los resultados en función del tipo imagen. En la tabla 4.2 pueden verse los porcentajes de localización de rasgos correctos, en función del tipo de imagen y para cada uno de los puntos característicos buscados (punta de la nariz y lagrimales).

Tabla 4. 2. Porcentaje correcto de localización de rasgos faciales mediante la técnica de las Spin Images.

Condición de Adquisición	Nariz	Ojo derecho	Ojo izquierdo
Frontal	99.5	97.3	98
Giro 5° en torno al eje Y	98.57	96.5	96.4
Giro 25° en torno al eje Y	97.2	77.2	73.5
Giro severo en torno al eje Z	98.1	88.4	92
Giro leve en torno al eje Z	99	96.4	97.1
Sonrisa	99.5	96.3	95.3
Boca abierta	98.1	92.1	90.1
Giro en torno eje X, mirando arriba	97.2	86	86.2
Giro en torno eje X, mirando abajo	99.5	96.3	97.7
Variación iluminación	99.2	96.5	97.6

Como puede observarse, el porcentaje de localización correcto es mayor en el caso de la nariz que en el de los ojos. Esto es debido a que la geometría de la punta de la nariz es más característica que la de los ojos. Especialmente si las imágenes están rotadas es habitual que se produzca oclusión en la adquisición de los datos, y que los lagrimales de los ojos no sean ni siquiera capturados. Cuanto mayor sea el giro, más se produce esta situación. Estos fallos en la adquisición de los datos son comunes, ya que se ha permitido que los sujetos tuvieran una posición natural durante la adquisición de la base de datos. Se ha requerido una actitud colaborativa, pero no forzando la posición del individuo.

El sistema de localización de rasgos ha demostrado ser muy robusto frente a esta pérdida de puntos. Como puede verse en la Figura 4.28 (b), el sistema ha sido capaz de localizar los lagrimales de los ojos, incluso cuando hay una enorme zona de puntos que no han sido adquiridos. En caso de que el ángulo de giro sea muy extremo, puede producirse un fallo en la localización de los puntos debido principalmente a las oclusiones. En la Figura 4.35 se presenta un ejemplo de fallo en la localización de los ojos, donde el grado de giro era tal que la localización de los ojos no ha sido posible.

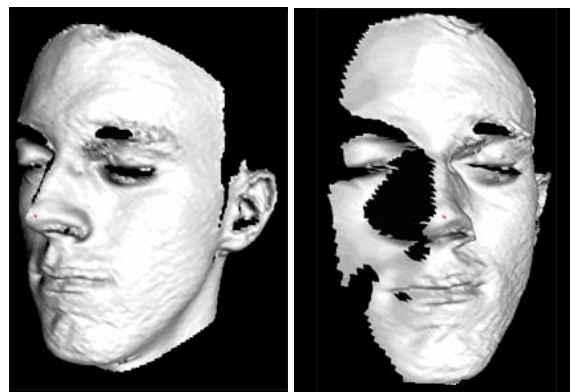


Figura 4.35. Fallo en la localización de los ojos. A la izquierda la imagen original, a la derecha en posición frontal. Puede verse el enorme área de puntos no adquiridos por la oclusión.

Respecto a los fallos de localización de la nariz, el porcentaje es mucho menor. Las causas de estos fallos son principalmente la situaciones en que se da una barbilla prominente (o cara muy girada hacia arriba), y además cuando la nariz no ha sido bien adquirida debido al pico de ruido. En la Figura 4.36 puede verse un ejemplo de esta situación. Si las imágenes tienen ruido bajo la nariz pero la situación de la barbilla no es tan prominente, el sistema ha demostrado ser capaz de eliminar este ruido y detectar correctamente la punta de la nariz.



Figura 4.36. Fallo en la localización de la nariz. A la izquierda la imagen de perfil, donde se aprecia la barbilla prominente y el pico de ruido bajo la nariz. A la derecha, la imagen en posición frontal.

4.3.4 Influencia de la resolución de las Spin Images.

Como se ha explicado a lo largo de este capítulo, la creación de las Spin Images requiere de un gran esfuerzo computacional, que se incrementa en función de la cantidad de puntos que formen el mallado. Para optimizar el método de localización de rasgos, se realizó un estudio en el que se medía la influencia de la resolución del mallado con el que se realizaba el cálculo de las Spin Image, sobre el resultado final de localización de rasgos. La resolución óptima sería aquella con un valor mínimo que produjera un nivel de reconocimiento máximo.

Como se ha explicado en el capítulo 3, el escáner ofrece cuatro posibles niveles de resolución, que llamaremos r_1 , r_2 , r_3 y r_4 (ver tabla 3.1). En la Figura 4.37 se muestran las diferentes Spin Images calculadas a partir de los cuatro diferentes niveles de resolución contemplados.

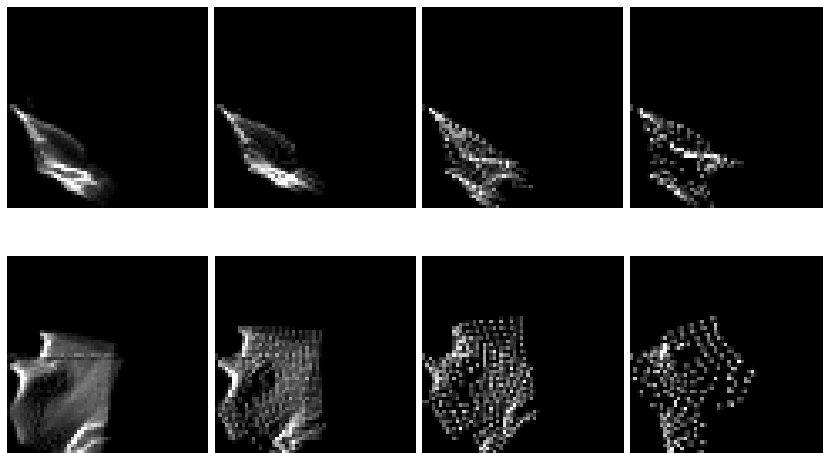


Figura 4.37. Spin Images del mismo punto, calculadas a cuatro niveles de resolución diferentes (mayor resolución a la izquierda, menor a la derecha). La fila superior corresponde a la punta de la nariz. La fila inferior corresponde a otro punto.

El proceso de localización de la nariz fue realizado para cada uno de estos niveles de resolución, en un subconjunto de la base de datos de 30 personas. En la tabla 4.3 se presentan los resultados obtenidos. Como puede verse, el porcentaje de localización correcto de la nariz es aproximadamente el mismo en los niveles de resolución de mallado r1 y r2. A partir del nivel r3, el porcentaje decrece enormemente. A partir de estos resultados se decidió utilizar el nivel de resolución r2 para el proceso de localización de rasgos, ya que ha mostrado ser la opción más eficiente tanto desde el punto de vista computacional como desde los resultados.

Tabla 4. 3. Influencia de la resolución del mallado sobre el porcentaje de localización de la nariz.

Resolución del Mallado	r1	r2	r3	r4
Frontal	99,8	99,3	81,25	56,2
Giro 5° en torno al eje Y	99,1	99,2	87,5	50,6
Giro 25° en torno al eje Y	98,6	98,8	75,2	62,5
Giro severo en torno al eje Z	98,1	98,3	83,4	61,5
Giro leve en torno al eje Z	98,7	98,8	95,3	52,4
Sonrisa	99,5	99,2	75,6	51,3
Boca abierta	98,2	98,9	76,7	75,2
Giro en torno eje X, mirando arriba	96,5	99,1	62,5	25,7
Giro en torno eje X, mirando abajo	99,1	99	65,8	32,6
Variación iluminación	99,3	99,1	62,7	23,4
Media	98,7	99	77,1	49,7

4.4.- Normalización global.

Como se ha visto en el apartado anterior, el método de localización de rasgos faciales no tiene un acierto del 100%, ya que siempre existen condiciones extremas donde no es posible localizar los puntos. Estos datos no normalizados afectarían enormemente en una etapa posterior de reconocimiento facial. Para hacer frente a estas situaciones, se decidió implementar un método de normalización que no se basara en la posición de puntos característicos, sino en características globales de la cara. Este método fue pensado para ser utilizado de manera complementaria al método local, actuando en las situaciones en que dicho método fallara.

El método global diseñado se basó no en unos pocos puntos característicos, sino en la totalidad de los puntos faciales. Para estimar la posición de la cara, se calcularon diferentes rectas de regresión de los puntos, calculadas sobre distintos planos.

El primer paso que se realizó fue la detección de las componentes conexas del conjunto de puntos. De este modo se eliminan puntos de ruido o no interesantes (pelo, cuello, orejas, etc.) que puedan influir en el cálculo del ángulo de normalización final. El cálculo de las componentes conexas permite agrupar puntos del mallado que pertenezcan a la misma faceta. A

partir de una cara se podrán obtener distintos grupos o componentes, de los cuales el mayor de ellos será el formado por los puntos de la cara..

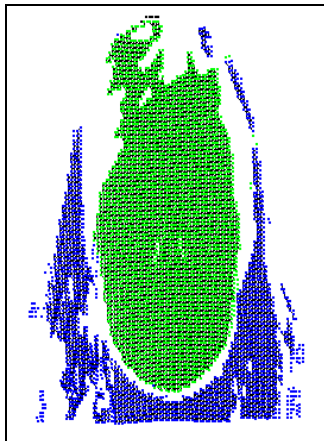


Figura 4.38. Componentes conexas calculadas en una cara. En verde la componente principal correspondiente a la cara. En azul el resto de componentes.

Los pasos básicos en el cálculo de las componentes conexas se describen a continuación:

- Se recorre el mallado completo, generando un listado de las facetas a las que pertenece cada uno de los puntos. Las facetas son indexadas con un número de orden.
- Mientras el punto pertenezca a más de una faceta, actualizar el listado de tal manera que se asocie el punto con la faceta de mayor orden.
- El proceso se repite hasta que cada punto tenga asociado una única faceta. Cada componente vendrá dada por el conjunto de puntos que pertenecen a la misma faceta.

En la Figura 4.38 se presentan las componentes conexas de una cara, donde se ha señalado la componente principal correspondiente a la cara en verde. Se puede observar cómo son eliminados los puntos que no aportan información de la posición facial.

Una vez que se han seleccionado los puntos que pertenecen a la cara se realizará el cálculo de los ángulos de normalización. Para ello, mediante el método de Mínimos Cuadrados se calcula el plano de regresión de los puntos de la cara, y a partir de este plano se normaliza la posición de la cara. En la Figura 4.39 puede verse el plano de regresión (azul) calculado a partir

del conjunto de puntos faciales (rojo). En este ejemplo, donde existe ruido bajo la nariz, la punta de la nariz no se habría localizado correctamente, pero la normalización no se ve afectada.

Finalmente, los resultados del porcentaje de normalización correcta, tras aplicar el método global basado en regresiones, sobre el resultado de la normalización de las Spin Images, se representa en la tabla 4.4. Como puede verse, existe una evidente disminución de la tasa de error si se aplican los dos métodos consecutivos.

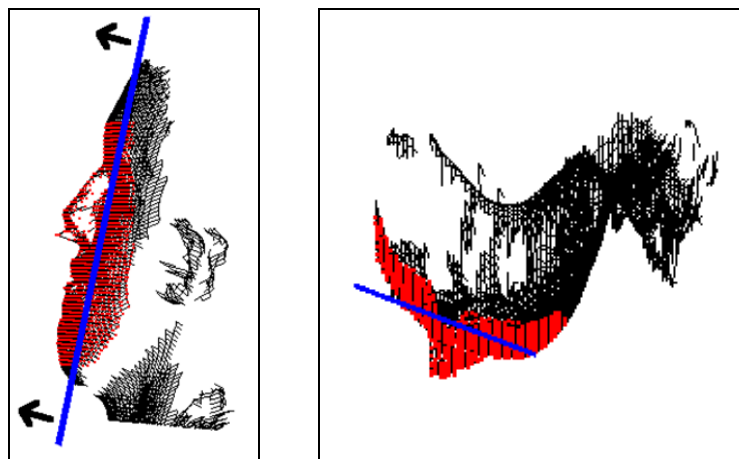


Figura 4.39. Plano de regresión (azul) calculado a partir de los puntos faciales (rojo). A la izquierda, vista de perfil; a la derecha, vista superior.

Tabla 4. 4. Porcentaje correcto de localización de rasgos faciales mediante la técnica de las Spin Images.

Condición de Adquisición	Tasa de normalización incorrecta (%)
Frontal	0
Giro 5° en torno al eje Y	0.95
Giro 25° en torno al eje Y	8
Giro severo en torno al eje Z	1.9
Giro leve en torno al eje Z	0.7
Sonrisa	0
Boca abierta	0
Giro en torno eje X, mirando arriba	3.3
Giro en torno eje X, mirando abajo	2.3
Variación iluminación	0

4.5.- Cálculo del mapa de profundidad óptimo

Una vez que el mallado 3D está perfectamente normalizado, se procede a la creación del mapa de profundidad. Esta representación es muy sencilla, y tiene la ventaja de que permite manipular información 3D como si se tratase de una simple imagen de textura 2D.

Como se ha descrito en el apartado 3.3, el escáner láser proporciona una imagen de rango que no puede considerarse óptima, ya que el rango de niveles de grises es asignado por igual a todo el rango de profundidad. En el caso de la cara, interesa realzar la zona donde se encuentran los rasgos faciales, que en realidad varía en un rango de profundidad muy pequeño. Por esta razón se decidió calcular directamente el mapa de profundidad y probar distintas funciones de ecualización. Además, el hecho de calcular directamente el mapa de profundidad, permite realizar otra serie de mejoras, como introducir una etapa de rellenado de huecos mediante interpolación, y controlar la resolución tanto de la imagen de rango como de los niveles de profundidad considerados. En el siguiente capítulo se estudiarán cómo estos factores (resolución en profundidad y ecualización) afectan a la verificación facial.

El proceso de transformación de los datos del mallado 3D a un espacio bidimensional se realizó en un inicio directamente a partir de los puntos 3D adquiridos. Cada punto era proyectado sobre el plano imagen, y la asignación del nivel de gris se realizaba a partir del valor de profundidad. En principio, con la resolución máxima dada por el escáner, se podría generar de este modo una imagen de rango de unos 200x200 píxeles. Si se quisieran generar imágenes de rango de mayor resolución, el resultado no sería satisfactorio, ya que no se dispondrían de puntos 3D suficientes para obtener el nivel de gris de todos los píxeles de la imagen. En la Figura 4.40 se muestran los mapas de profundidad calculados sólo a partir de los puntos 3D. Como puede observarse, a una resolución de 400x400 píxeles, la nube de puntos 3D no contiene información suficiente.

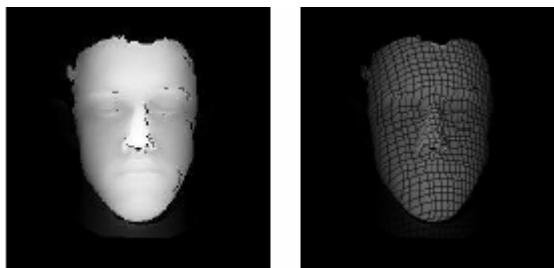


Figura 4.40. Cálculo del mapa de profundidad únicamente a partir de los puntos 3D. A la izquierda, resolución 200x200; a la derecha, 400x400.

Se procedió entonces a generar el mapa de profundidad basándose tanto en los puntos como en las facetas del mallado 3D. El tipo de mallado elegido es de facetas triangulares, ya que la aproximación a la superficie real, a este nivel de resolución, es muy buena. Como puede verse en la Figura 4.41, en el caso de la proyección directa de un punto 3D sobre el plano imagen (punto A), al punto A del mapa de profundidad se le asigna directamente el nivel de gris correspondiente a z_A . En el caso de los píxeles cuya proyección no coincida con un punto del mallado (punto B), es preciso calcular el punto B proyectado sobre la faceta correspondiente, se calculará la ecuación del plano definida por esa faceta, y se calculará el valor de la coordenada z_B dada por la ecuación del plano. A esa profundidad se le asignará el correspondiente nivel de gris de la imagen de rango. En la Figura 4.42 puede observarse cómo el mapa de profundidad de resolución 400x400 píxeles es ahora más suave, con más detalles, y los rasgos faciales más resaltados.

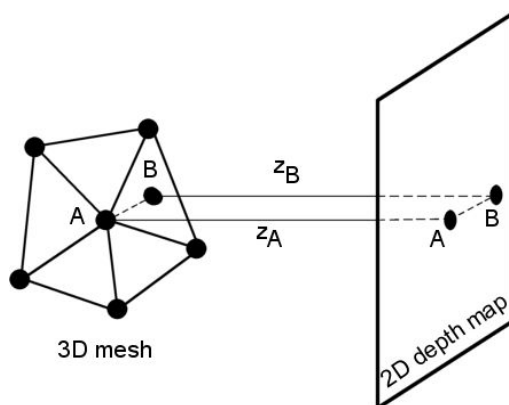


Figura 4.41. Creación del mapa de profundidad a partir de los puntos y las facetas.

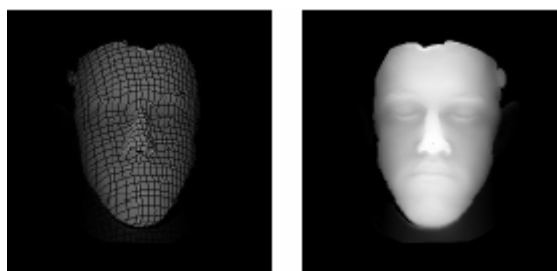


Figura 4.42. Mapa de profundidad de resolución 400x400, generado sólo mediante los puntos 3D (izquierda) y mediante puntos y cálculo de ecuación de facetas (derecha).

En un primer momento, la asignación de un nivel de gris en función de la coordenada de profundidad se realizó de manera lineal. En la Figura 4.43 puede verse el histograma de la imagen de rango así generada. La mayoría de los píxeles se encuentran en el rango entre 170 y 220, es decir, sólo un pequeño rango de intensidad representa la gran mayoría de los puntos de

la cara. Esto hace que, como puede apreciarse en la imagen, los rasgos de la cara están muy poco resaltados. Se decidió entonces probar distintas funciones de ecualización de la imagen que resaltarán más los rasgos faciales, aprovechando todo el rango de niveles de gris para representar las coordenadas de profundidad de los puntos.

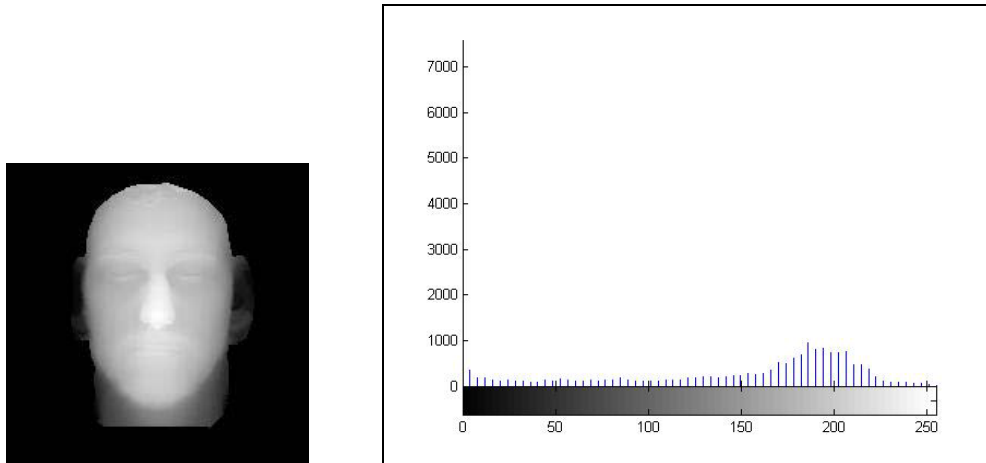


Figura 4.43. Mapa de profundidad generado mediante una relación lineal entre profundidad y nivel de gris. A la derecha el histograma de esta imagen.

Se probaron cuatro ecualizaciones diferentes: lineal o imagen de rango base (mostrada en la Figura 4.43), exponencial, gaussiana y lineal por tramos.

En primer lugar se probó una función de ecualización exponencial. De este modo, se pretendía otorgar un mayor rango de variación de niveles de gris para los puntos más salientes (la nariz y su entorno, donde se encuentran los rasgos faciales). La función de transformación que dado un nivel de intensidad x , genera un nuevo valor $f(x)$, viene dada por:

$$f(x) = A^x + B$$

Siendo A y B parámetros que se ajustan heurísticamente para proporcionar la imagen de mayor calidad. La imagen inicial, la función de transformación utilizada y la imagen ecualizada pueden verse en la Figura 4.44. Se aprecia la mejora y el resaltado de los rasgos, especialmente de la nariz.

La siguiente función de transformación utilizada fue una gaussiana, cuya ecuación viene dada por:

$$f(x) = m \cdot e^{-\frac{(x-m)^2}{2n^2}}$$

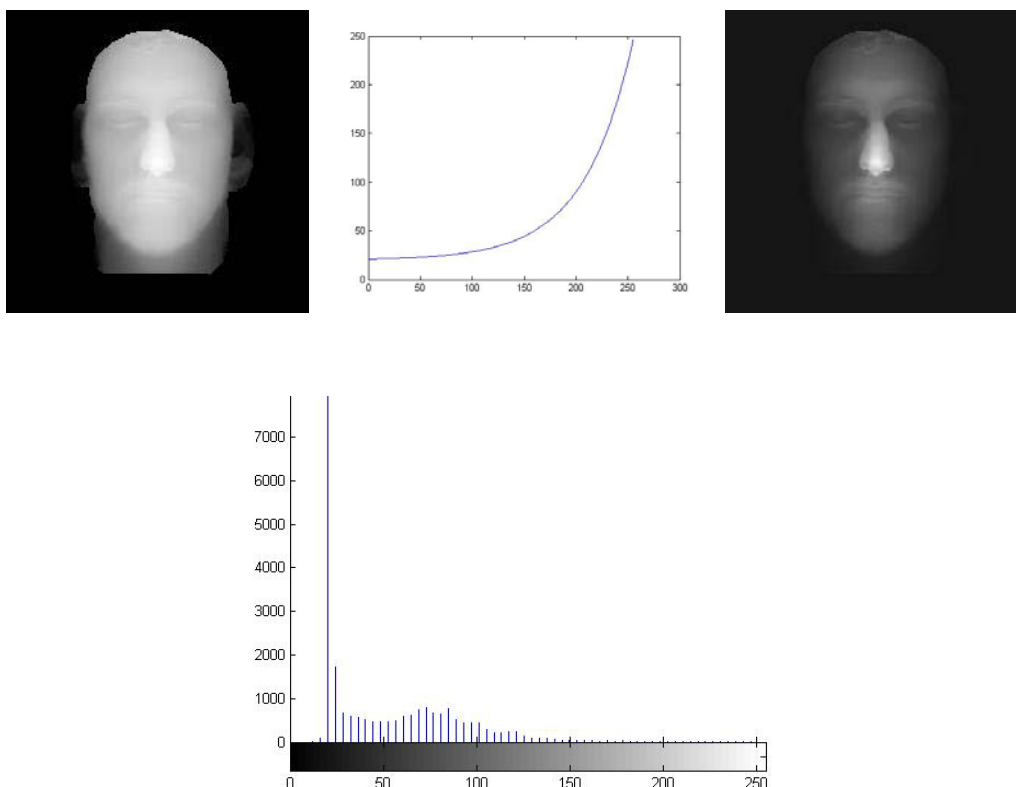


Figura 4.44. Arriba: mapa de profundidad base (izquierda), función de ecualización exponencial utilizada (centro) y la imagen resultante (derecha). Abajo: histograma de la función ecualizada.

El resultado obtenido se muestra en la Figura 4.45. Puede verse cómo en este caso los rasgos están mucho más marcados, resaltándose la forma de los ojos y de la nariz.

Por último, se decidió utilizar una aproximación lineal a la gaussiana, es decir, una función lineal por tramos, donde los parámetros han sido fijados de manera experimental para proporcionar la mejor imagen posible:

$$f(x) = \begin{cases} x < 120 \rightarrow x \cdot 50 / 120 \\ x > 200 \rightarrow 0.63x + 63 \\ 120 < x < 200 \rightarrow 1.7x - 150 \end{cases}$$

En la Figura 4.46 puede verse la función de transformación y el resultado final. Se observa una ligera mejora respecto a la imagen de rango lineal, pero en el caso de la transformación gaussiana los rasgos son más realzados.

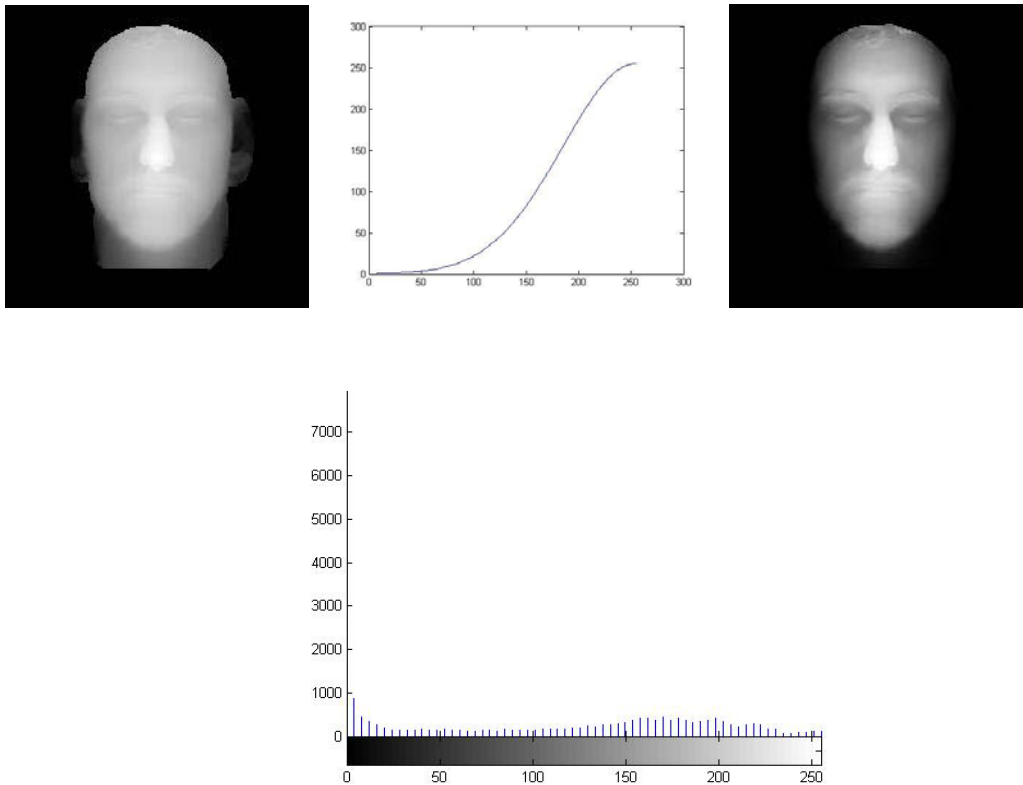


Figura 4.45. En la fila superior, mapa de profundidad base (izquierda), función de ecualización gaussiana utilizada (centro) y la imagen resultante (derecha). Debajo, histogramas de la imagen transformada.

Otro de los parámetros cuya influencia se decidió evaluar es la resolución espacial de la imagen de rango, es decir, número de niveles de gris permitidos para representar la coordenada de profundidad. Para ello se crearon los mapas de profundidad correspondientes a una resolución en z de 250, 100, 50 y 25 niveles de gris. En la Figura 4.47 se representan los cuatro mapas de profundidad correspondientes a la misma cara.

En el siguiente capítulo se medirá la capacidad de reconocimiento facial de cada uno de estos parámetros: función de ecualización y resolución de profundidad.

Finalmente, una vez creado el mapa de profundidad, se procedió a introducir una etapa en la que se corrigieran los agujeros en la imagen debidos a la pérdida de puntos capturados por el escáner láser. Se realizó un rellenado de valores por interpolación en función del valor de los píxeles vecinos. En la Figura 4.48 puede verse el resultado de realizar la interpolación sobre una cara con zonas de datos perdidos.

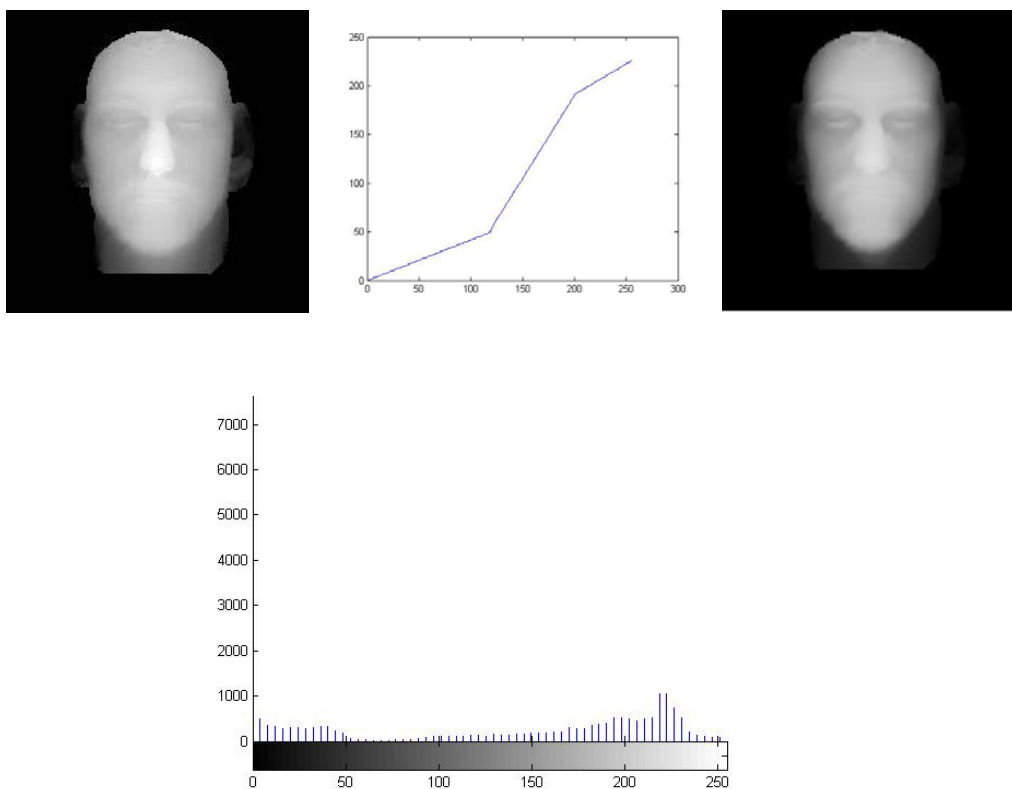


Figura 4.46. Fila superior: mapa de profundidad base (izquierda), función de ecualización lineal por secciones utilizada (centro) y la imagen resultante (derecha). Fila inferior: histograma imagen ecualizada por rectas.

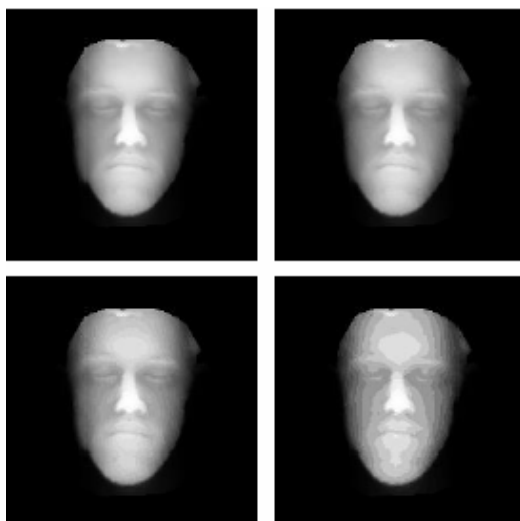


Figura 4.47. De izquierda a derecha, y de arriba a abajo: imágenes de rango con 250, 100, 50 y 25 niveles de gris asociados a la profundidad.

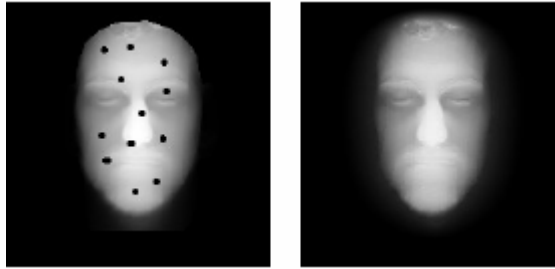


Figura 4.48. Mapa de profundidad con pérdida de puntos (izquierda, simulado), y tras realizar la interpolación en esos puntos (derecha).

A modo de resumen y para que sirva de comparación, se incluyen en la Figura 4.49 ejemplos de la misma imagen de rango con cada una de las ecualizaciones descritas.

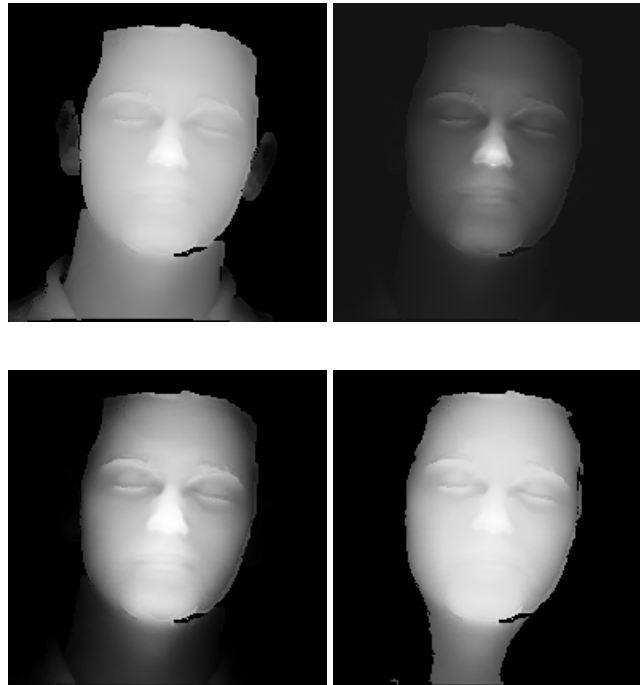


Figura 4.49. Ejemplo de imagen de rango con cada una de las ecualizaciones aplicadas. De izquierda a derecha: lineal, exponencial, gaussiana y lineal por secciones.

Tras el proceso completo de normalización y creación de los datos 2.5D, están disponibles tres tipos de datos faciales: imagen color, imagen de rango y mallado 3D. La verificación facial en función de cada uno de estos tipos de información es explicada en el siguiente capítulo.

Capítulo 5

Verificación facial 2D, 2.5D y 3D.

5.1.- Introducción

En este capítulo se describen las técnicas desarrolladas para la implementación de dos tipos de verificadores faciales: uno diseñado para el tratamiento de imágenes de intensidad, y otro que toma como datos de entrada mallados de puntos tridimensionales. El primero de ellos utiliza, como información para realizar la verificación, el nivel de intensidad de cada píxel de la imagen, por lo que se trata de un sistema con un núcleo o motor 2D. El segundo de ellos se basa en la comparación de superficies 3D mediante el algoritmo de registro de superficies 3D Iterative Closest Point (ICP). Es decir, utiliza como magnitud para realizar la verificación la distancia entre superficies en el espacio, intrínsecamente tridimensional, por lo que se trata de un sistema con un núcleo 3D.

Como se ha explicado en el capítulo 2, existen diferentes modos de representar la información tridimensional. En este trabajo se han utilizado dos diferentes: las imágenes de rango y los mallados triangulares 3D. La primera representación es una imagen donde a cada píxel se le asocia un nivel de gris en función de la coordenada de profundidad del punto en el espacio. Se trata por lo tanto de una imagen 2D, donde se han proyectado los puntos 3D sobre un plano. Como se trata de una representación bidimensional de información tridimensional, se denomina habitualmente imagen 2.5D. Es posible entonces realizar la verificación facial tridimensional a partir de estas imágenes de rango con el mismo sistema verificador 2D, usado

también para procesar las imágenes de textura. La segunda representación es propiamente una representación tridimensional, ya que se tienen en cuenta las tres coordenadas (x, y, z) de cada punto en el espacio.

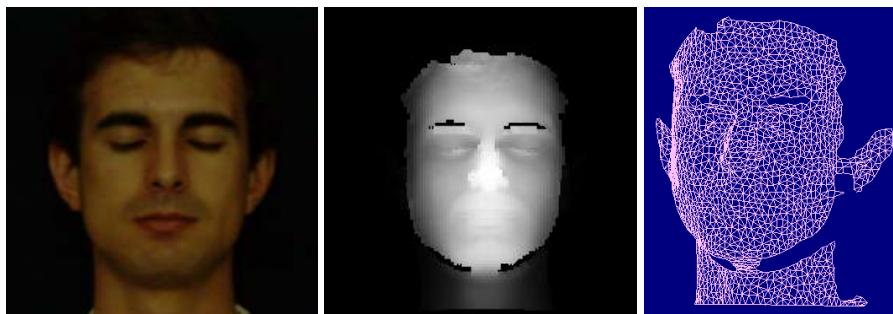


Figura 5.1. Los tres tipos de datos faciales estudiados. De izquierda a derecha: imagen color (Verificador 2D), imagen de rango (Verificador 2.5D) y mallado 3D (Verificador 3D).

Para realizar un estudio en detalle de la capacidad verificadora de cada uno de estos tipos de información (Figura 5.1), utilizando los dos núcleos verificadores creados, se han realizado los siguientes sistemas:

- Verificador facial con núcleo 2D, utilizando como datos las imágenes de textura de la base de datos. Este sistema será denominado **Verificador 2D**.
- Verificación facial con núcleo 2D, utilizando como datos las imágenes de rango. A este sistema híbrido (motor 2D con datos 3D) se le denominará **Verificador 2.5D**.
- Verificación facial con motor 3D, utilizando como información los mallados tridimensionales. Será el denominado como **Verificador 3D**.

De este modo se podrá analizar la verificación facial 3D desde dos puntos de vista: utilizando un motor verificador bidimensional (Verificador 2.5D) y usando un verificador intrínsecamente tridimensional (Verificador 3D).

A continuación se detallan estos sistemas, las pruebas realizadas y los resultados, cada uno de ellos en apartados diferentes.

5.2.- Verificación facial 2D: textura.

5.2.1.- Sistema desarrollado.

El sistema implementado se trata de un sistema de verificación facial 2D basado en características globales [Con03a][Cab04][Ser04]. La información utilizada para realizar la verificación es el nivel de intensidad de cada uno de los píxeles de la imagen. En la Figura 5.2 se muestra un esquema de la arquitectura del sistema. El proceso de verificación facial se realiza en las siguientes etapas:

- **Localización de la cara:** a partir del fondo, y mediante la convolución de la imagen con una plantilla genérica, se realiza la localización de la cara. De este modo se elimina toda la zona de la imagen que no contiene información relevante, evitando el pelo, los hombros, etc. Además, la posición facial de todos los individuos queda normalizada.
- **Extracción de características:** una vez es localizada la cara, se procede a realizar una reducción en la dimensión del espacio de representación de las caras. Se pretende trabajar en un espacio de dimensión menor, pero que contenga la información más relevante para el proceso de verificación. Por ello se utilizó el método de Autocaras de Turk y Pentland [Tur91] [Con03b], basado en un análisis de características principales o PCA. Mediante este método, a partir de un análisis de autovalores y autovectores del conjunto de datos, se realiza un cambio de base del espacio de representación. El espacio final de representación, que llamaremos espacio de características, es mucho más apropiado para distinguir las diferentes caras humanas. De este modo cada cara es representada en el espacio de características como un vector de 150 componentes, que explican más de un 90% de la varianza total del conjunto de datos. Los autovectores obtenidos tienen la misma dimensión que las imágenes iniciales, y por lo tanto pueden ser vistos como una imagen en el espacio inicial: son las denominadas autocaras. En la Figura 5.3 se representan las autocaras correspondientes a los seis primeros autovectores de mayor autovalor de un conjunto de entrenamiento de caras en color (2D).
- **Clasificación:** la medida de la similitud entre las caras es realizada mediante un clasificador de máquinas de vectores soporte SVM [Cor95]. Se trata de un clasificador binario. Se basa en la transformación del espacio de los datos iniciales (donde los datos no son separables) a un espacio de dimensión igual o mayor (donde sí son separables).

La función que realiza esta transformación, kernel, puede ser de diversos tipos. Para minimizar el error empírico cometido en la clasificación, se busca el hiperplano óptimo de separación de las dos clases en el espacio de dimensión mayor.

- **Módulo de decisión:** a partir del valor de salida del clasificador SVM, es necesario tomar una decisión para aceptar o rechazar al sujeto verificado. Se ha de fijar por lo tanto un umbral que será la frontera entre los valores del clasificador que implican aceptación o rechazo. Como parte de esta tesis se ha elaborado un método para calcular de manera automática el umbral óptimo, en función del nivel de seguridad que se le quiere otorgar al sistema.

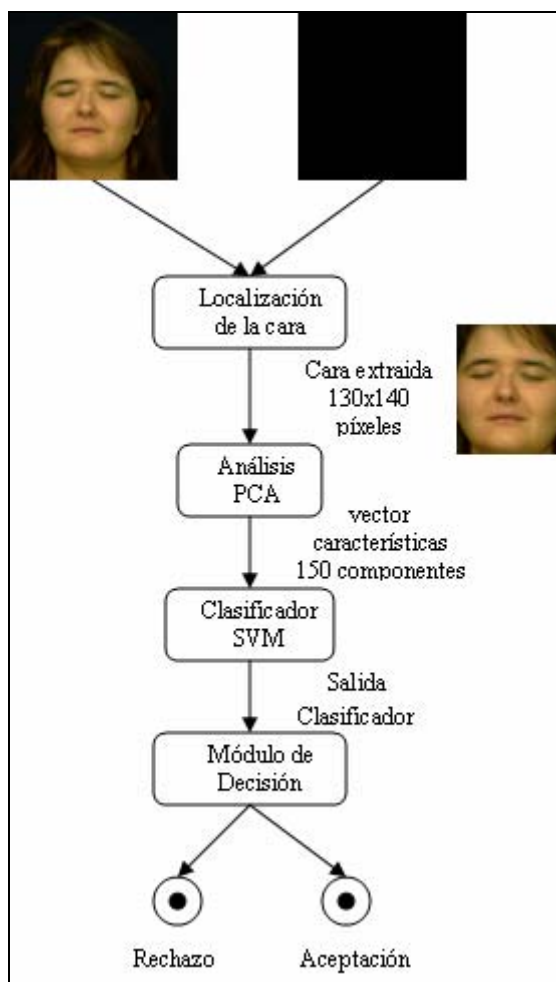


Figura 5.2. Esquema Verificador 2D.

Tanto la técnica PCA como el clasificador SVM requieren de una etapa de entrenamiento, por lo que la base de datos ha sido dividida en dos grupos: entrenamiento y test. Estos conjuntos son siempre disjuntos. A partir del análisis de los datos del conjunto de entrenamiento, se crea la matriz PCA mediante la cual se proyectará cualquier nueva imagen

adquirida sobre el espacio de características. Ese mismo conjunto de entrenamiento será utilizado para que el SVM realice el aprendizaje y genere un modelo por persona. Cualquier imagen nueva de un sujeto que reclame ser una persona, será comparada con ese modelo por el SVM.



Figura 5.3. Seis primeras autocaras de la FRAV3D (color) (de izquierda a derecha)

5.2.2.- Pruebas realizadas y resultados experimentales.

A partir de la base de datos FRAV3D, y tras un detallado estudio, se han elaborado las pruebas realizadas con el Verificador 2D, que pueden verse en la Tabla 5. 1. Éstos son los mismos experimentos con los que se ha probado el Verificador 2.5D, como se indicará en el apartado 5.2. En esta tabla se muestra el número y tipo de imágenes que componen en conjunto de entrenamiento y de test. Las imágenes adquiridas con caras giradas, hacen referencia a los ejes X, Y y Z del escáner láser (ver Figura 3.4). Para recordar cómo influían estos giros en las imágenes adquiridas, en la Figura 5.4 se muestran tres imágenes giradas en cada uno de estos ejes.

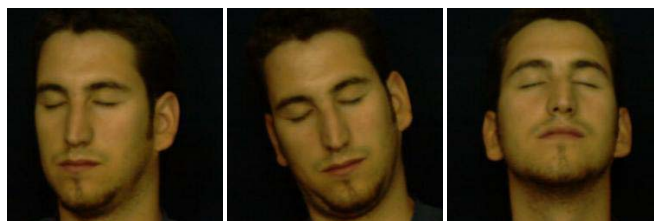


Figura 5.4. Ejemplos de imágenes giradas en los ejes Y (izquierda), Z (centro) y X (derecha).

Las pruebas 1 a 9 fueron diseñadas para medir la capacidad de generalización por parte del verificador cuando los datos utilizados en el entrenamiento son los adquiridos en las condiciones más óptimas. Para ello, únicamente se utilizaron en el entrenamiento imágenes frontales. Los conjuntos de test fueron creados a partir de cada uno de los tipos de imágenes de los que se dispone: frontales, gestos, iluminación y diferentes giros. En las pruebas 10 a 13, se introdujeron en el conjunto de entrenamiento imágenes que no fueran únicamente frontales, para comprobar cómo el verificador es capaz de aprender las variaciones de la cara de un mismo sujeto sometido a diferentes condiciones de adquisición. La prueba 14 se introdujo para ver el

efecto de los distintos gestos (sonrisa y boca abierta) en el resultado. Y la prueba 15 se realizó para ver la influencia del número de imágenes en el conjunto de entrenamiento. Ésta última se realizó sólo con imágenes frontales.

El método seguido para realizar cada una de las pruebas es el método de validación cruzada. Cada una de las imágenes del conjunto de test de cada individuo es comparada con todos los modelos del resto de personas de la base de datos, obteniendo un resultado parcial. Calculando la media de todos los resultados parciales de cada individuo, se obtiene el resultado global mostrado como resultado final.

Tabla 5. 1. Pruebas realizadas en el Verificador 2D y 2.5D. Número y tipo de imágenes que forman en cada caso el conjunto de entrenamiento y de test.

PRUEBA	Conjunto entrenamiento	Conjunto de test
1	3 frontal	1 frente
2	4 frontal	1 gestos (sonrisa)
3	4 frontal	1 gestos (boca abierta)
4	4 frontal	2 iluminación
5	4 frontal	2 giro Y 5°
6	4 frontal	1 giro Z (leve)
7	4 frontal	2 giro X
8	4 frontal	2 giro Y 25°
9	4 frontal	1 giro Z (severo)
10	4 frontal 2 iluminación	2 frontal
11	3 frontal 1 Giro Y 5°	1 frontal 1 giro Y 5°
12	3 frontal 1 Giro Y 5° 1 iluminación	1 frontal 1 giro Y 5° 1 iluminación
13	3 frontal 1 Giro Y 5° 1 iluminación	1 frontal 1 giro Y 5° 1 iluminación 1 gestos (sonrisa)
14	4 frontal	2 gestos
15	2 frontal	2 frontal

Debido a que el verificador se basa directamente en el valor de intensidad de cada píxel, se decidió estudiar la influencia del tamaño de las imagen sobre el resultado de verificación final. Para ello, se realizaron cada una de las quince pruebas descritas, con dos tamaños de imágenes distintos: 200x200 y 400x400 píxeles.

Los resultados experimentales van a ser mostrados como es habitual en la literatura actual (ver apartado 2.3), en forma de curvas ROC y del valor del parámetro “Equal Error Rate” (EER). Como se ha explicado, es el valor en el que los dos tipos de errores del sistema (Falsos positivos y Falsos Negativos) se igualan. Creemos que es interesante observar la evolución del sistema en una curva ROC, no únicamente a partir del error EER, ya que la información mostrada es más completa. En la Figura 5.5 se presentan las curvas ROC correspondientes a las pruebas 1 (condiciones frontales), 4 (iluminación) y 5 (giros 5° en Y). Como puede verse, en el caso de las imágenes con variación en iluminación y con giros, las imágenes de tamaño 200x200 píxeles obtienen mejores resultados. En el caso de las imágenes frontales, son las imágenes mayores, de 400x400 píxeles las que presentan un porcentaje de error en la verificación menor. En el Anexo C se presentan los resultados completos para todas las pruebas realizadas.

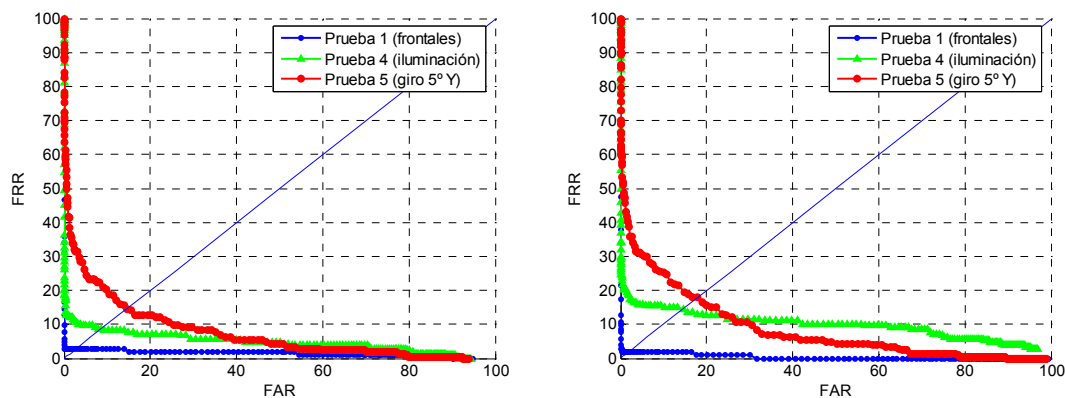


Figura 5.5. Curvas ROC de las imágenes en color, para las pruebas 1, 4 y 5. A la izquierda, imágenes de tamaño 200x200 píxeles. A la derecha, de 400x400 píxeles.

En la Tabla 5.2 se presenta el valor del EER obtenido al probar el sistema en cada una de los casos, y con cada uno de los dos tamaños de imagen considerados.

En cuanto a la discusión de los resultados, podemos observar diferentes comportamientos respecto al tamaño de la imagen. Si los datos son de calidad, es mejor tener en cuenta el tamaño grande de 400x400 píxeles. Esto puede verse cuando el conjunto de entrenamiento y el de test son imágenes frontales, o son imágenes con gestos o con un giro leve en X (pruebas 1,3,7,14,15). En el caso de imágenes de peor calidad, el resultado obtenido por las imágenes de menor tamaño es mejor (o igual). Éste es el caso del resto de pruebas.

En el caso de introducir las imágenes con distinta iluminación en el conjunto de entrenamiento (prueba 10), el error disminuye, ya que el clasificador es capaz de aprender las

distintas condiciones, igualando el mejor de los resultados en el caso de imágenes únicamente frontales. En esta prueba, el resultado no depende del tamaño de las imágenes.

Tabla 5.2. EER obtenido en cada una de las pruebas, para los dos tamaños de imagen considerados: 200x200 y 400x400 píxeles. Se señala en negrita el mejor resultado obtenido en cada prueba.

PRUEBA	ENTREN.	TEST	COLOR 400x400	COLOR 200x200
1	3 frontal	1 frontal	1.94	2.91
2	4 frontal	1 gestos (sonrisa)	6.80	5.13
3	4 frontal	1 gestos (boca abierta)	10.68	12.62
4	4 frontal	2 iluminación	14.55	8.70
5	4 frontal	2 giro 5° Y	17.90	14.60
6	4 frontal	1 giro leve Z	36.42	33.93
7	4 frontal	2 giro X	12.62	13.34
8	4 frontal	2 giro 25° Y	29.13	27.02
9	4 frontal	1 giro severo Z	43.01	41.14
10	2 frontal 2 iluminación	2 frontal	1.94	1.94
11	3 frontal 1 giro 5° Y	1 frontal 1 giro 5° Y	4.85	4.85
12	3 frontal 1 giro 5° Y 1 iluminación	1 frontal 1 giro 5° Y 1 iluminación	5.82	4.17
13	3 frontal 1 giro 5° Y 1 iluminación	1 frontal 1 giro 5° Y 1 iluminación 1 sonrisa	5.82	4.09
14	4 frontal	2 gestos	8.90	9.15
15	2 frontal	2 frontal	1.46	1.94

Si nos centramos en las pruebas 1 y 15, donde se ha mantenido el mismo tipo de imagen (frontal), pero se ha variado el número de imágenes del conjunto de entrenamiento y test, podemos realizar los siguientes comentarios. En el caso de más imágenes en el conjunto de entrenamiento (prueba 1), los resultados obtenidos para ambos tamaños de imagen difieren en torno a un 1%. En el caso de la prueba 15, donde sólo se utilizan dos imágenes en el

entrenamiento, los resultados son mucho más similares, sólo un 0.5% de diferencia. Pocos ejemplos en el conjunto de entrenamiento hace menos relevante el tamaño de las imágenes.

Podemos concluir que cuando los datos han sido adquiridos en buenas condiciones, sin errores, cuanto más información podamos incluir en la imagen los resultados serán mejores, pero si han sido adquiridos en peores condiciones, el hecho de considerar demasiado detalle puede empeorar los resultados.

Respecto a la influencia de las condiciones de adquisición, podemos observar diferentes hechos. Respecto a los gestos, la boca abierta obtiene mucho peores resultados que la sonrisa, ya que como puede verse en la prueba 2 (sonrisa el error está en torno al 6.8%-5.1%) y en la prueba 3 en torno al 12.62%-10.68%). En el caso de que introduzcamos en el conjunto de test los dos gestos a la vez (prueba 14), el porcentaje ha empeorado respecto a la sonrisa.

La inclusión de imágenes giradas en el conjunto de test obviamente empeora muchísimo los resultados, ya que se trata de imágenes en color que no pueden ser normalizadas en el espacio. De los tres tipos de giro, influyen más los resultados de los giros en Y y Z. El giro en X empeora menos el resultado. Un giro en X consiste en subir o bajar la cabeza, parece que en ese caso el aspecto de la cara es afectado en menor medida, ya que sigue apareciendo toda la cara (no como en los giros en Y, donde se ven perfiles y no la cara completa) o los giros en Z (donde la situación de los ojos y la nariz ya no es la misma que en las frontales). Como se espera, cuanto menor es el grado de giro, mejores son los resultados. Entre Y y Z, es peor el resultado en Z, mucho peor que en Y. En el caso de las pruebas donde se introducen distintos datos en el entrenamiento, en las pruebas 11, 12 y 13, vemos que el clasificador es capaz de aprender, pero el hecho de que aparezcan los giros en Y hace que el porcentaje de error nunca disminuya menos del 4%.

A partir de estos resultados se decidió que el tamaño óptimo, considerando el tiempo de computación y los resultados obtenidos, era el de una imagen de 200x200 píxeles. El porcentaje de verificación correcto es semejante en general a las imágenes de 400x400 píxeles y el tiempo de procesado es menor.

5.3.- Verificación facial 2.5D: Imagen de rango.

En este caso se ha utilizado el mismo sistema verificador presentado en el apartado anterior, pero introduciendo las imágenes de rango una vez normalizadas [Mat05] (ver Figura

5.1). El número de componentes seleccionadas para formar los vectores en el espacio de características tras el cálculo PCA es también de 150. En la Figura 5.6 se muestran las seis primeras autocaras obtenidas durante el proceso de análisis PCA.



Figura 5.6. Seis primeras autocaras de la FRAV3D (imágenes de rango) (de izquierda a derecha).

Durante el proceso de creación de las imágenes de rango, se han tomado una serie de decisiones cuya influencia sobre el resultado de verificación será estudiado en este punto:

- la influencia de la función de ecualización utilizada en la creación de la imagen de rango.
- la influencia de la normalización.
- la influencia del nivel de resolución en profundidad de la imagen de rango.
- la influencia del tamaño de la imagen de rango.

Todos estos aspectos serán estudiados en los siguientes apartados.

5.3.1.- Influencia de la ecualización.

Como se ha explicado en el Capítulo 4, durante la construcción del mapa de profundidad, se ha de decidir qué nivel de gris se le asocia a cada punto en función de su coordenada de profundidad z . Dependiendo de la elección del tipo de función que realice esta transformación, la imagen de rango final será diferente. En este apartado se van a presentar una serie de resultados para estudiar cómo influye la elección de esta función sobre el resultado final.

Se han creado imágenes de rango con cuatro funciones de ecualización diferentes: lineal, lineal por tramos, exponencial y gaussiana. El tamaño de las imágenes de rango considerado es de 200x200 píxeles.

En una primera fase del estudio, se realizó un experimento en el que se realizaron las trece primeras pruebas mostradas en la Tabla 5. 1. De la base de datos FRAV3D se eligió un

subconjunto de 52 personas, que es con el que se realizaron estas pruebas. La fase de normalización de los resultados mostrados en este estudio previo no es la final (no se aplicó el método global, y la normalización mediante Spin Images no se realizó teniendo en cuenta rectas de regresión), por lo que los resultados pueden ser ligeramente peores a los que se mostrarán posteriormente. En la Tabla 5.3 se muestran los resultados obtenidos.

Tabla 5.3. Resultados preliminares en el estudio previo de la influencia de la ecualización en la imagen de rango sobre el porcentaje de verificación. Se presenta el EER obtenido en cada una de las pruebas, para las cuatro funciones de ecualización consideradas: exponencial (EXP), gaussiana (GSS), lineal (LIN) y lineal por secciones (REC). Se señalan en negrita los dos mejores resultados obtenidos en cada prueba.

PRUEBA	ENTREN.	TEST	EXP	GSS	LIN	REC
1	3 frontal	1 frontal	1,5	2,95	5,88	4,17
2	4 frontal	1 gestos (sonrisa)	1,99	4,5	5,88	2,38
3	4 frontal	1 gestos (boca abierta)	18,2	14,4	25,5	23,5
4	4 frontal	2 iluminación	1,96	2,06	4,32	3,92
5	4 frontal	2 giro 5° Y	1,03	6,07	15,9	14,2
6	4 frontal	1 giro leve Z	7,84	14	21,6	17,6
7	4 frontal	2 giro X	17	24,1	23	24,9
8	4 frontal	2 giro 25° Y	7,84	13,2	25,6	21,6
9	4 frontal	1 giro severo Z	9,8	10,2	16	19,2
10	2 frontal 2 iluminación	2 frontal	0,98	2,04	4	3
11	3 frontal 1 giro 5° Y	1 frontal 1 giro 5° Y	1,04	2,87	7,22	7,84
12	3 frontal 1 giro 5° Y 1 iluminación	1 frontal 1 giro 5° Y 1 iluminación	0,6	2,61	5,67	5,8
13	3 frontal 1 giro 5° Y 1 iluminación	1 frontal 1 giro 5° Y 1 iluminación 1 sonrisa	0,71	3,02	5,43	5,39

Los resultados obtenidos en este análisis previo indicaron que las dos ecualizaciones más efectivas eran la exponencial y la gaussiana. Como estos resultados habían sido obtenidos con un subconjunto de la base de datos FRAV3D, y en un estado de la normalización que no era el final, se decidió realizar un estudio posterior en que se analizaran los efectos de la ecualización exponencial y gaussiana, sobre la base de datos completa, realizando las quince

pruebas establecidas y realizada la normalización final mostrada en el Capítulo 2. Este estudio se realizó teniendo en cuenta dos tamaños de imágenes de rango: 200x200 píxeles y 400x400 píxeles. En este apartado se muestran únicamente los resultados obtenidos con las imágenes de 200x200 píxeles. En el Anexo C se incluyen los resultados completos para ambos tamaños.

En la Figura 5.7 se muestran las curvas ROC de cada una de las dos ecualizaciones estudiadas. Como puede verse, excepto en el caso de la prueba 4 (iluminación), la ecualización exponencial ofrece un error menor que la gaussiana. Especialmente en el caso de la prueba 3 (giro en Y) la diferencia es más significativa. En este apartado mostramos únicamente las curvas ROC de las pruebas 1 (frontales), 4 (iluminación) y 5 (giro de 5° en el eje Y). En el Anexo C se presentan las curvas ROC de cada una de las pruebas realizadas para la ecualización exponencial y gaussiana.

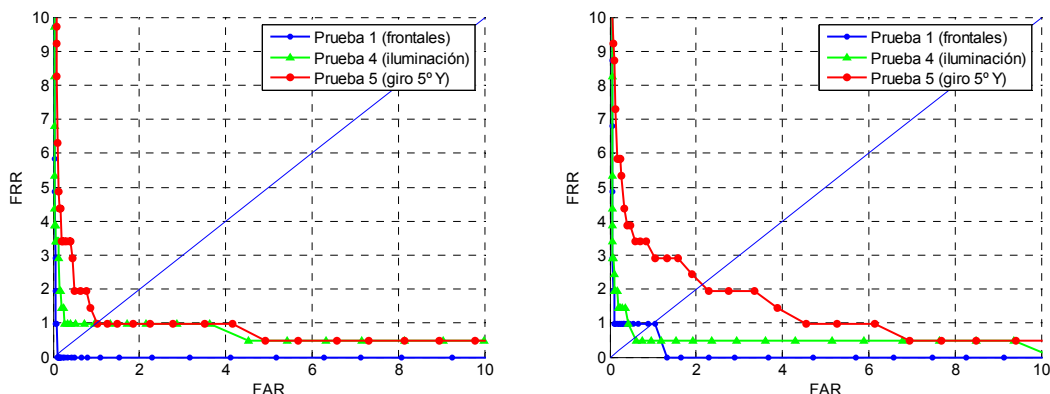


Figura 5.7. Curvas ROC de las imágenes de rango (200x200 píxeles) para las pruebas 1, 4 y 5. A la izquierda, imágenes creadas con una función de ecualización exponencial, y a la derecha gaussiana.

En la Tabla 5.4. se muestran los resultados obtenidos en cada una de las quince pruebas, para las dos ecualizaciones consideradas: exponencial y gaussiana. A modo de comparación de los resultados, para tener una visión más rápida de los resultados obtenidos, se presentan en la Figura 5.8 el diagrama de barras (para los resultados de la ecualización exponencial y la gaussiana) del EER obtenido en cada una de las quince pruebas.

A la vista de los resultados, podemos realizar las siguientes discusiones. En diez de las quince pruebas el resultado obtenido en el caso de la ecualización exponencial es mejor. Especialmente en el caso de las imágenes frontales la diferencia es mucho más notable (pruebas 1 y 15)

En el caso de gestos e iluminación (pruebas 2,3,4,14) la ecualización gaussiana obtiene mejores resultados, ya que en este tipo de imágenes se resalta menos las zonas en torno a la nariz, que son las que se ven más transformadas. El caso de la iluminación se debe a que los

puntos adquiridos por el escáner son menores, existen más huecos, y por lo tanto la exponencial acusa más estos errores en la adquisición de puntos.

Tabla 5.4. Resultados obtenidos en el estudio final de la influencia de la ecualización en la imagen de rango sobre el porcentaje de verificación. Se presenta el EER obtenido en cada una de las pruebas, para las dos funciones de ecualización que mejor resultados han mostrado: exponencial y gaussiana. Se señalan en negrita el mejor resultado obtenido en cada prueba.

PRUEBA	ENTREN.	TEST	EXP 200x200	GSS 200x200
1	3 frontal	1 frontal	0.093	0.97
2	4 frontal	1 gestos (sonrisa)	4.64	4.28
3	4 frontal	1 gestos (boca abierta)	12.62	10.23
4	4 frontal	2 iluminación	0.97	0.57
5	4 frontal	2 giro 5° Y	1.01	2.14
6	4 frontal	1 giro leve Z	2.19	1.94
7	4 frontal	2 giro X	1.94	4.78
8	4 frontal	2 giro 25° Y	4.85	6.32
9	4 frontal	1 giro severo Z	3.71	5.58
10	2 frontal 2 iluminación	2 frontal	0.48	0.97
11	3 frontal 1 giro 5° Y	1 frontal 1 giro 5° Y	0.48	0.83
12	3 frontal 1 giro 5° Y 1 iluminación	1 frontal 1 giro 5° Y 1 iluminación	0.65	0.97
13	3 frontal 1 giro 5° Y 1 iluminación	1 frontal 1 giro 5° Y 1 iluminación 1 sonrisa	1.66	1.68
14	4 frontal	2 gestos	10.28	6.75
15	2 frontal	2 frontal	0.56	1.94

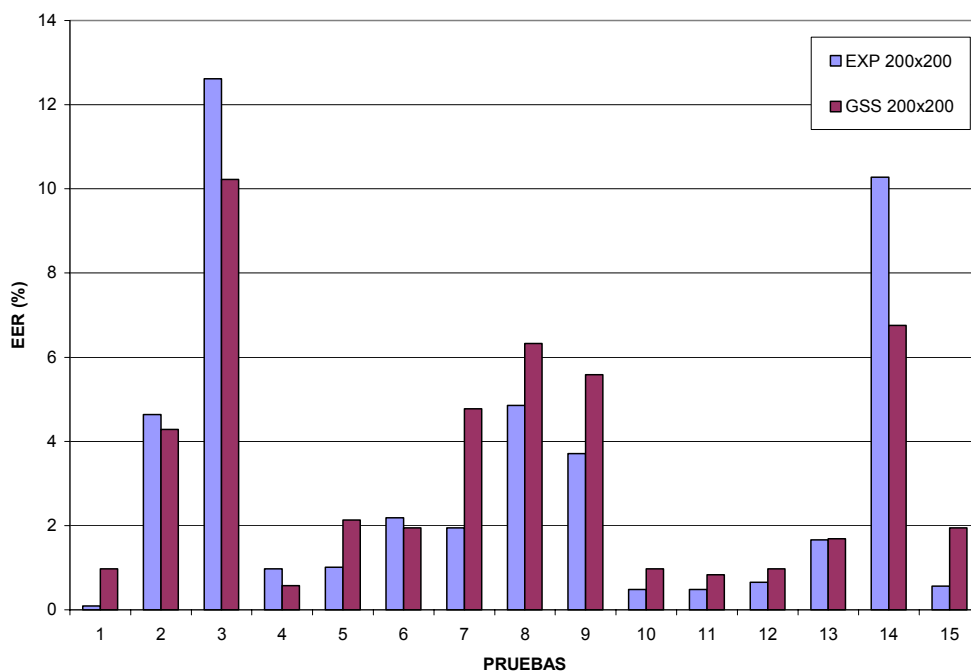


Figura 5.8. Estudio de la influencia de la función de ecualización en la creación de la imagen de rango. Se muestra el EER (%) obtenido en cada una de las quince pruebas, para las ecualizaciones exponencial y gaussiana. El tamaño de las imágenes de rango considerado es de 200x200 píxeles.

En el caso de los giros, excepto en un caso, siempre se obtienen mejores resultados con la función de ecualización exponencial. Ya que la normalización realizada es muy precisa, hace que efectivamente la ecualización exponencial, que resalta un área muy concreta de la nariz y los ojos (ver Figura 4.49) sea la más apropiada.

Podemos concluir finalmente que en general, la ecualización exponencial es la más adecuada para realizar la tarea de verificación.

5.3.2.- Influencia de la normalización.

Las imágenes de rango han sido normalizadas según se presentó en el Capítulo 4. Obviamente, esta normalización de la posición de las caras mejorará la verificación, pero es preciso estudiarlo detalladamente. Para ello, se realizaron distintas verificaciones con las imágenes de rango antes y después de ser normalizadas.

En cuanto al tipo de imágenes y los conjuntos de test y entrenamiento utilizados, las pruebas realizadas son las mismas que se realizaron en el Verificador 2D, y que se muestran en la Tabla 5. 1. Las pruebas se han realizado con dos tamaños de imagen: 200x200 píxeles y 400x400 píxeles, y con dos ecualizaciones: exponencial y gaussiana. En este apartado se

muestran los resultados obtenidos con las imágenes de 200x200 píxeles y ecualización exponencial. En el Anexo C se muestran los resultados completos.

Los resultados van a ser mostrados como en los apartados anteriores: como curvas ROC, para ver la evolución del sistema en función del umbral de aceptación, y en forma de valores del EER. En la Figura 5.9 se muestran las curvas ROC obtenidas en las pruebas 1, 4 y 5, con imágenes normalizadas y sin normalizar. Las imágenes normalizadas se han presentado en escala de 0 a 10, y las normalizadas de 0 a 100, para poder observar mejor los resultados. Es evidente la mejora en los resultados, especialmente en la prueba 3 (giro). Las curvas ROC de las pruebas completas se muestran en el Anexo C.

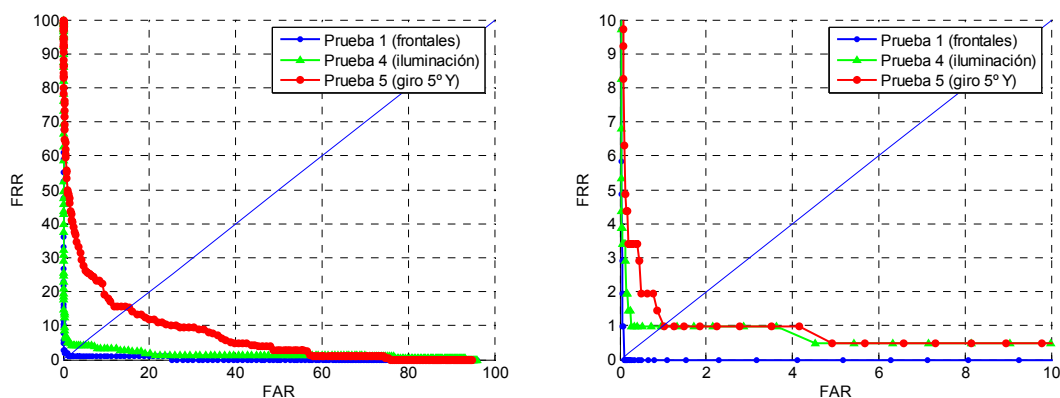


Figura 5.9. Curvas ROC de las imágenes de rango (200x200 píxeles, ecualización exponencial) para las pruebas 1, 4 y 5. A la izquierda, imágenes sin normalizar, a la derecha normalizadas.

En la Tabla 5.5 se muestran los valores del EER obtenidos en las quince pruebas por las imágenes sin normalizar y una vez normalizadas. En la Figura 5.10 se presentan en un diagrama de barras los EER obtenidos en cada una de las pruebas, para imágenes sin normalizar y normalizadas.

Analizando estos resultados, parece que el introducir una etapa previa de normalización produce una gran mejora en el resultado del sistema, sobre todo en las pruebas donde se han utilizado imágenes giradas (5,6,7,8,9,11,12 y 13). Las pruebas donde menor mejora se produce son en la 2,3 y en la 14. Son aquellas donde aparecen los gestos.

Es importante incidir en la enorme mejora incluso en las imágenes frontales (1,15). A pesar de que durante la adquisición de las imágenes se indicó a los sujetos que miraran frontalmente, eso no es fácil de conseguir. La normalización automática sí lo hace. En la iluminación, también hay mejora (prueba 4), por la misma razón que en las frontales.

Tabla 5.5. Resultados obtenidos en el estudio de la influencia de la normalización en la imagen de rango sobre el porcentaje de verificación. Se presenta el EER obtenido en cada una de las pruebas, en el caso de imágenes normalizadas y sin normalizar. La equalización de las imágenes de rango es exponencial y el tamaño de 200x200 píxeles.

PRUEBA	ENTREN.	TEST	NO NORMALIZADAS	NORMALIZADAS
1	3 frontal	1 frontal	1.21	0.09
2	4 frontal	1 gestos (sonrisa)	6.91	4.64
3	4 frontal	1 gestos (boca abierta)	20.71	12.62
4	4 frontal	2 iluminación	4.29	0.97
5	4 frontal	2 giro 5° Y	15.24	1.01
6	4 frontal	1 giro leve Z	33.33	2.19
7	4 frontal	2 giro X	35.71	1.94
8	4 frontal	2 giro 25° Y	27.65	4.85
9	4 frontal	1 giro severo Z	39.96	3.71
10	2 frontal 2 iluminación	2 frontal	1.70	0.48
11	3 frontal 1 giro 5° Y	1 frontal 1 giro 5° Y	5.37	0.48
12	3 frontal 1 giro 5° Y 1 iluminación	1 frontal 1 giro 5° Y 1 iluminación	4.48	0.64
13	3 frontal 1 giro 5° Y 1 iluminación	1 frontal 1 giro 5° Y 1 iluminación 1 sonrisa	5.69	1.65
14	4 frontal	2 gestos	14.59	10.28
15	2 frontal	2 frontal	4.29	0.56

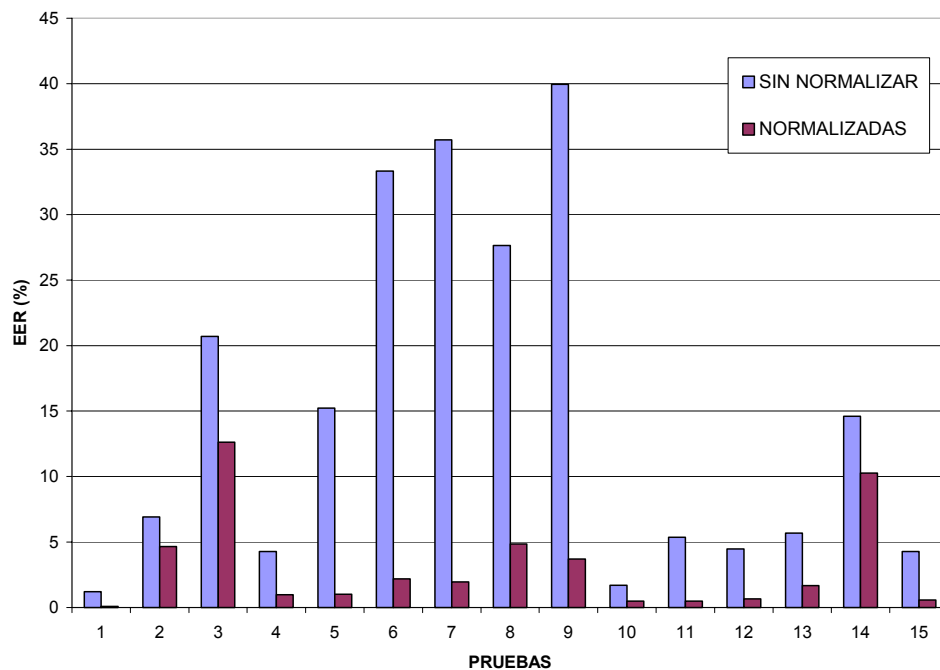


Figura 5.10. Estudio de la influencia de la normalización de las imágenes de rango. Se muestra el EER (%) obtenido en cada una de las quince pruebas, para las imágenes sin normalizar y normalizadas. El tamaño de las imágenes de rango considerado es de 200x200 píxeles y la función de ecualización utilizada es exponencial.

5.3.3.- Influencia del tamaño de la imagen de rango.

En este apartado se va a estudiar la influencia del tamaño de la imagen de rango. En el transcurso de estas pruebas, se crearon dos tamaños diferentes de imágenes de rango: 200x200 píxeles y 400x400 píxeles. Es importante destacar que esta condición de tamaño se aplicó en el momento de creación del mapa de profundidad, directamente sobre los datos 3D. No se realizó una simple variación de tamaño en una imagen ya creada. Se utilizaron dos funciones de ecualización diferentes en este proceso: exponencial y gaussiana. Como se ha comprobado en el apartado 5.2.1. la ecualización exponencial ofrece una mejor tasa de verificación, por lo tanto en este apartado se mostraran únicamente los resultados relativos a la ecualización exponencial. En el Anexo C se presentan los resultados completos.

En la Figura 5.11 se muestran las curvas ROC para cada tamaño de imagen de rango, y ecualización exponencial, para las pruebas 1, 2 y 4. Como puede verse, excepto en el caso de la prueba de iluminación, el error del sistema es menor en el caso de las imágenes de tamaño 200x200 píxeles.

Tabla 5.6. Resultados obtenidos en el estudio de la influencia del tamaño de la imagen de rango sobre el porcentaje de verificación. Se presenta el EER obtenido en cada una de las pruebas, en el caso de imágenes de dos tamaños: 200x200 píxeles y 400x400 píxeles, y con ecualización exponencial.

PRUEBA	TRAIN	TEST	EXP 400x400	EXP 200x200
1	3 frontal	1 frontal	0,98	0,09
2	4 frontal	1 gestos (sonrisa)	5,82	4,64
3	4 frontal	1 gestos (boca abierta)	15,53	12,62
4	4 frontal	2 iluminación	0,58	0,97
5	4 frontal	2 giro 5° Y	2,38	1,01
6	4 frontal	1 giro leve Z	3,63	2,19
7	4 frontal	2 giro X	2,36	1,94
8	4 frontal	2 giro 25° Y	5,22	4,85
9	4 frontal	1 giro severo Z	3,32	3,71
10	2 frontal 2 iluminación	2 frontal	1,46	0,48
11	3 frontal 1 giro 5° Y	1 frontal 1 giro 5° Y	1,46	0,48
12	3 frontal 1 giro 5° Y 1 iluminación	1 frontal 1 giro 5° Y 1 iluminación	0,97	0,65
13	3 frontal 1 giro 5° Y 1 iluminación	1 frontal 1 giro 5° Y 1 iluminación 1 sonrisa	2,18	1,66
14	4 frontal	2 gestos	12,04	10,28
15	2 frontal	2 frontal	1,46	0,56

En la Tabla 5.6 se muestran los resultados completos obtenidos para las quince pruebas, en cada una de las cuatro condiciones de creación del mapa de profundidad contempladas. Para una mejor observación de los resultados de manera global, en la Figura 5.12 se muestran los diagramas de barras del EER obtenido en cada prueba, para las condiciones contempladas.

En todas las pruebas estudiadas, salvo en el caso de la variación en la iluminación (prueba 4) y giro severo en Z (prueba 9), el error obtenido por las imágenes de rango de tamaño 200x200 píxeles es menor. Este hecho es observable en el resto de casos, especialmente en el caso de las imágenes frontales (prueba 1).

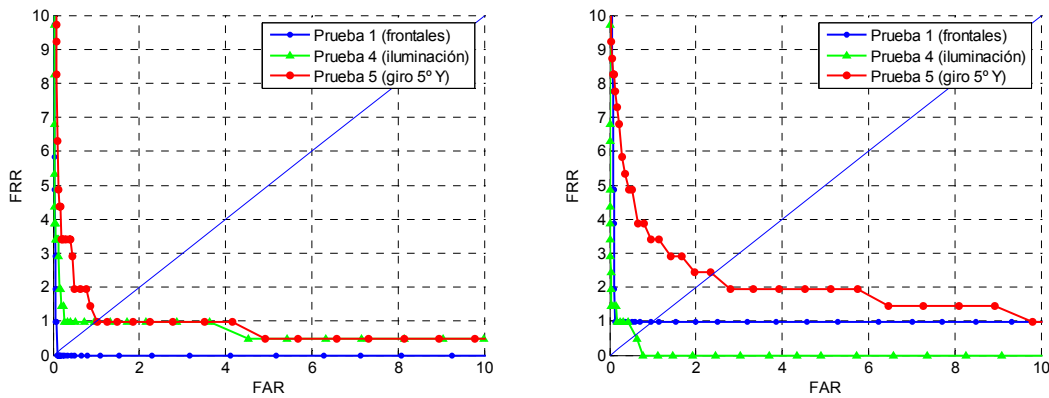


Figura 5.11. Curvas ROC de las imágenes de rango (ecualización exponencial) para las pruebas 1, 4 y 5. A la izquierda, imágenes de 200x200 píxeles, a la derecha de 400x400 píxeles.

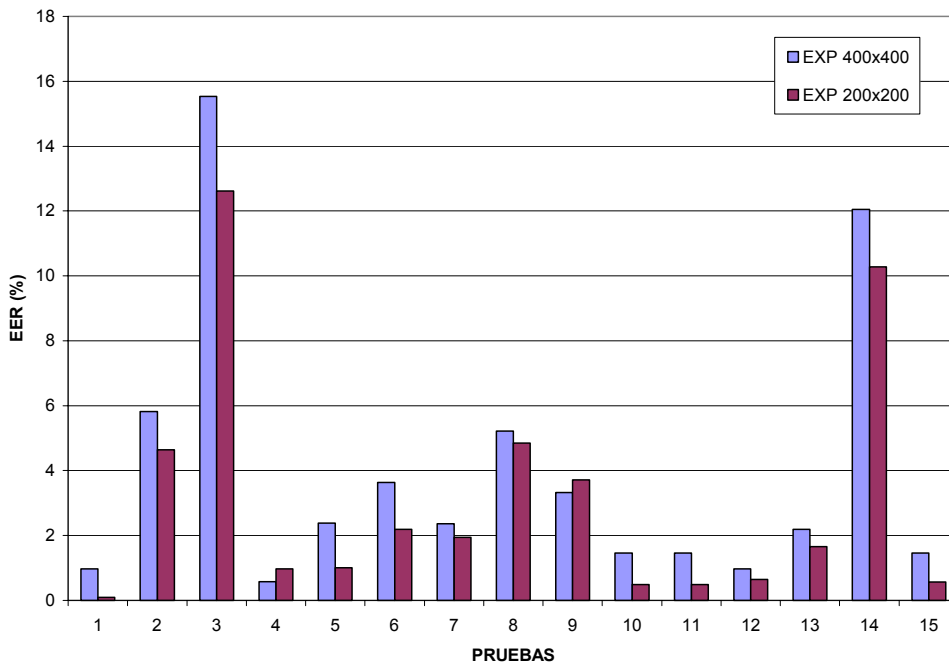


Figura 5.12. Estudio de la influencia del tamaño de las imágenes de rango. Se muestra el EER (%) obtenido en cada una de las quince pruebas, para las imágenes de 200x200 y 400x400 píxeles. La función de ecualización utilizada es exponencial.

5.3.4.- Influencia de la resolución en profundidad de la imagen de rango.

Como última condición, se decidió estudiar la influencia de la resolución en profundidad de la imagen de rango (o lo que es lo mismo, en niveles de gris), sobre el porcentaje final de verificación correcta. Para ello, se construyeron las imágenes de rango teniendo en cuenta tres resoluciones: 25, 100 y 250 niveles de gris. Se utilizó el mismo conjunto

de la base de datos FRAV3D usado en el estudio previo del apartado 5.3.1, es decir, 52 personas. Las pruebas realizadas fueron las trece primeras indicadas en la Tabla 5. 1. En la Tabla 5.7 se presentan los resultados obtenidos en estas pruebas.

Tabla 5.7. Resultados obtenidos en el estudio de la influencia de la resolución en niveles de gris de la imagen de rango sobre el porcentaje de verificación. Se presenta el EER(%) obtenido en cada una de las pruebas, para los tres niveles de resolución contemplados: 25, 200 y 250 niveles de gris. Se señalan en negrita los dos mejores resultados obtenidos en cada prueba.

PRUEBA	ENTREN.	TEST	25 niveles	100 niveles	250 niveles
1	3 frontal	1 frontal	0.80	0.51	0.43
2	4 frontal	1 gestos (sonrisa)	3.39	4.25	3.43
3	4 frontal	1 gestos (boca abierta)	16.64	11.80	11.97
4	4 frontal	2 iluminación	1.62	2.65	2.34
5	4 frontal	2 giro 5° Y	3.10	3.62	4.81
6	4 frontal	1 giro leve Z	5.87	6.45	7
7	4 frontal	2 giro X	7.84	7.73	8.50
8	4 frontal	2 giro 25° Y	12.31	12.38	10.85
9	4 frontal	1 giro severo Z	9.57	11.21	12
10	2 frontal 2 iluminación	2 frontal	0.53	0.53	1
11	3 frontal 1 giro 5° Y	1 frontal 1 giro 5° Y	2.12	2.12	1.5
12	3 frontal 1 giro 5° Y 1 iluminación	1 frontal 1 giro 5° Y 1 iluminación	1.72	1.70	1.56
13	3 frontal 1 giro 5° Y 1 iluminación	1 frontal 1 giro 5° Y 1 iluminación 1 sonrisa	2.27	2.23	2.32

Como puede verse, los resultados obtenidos no permiten concluir que una resolución en profundidad alta dé un resultado muy por encima de una resolución baja. De este estudio, parece desprenderse que en realidad no es necesario contemplar los 256 niveles de gris utilizados, sino que si se decidiera trabajar con imágenes de menor resolución en gris, los resultados no empeorarían enormemente. Una vez extraída esta conclusión, sí que es cierto que los resultados son ligeramente mejores (cinco pruebas frente a cuatro) en el caso de imágenes de 250 niveles de gris.

Como conclusión final de los estudios mostrados en este apartado 5.3., podemos decir que las condiciones óptimas de creación de los mapas de profundidad, para realizar la tarea de verificación, son las siguientes:

- Ecuación exponencial: el resaltado de las áreas en un rango de profundidad menor que realiza esta función (en torno a la nariz y ojos), mejora el porcentaje de verificación final. Es decir, de alguna manera se puede afirmar que esta ecuación resalta los rasgos faciales importantes en la tarea de verificación.
- Tamaño de 200x200 píxeles: en general, no es apropiado utilizar una resolución mayor, ya que el porcentaje de éxito en la verificación empeora. El hecho de contar con toda la información en detalle puede hacer que, si hay ligeros errores en la adquisición o en la normalización de los datos, éstos repercutan más en el resultado final.
- La normalización debe ser muy precisa para no empeorar los resultados. Como se ha visto en este estudio presentado, incluso en las imágenes frontales es necesario realizar la tarea de normalización, ya que es imposible conseguir que la postura facial de todos los individuos sea exactamente la misma. En el caso de giros, esta etapa es absolutamente imprescindible.
- La resolución en niveles de gris no es muy significativa de cara al resultado final. En esta tesis se ha utilizado la resolución mayor disponible en niveles de gris: 256 niveles. Pero los resultados de este estudio indican una posible aplicación satisfactoria de imágenes con una resolución en niveles de gris muy baja.

5.4.- Verificación facial 3D: ICP.

Como verificador 3D se desarrolló un sistema basado en alguna característica intrínseca de la propia superficie tridimensional. Desde un principio se decidió utilizar como magnitud para medir la similitud entre dos caras 3D, la medida de la distancia entre dos superficies en el espacio tridimensional. Cuanta mayor diferencia hubiera entre dos caras, mayor distancia existiría entre las superficies. Se realizaron estudios previos donde se analizó la capacidad de utilizar la distancia Hausdorff, con resultados poco prometedores. Finalmente, se optó por utilizar el algoritmo de registro de superficies Iterative Closest Point (ICP), introducido por Besl y McKay en 1992 [Bes92]. Es un método utilizado para realizar el alineamiento de superficies

tridimensionales cuando se conoce una estimación inicial de la posición relativa entre ambas. Se trata de un algoritmo que, a partir de dos superficies (una llamada modelo y otra escena), “encaja” una superficie sobre la otra, mediante transformaciones rígidas sucesivas. La superficie modelo es la que permanece fija y la escena se va variando hasta aproximarse lo más posible al modelo. Para ello, se basa en el emparejamiento de puntos entre las superficies modelo y la escena, eligiendo siempre el par de puntos más cercano.

Este método fue elegido ya que se consideró apropiado para el problema propuesto de la verificación facial en 3D:

- Se basa en las características geométricas de cada una de las superficies, luego cumple el requisito impuesto de que se tratara de un método basado en algún rasgo puramente tridimensional.
- Debido a la normalización previa con las Spin Images, se dispone de una estimación inicial de la posición de las superficies, condición necesaria para llevar a cabo del registro con ICP.
- La medida del error final entre las superficies alineadas puede ser utilizada como parámetro clasificador para realizar la verificación facial.

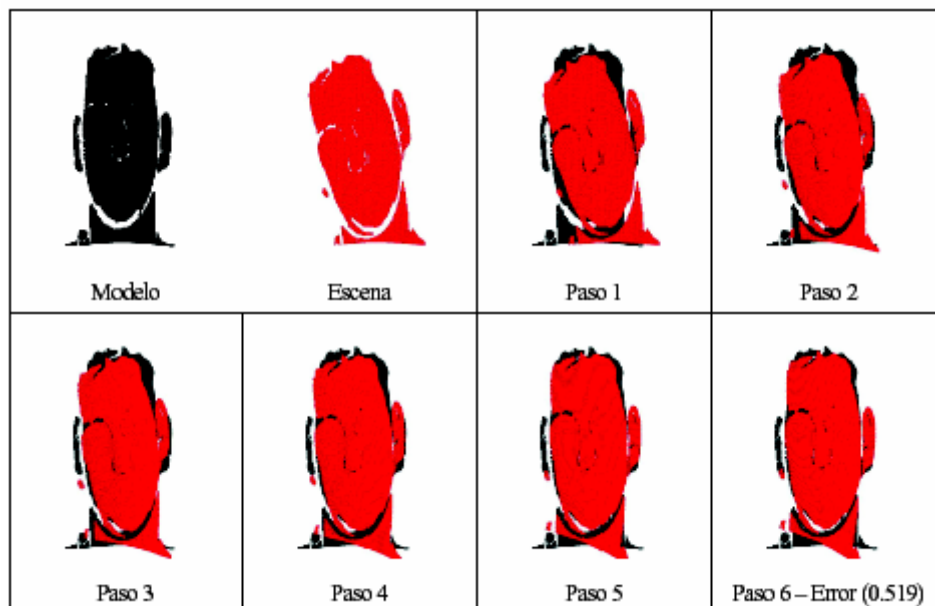


Figura 5.13. Visualización de la actuación del algoritmo ICP. La posición inicial de las superficies modelo y escena (arriba a la izquierda) es modificada, a lo largo de seis pasos, hasta obtener el error mínimo.

El ICP es un algoritmo iterativo que trabaja en tres fases:

1. Establece correspondencias entre pares de puntos de las dos superficies, creando parejas de puntos más cercanos.
2. Estima la transformación rígida que ajusta mejor los puntos de la escena al modelo.
3. Aplica esta transformación a todos los puntos de la escena, y se calcula el error cuadrático medio entre los puntos de ambas superficies.

El proceso es repetido hasta que el error cuadrático medio entre las superficies converge a un valor mínimo. En la Figura 5.13 puede verse un ejemplo de la actuación del algoritmo: inicialmente se dispone del modelo y de la escena. Ésta es transformada en seis pasos, hasta obtener un error medio mínimo entre ambas superficies (paso 6). En ese momento se detiene el proceso.

A continuación vamos a proceder a explicar cada uno de estos pasos en mayor detalle.

5.4.1.- Algoritmo ICP.

Fase 1: establecimiento de los pares de puntos más cercanos entre el modelo y la escena

En esta primera fase, para cada uno de los puntos de la escena se busca el punto del modelo más cercano. Sean P la superficie escena y X la superficie modelo. Denotamos :

$$N_p \text{ ; Número de puntos en la escena}$$

$$N_x \text{ ; Número de puntos en el modelo}$$

La distancia d entre un punto $p \in P$ y el modelo X es definida como:

$$d(\mathbf{p}, X) = \min_{\mathbf{x} \in X} \|\mathbf{x} - \mathbf{p}\|$$

La complejidad de este cálculo es, en el peor de los casos, $O(N_x)$. Cuando el cálculo se realiza para todos los puntos de la escena, la complejidad puede llegar a ser $O(N_x \cdot N_p)$. Para reducir el tiempo de cálculo de la búsqueda de puntos más cercanos a la escena, se ha decidido crear un árbol de búsqueda binario Kd-Tree (k-dimensional tree) [Ben80] [Fri77]. Un árbol kd-tree es una estructura de ordenación de datos en un espacio k-dimensional. En concreto se ha utilizado un árbol 3d-Tree, ya que se ha trabajado con las tres dimensiones en el espacio.

Este tipo de árbol es muy adecuado al problema de la búsqueda del punto más cercano, ya que una vez construido el árbol, las búsquedas se realizan de manera mucho más óptima. De este modo, la complejidad del cálculo del punto más cercano se reduce a $O(\log N_x)$.

La parte más costosa de este proceso es la creación del árbol 3d-Tree, ya que en este paso se ha de realizar la ordenación de todos los puntos del modelo. La partición del espacio se realiza mediante planos perpendiculares a cada uno de los ejes (X, Y, Z), de manera consecutiva: primero se elige un plano perpendicular a X, en el siguiente paso a Y, en el siguiente a Z, y otra vez comenzando con el eje X. Cada plano atraviesa uno de los puntos del conjunto de datos. En cada paso, el punto seleccionado para crear el plano de separación es la mediana del conjunto de datos respecto a su coordenada en el eje que está siendo considerado.

En la Figura 5.14 puede verse un ejemplo de creación de un árbol 2d-tree. El punto raíz para crear el árbol es el (0, 5), luego el primer plano de separación será perpendicular al eje X, y paso por $x=0$. Este plano separa el espacio en dos zonas: $x < 0$ y $x > 0$. Dentro de cada una de estas zonas, se ha de elegir un plano de separación, en este caso perpendicular al eje Y. Este plano es elegido en función de la mediana de las coordenadas y de cada conjunto de puntos en que ha quedado dividido el espacio. Este proceso se repite iterativamente hasta obtenerse el árbol mostrado en la misma figura.

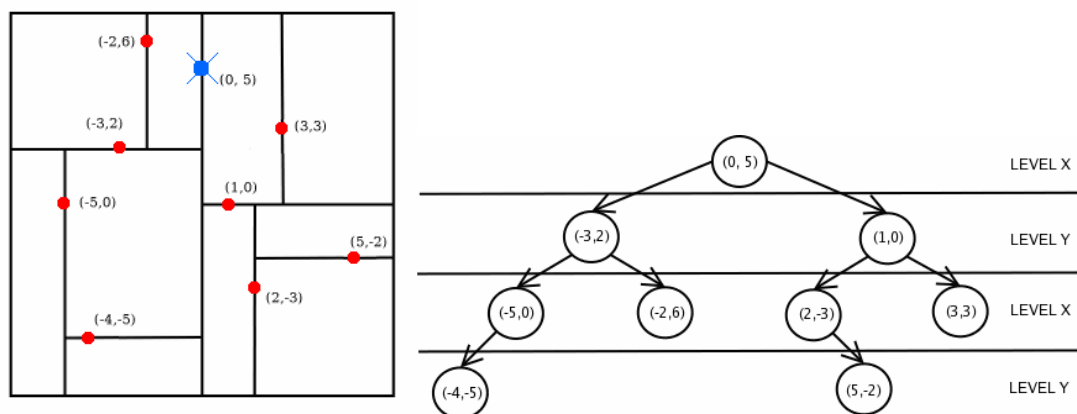


Figura 5.14. Ejemplo de creación de árbol 2D-tree: a la izquierda, colocación de los puntos y planos de división utilizados; a la derecha, árbol resultante.

De este modo se obtiene un árbol homogéneo, óptimo para realizar una búsqueda posterior. El hecho de tener que elegir la mediana del conjunto de datos considerado en cada paso, hace necesario que éstos sean ordenados. El algoritmo de ordenación utilizado ha sido el quicksort, de complejidad $O(n \cdot \log n)$.

Una vez construido el árbol kd-tree, el proceso de búsqueda del vecino más cercano de cada punto de la escena al modelo se realiza de manera iterativa, recorriendo el árbol. Para cada punto p de la escena, en cada nodo del árbol se compara la coordenada del punto p que es discriminante para ese nodo, y se procede en la dirección más cercana según esa coordenada.

De este modo se construyó el conjunto de pares de puntos más cercanos entre la escena y el modelo, que se denotará como Y . Si C es el operador “punto más cercano”, podemos escribirlo como:

$$Y = C(P, X)$$

Fase 2: estimación de la transformación rígida para alinear las superficies

En esta fase, se calcula la transformación rígida (Rotación + Traslación) que más acercará la escena al modelo. Para ello se utiliza el algoritmo basado en cuaterniones presentado por Horn [Hor87], que se presenta a continuación.

Se define cuaternión unitario de rotación como el vector de cuatro componentes:

$$\vec{q}_R = [q_0 q_1 q_2 q_3]^t$$

donde $q_0 \geq 0$ y $q_0^2 + q_1^2 + q_2^2 + q_3^2 = 1$

A partir de este cuaternión se puede calcular la matriz de rotación como:

$$R = \begin{bmatrix} q_0^2 + q_1^2 - q_2^2 - q_3^2 & 2(q_1 q_2 - q_0 q_3) & 2(q_1 q_3 + q_0 q_2) \\ 2(q_1 q_2 + q_0 q_3) & q_0^2 + q_2^2 - q_1^2 - q_3^2 & 2(q_2 q_3 - q_0 q_1) \\ 2(q_1 q_3 + q_0 q_2) & 2(q_2 q_3 + q_0 q_1) & q_0^2 + q_3^2 - q_1^2 - q_2^2 \end{bmatrix}$$

Sea el siguiente vector de traslación:

$$\vec{q}_T = [q_4 q_5 q_6]^t$$

El vector completo de registro se denota como:

$$\vec{q} = [\vec{q}_R | \vec{q}_T]^t$$

Sean el conjunto de puntos escena y modelo respectivamente:

$$P = \{\bar{p}_i\} ; X = \{\bar{x}_i\} \quad \text{con } N_x = N_p$$

donde los puntos están ordenados por pares de puntos más cercanos, emparejados con los mismos subíndices.

La función a minimizar será:

$$f(\bar{q}) = \frac{1}{N_p} \sum_{i=1}^{N_p} \|\bar{x}_i - R(\bar{q}_R)\bar{p}_i - \bar{q}_T\|^2$$

Los centros de masas de los dos conjuntos de puntos escena y modelo vienen dados por:

$$\bar{\mu}_p = \frac{1}{N_p} \sum_{i=1}^{N_p} \bar{p}_i \quad ; \quad \bar{\mu}_x = \frac{1}{N_x} \sum_{i=1}^{N_x} \bar{x}_i$$

La matriz de covarianza cruzada \sum_{px} de X y P viene dada por la expresión:

$$\sum_{px} = \frac{1}{N_p} \sum_{i=1}^{N_p} [(\bar{p}_i - \bar{\mu}_p)(\bar{x}_i - \bar{\mu}_x)^t] = \frac{1}{N_p} \sum_{i=1}^{N_p} [\bar{p}_i \bar{x}_i^t] - \bar{\mu}_p \bar{\mu}_x^t$$

A partir de esta matriz, podemos definir la matriz: $A_{ij} = (\sum_{px} - \sum_{px}^T)_{ij}$

y el vector columna Δ es formado por: $\Delta = [A_{23} A_{31} A_{12}]^T$. A partir de este vector podemos calcular la matriz simétrica 4x4:

$$Q(\sum_{px}) = \begin{bmatrix} tr(\sum_{px}) & & & \\ \Delta & & \Delta^T & \\ & \sum_{px} + \sum_{px}^T & -tr(\sum_{px})\mathbf{I}_3 & \end{bmatrix}$$

donde \mathbf{I}_3 es la matriz identidad 3x3. El autovector de mayor autovalor de esta matriz $Q(\sum_{px})$ es el cuaternión óptimo de rotación que más aproxima la escena al modelo $\bar{q}_R = [q_0 q_1 q_2 q_3]^t$. El vector óptimo de traslación vendrá dado por:

$$\bar{q}_T = \bar{\mu}_x - \mathbf{R}(\bar{q}_R)\bar{\mu}_p$$

De este modo hemos calculado la transformación rígida óptima para alinear la escena con el modelo. Este cálculo es de complejidad $O(N_p)$, por lo que es muy costoso. Como veremos en el apartado 5.4.2, el tiempo de cálculo invertido en este algoritmo, llevó a tomar la decisión de paralelizar este proceso para ser ejecutado en un cluster de ordenadores.

Fase 3: aplicación a la escena de la transformación estimada, y medida del error cuadrático medio

Una vez obtenida la transformación óptima, ésta es aplicada al conjunto de puntos de la escena, obteniendo el valor de la escena actualizado:

$$P = \bar{q}(P)$$

El error cuadrático medio entre los puntos emparejados de la escena y el modelo, una vez aplicada la transformación rígida, viene dado por:

$$d_{ms} = \left\| \frac{1}{N_p} \sum_{i=1}^{N_p} [(\bar{x}_i - \mathbf{R}(\bar{q}_R)\bar{p}_i - \mathbf{T}(\bar{q}_T)] \right\|$$

Este error será utilizado como magnitud para realizar la verificación, y su valor será introducido en el módulo de decisión.

Las tres fases del algoritmo ICP son aplicadas iterativamente, hasta que se dé una de las siguientes condiciones:

- El error cuadrático medio es menor que un valor umbral.
- La traslación calculada es menor que un valor determinado.
- La rotación calculada es menos que un valor determinado.
- Se ha alcanzado un número máximo de iteraciones permitido.

El registro de superficies mediante el algoritmo ICP es un proceso muy costoso. La verificación de una cara puede llevar de unos segundos a minutos, en el caso de que sea necesario realizar un gran número de operaciones. El número de operaciones máximo se limitó para que ninguna verificación tardara más de cinco minutos.

Las pruebas realizadas sobre la base de datos FRAV3D requieren que, para obtener resultados estadísticos representativos, se compare cada una de las caras con todas las restantes personas de la base de datos. Esto hace un número de 105 (personas) x 16(capturas por persona) x 105 (modelos con los que se compara) = 176400 verificaciones. Es decir, el realizar todas las pruebas deseadas podría llevar meses. Para solucionar este problema se decidió paralelizar el proceso utilizando el cluster Hydra de la Universidad Rey Juan Carlos. En el Anexo B se presentan los detalles de implementación de la paralelización realizada. Con la paralelización de la verificación 3D con ICP se consiguió un 93% de reducción del tiempo de ejecución.

5.4.3.- Resultados Experimentales.

Como se ha explicado antes, la magnitud cuyo valor se ha tomado para realizar la verificación es el error cuadrático medio entre la escena y el modelo. Como modelo de cada una de las personas se ha elegido una captura frontal, ya que éste tipo de imágenes es el que contiene un mayor número de puntos y existen menos áreas de la cara con puntos no adquiridos. Hemos considerado que el modelo debe ser la captura que haya sido realizada en las mejores condiciones.

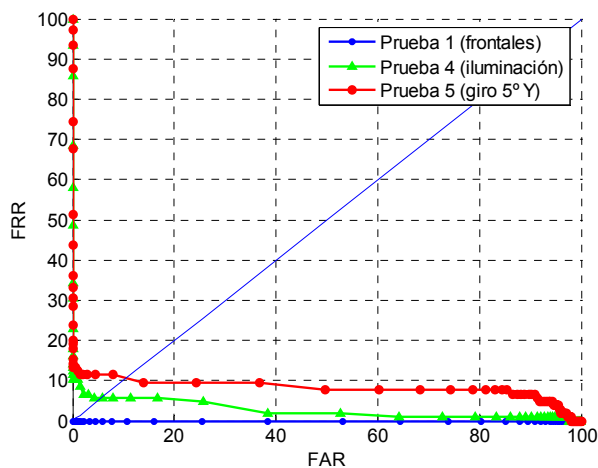


Figura 5.15. Curvas ROC de verificación facial 3D basada en ICP, para las pruebas 1, 4 y 5.

El método seguido para realizar las pruebas es el mismo que en el caso 2D y 2.5D: validación cruzada. Las pruebas realizadas son las mismas que en los verificadores anteriores, presentadas en la Tabla 5. 1. En el verificador 3D basado en ICP no existe etapa de entrenamiento, por lo que no tiene sentido hablar de conjunto de entrenamiento, únicamente conjunto de test. Las capturas del conjunto de test han sido verificadas contra el modelo de cada

persona (captura frontal), y el valor medio de los resultados es presentado como resultado final de cada una de las pruebas.

Las pruebas han sido realizadas con la base de datos FRAV3D normalizada. En la Figura 5.15 se presenta la curva ROC obtenida en las pruebas 1, 4 y 5. El resto de curvas ROC se presentan en el Anexo C. En la Tabla 5.8 se muestra el valor del EER obtenido para cada una de las pruebas realizadas mediante el verificador 3D presentado.

Tabla 5.8. Resultados obtenidos en la Verificación facial 3D basada en ICP. Se muestra el EER(%) obtenido en cada una de las pruebas.

PRUEBA	ENTREN.	TEST	Verificador 3D
1	3 frontal	1 frontal	4.85
2	4 frontal	1 gestos (sonrisa)	10.29
3	4 frontal	1 gestos (boca abierta)	12.58
4	4 frontal	2 iluminación	3.37
5	4 frontal	2 giro 5° Y	4.37
6	4 frontal	1 giro leve Z	7.37
7	4 frontal	2 giro X	5.25
8	4 frontal	2 giro 25° Y	5.82
9	4 frontal	1 giro severo Z	7.38
10	2 frontal 2 iluminación	2 frontal	3.69
11	3 frontal 1 giro 5° Y	1 frontal 1 giro 5° Y	5.34
12	3 frontal 1 giro 5° Y 1 iluminación	1 frontal 1 giro 5° Y 1 iluminación	4.21
13	3 frontal 1 giro 5° Y 1 iluminación	1 frontal 1 giro 5° Y 1 iluminación 1 sonrisa	6.67
14	4 frontal	2 gestos	11.81
15	2 frontal	2 frontal	3.69

A partir de los resultados, se pueden realizar los siguientes análisis:

- En general, los porcentajes de error obtenido con el verificador 3D son mayores que los obtenidos con las imágenes de rango, pero es más robusto frente a giros en la cara.
- Las condiciones que más afectan a este verificador son las que más deforman la superficie facial (tanto sonrisa como boca abierta).
- La iluminación no afecta en absoluto a los resultados.
- el sistema se ve menos afectado por los giros en torno al eje Y, que respecto a los otros ejes.

5.5.- Comparación de Resultados.

A modo de resumen y comparación rápida de los tres verificadores, se incluyen aquí los datos de los tres (obtenidos en las condiciones óptimas cada uno de ellos). En la Tabla 5.9 se presentan los resultados obtenidos para cada uno de los verificadores: 2D, 2.5D y 3D. Se muestran los resultados de las quince pruebas realizadas. Para una comparación más intuitiva, se presentan en la Figura 5.16 estos resultados en forma de diagrama de barras.

En el caso de imágenes frontales, el mejor resultado es obtenido en el caso del Verificador 2.5D, con imágenes de rango, obteniéndose un 99.91% de acierto. En el caso del Verificador 2D, con imágenes en color, el porcentaje total de aciertos desciende al 97.1%, y en el caso del Verificador 3D basado en ICP, al 95.1%.

Respecto a las imágenes gestuales, en las imágenes con gesto sonrisa los resultados son mejores que los obtenidos con la boca abierta, ya que en el primer caso la geometría facial se ve menos afectada. Otra vez el mejor resultado es el obtenido por el Verificador 2.5D.

Los cambios en la iluminación afectan principalmente al Verificador 2D. En el caso del Verificador 3D, el resultado no se ve afectado en absoluto. Por el contrario, las imágenes de rango sí se ven más afectadas.

Los giros afectan enormemente al Verificador 2D, ya que no se ha realizado ninguna normalización. En el caso de los verificadores 2.5D y 3D, se ven mucho menos afectados por estas condiciones.

Tabla 5.9. Comparación de la verificación facial 2D, 2.5D y 3D. Se muestra el EER(%) obtenido en cada una de las pruebas. Se resalta en negrita el menor error de los tres obtenidos.

PRUEBA	TRAIN	TEST	2D	2.5D	3D
1	3 frontal	1 frontal	2.91	0.09	4.85
2	4 frontal	1 gestos (sonrisa)	5.13	4.64	10.29
3	4 frontal	1 gestos (boca abierta)	12.62	12.62	12.58
4	4 frontal	2 iluminación	8.70	0.97	3.37
5	4 frontal	2 giro 5° Y	14.60	1.01	4.37
6	4 frontal	1 giro leve Z	33.93	2.19	7.37
7	4 frontal	2 giro X	13.34	1.94	5.25
8	4 frontal	2 giro 25° Y	27.02	4.85	5.82
9	4 frontal	1 giro severo Z	41.14	3.71	7.38
10	2 frontal 2 iluminación	2 frontal	1.94	0.48	3.69
11	3 frontal 1 giro 5° Y	1 frontal 1 giro 5° Y	4.85	0.48	5.34
12	3 frontal 1 giro 5° Y 1 iluminación	1 frontal 1 giro 5° Y 1 iluminación	4.17	0.64	4.21
13	3 frontal 1 giro 5° Y 1 iluminación	1 frontal 1 giro 5° Y 1 iluminación 1 sonrisa	4.09	1.65	6.67
14	4 frontal	2 gestos	9.15	10.28	11.81
15	2 frontal	2 frontal	1.94	0.56	3.69

En el caso de introducir diferentes condiciones de adquisición en el conjunto de entrenamiento (pruebas 10 a 14), los verificadores con etapa de entrenamiento (2D y 2.5D) realmente mejoran sus resultados. En el caso del Verificador 3D, no se produce esta mejora ya que no posee un clasificador con etapa de aprendizaje.

En general, el Verificador 2.5D es el que muestra mejores resultados, siendo esencial la corrección en posición y orientación. También podemos destacar que el Verificador 2D ofrece mejores resultados que el Verificador 3D (excepto en el caso de los giros y la iluminación).

Podemos concluir indicando que a la vista de los resultados, la información tridimensional parece más potente a la hora de realizar la verificación, pero el motor verificador utilizado en el caso de las imágenes en color y rango (basado en PCA y SVM) es más potente que el motor verificador 3D (basado en ICP).

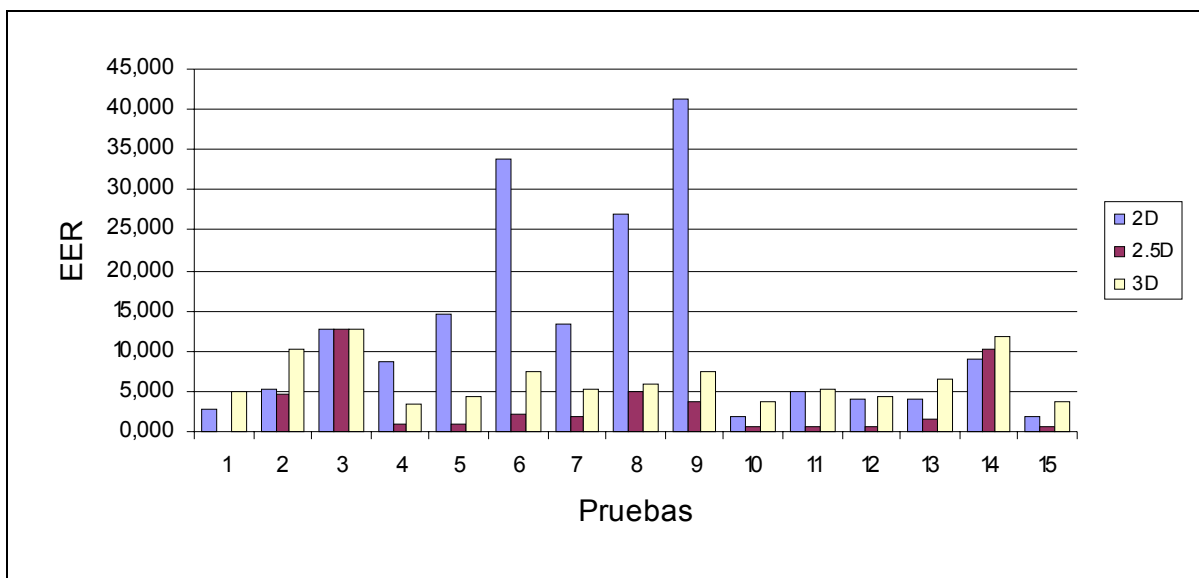


Figura 5.16. Diagrama de barras de comparación de los EER(%) obtenidos por cada uno de los Verificadores: 2D, 2.5D y 3D, en cada una de las quince pruebas realizadas.

El verificador 2.5D ha mostrado ser en general el más potente de los tres estudiados, pero los resultados obtenidos por los sistemas 2D y 3D en algunas situaciones los mejoran. En el siguiente capítulo se muestra el método seguido para realizar la fusión de estos tres verificadores.

Capítulo 6

Fusión de datos 2D, 2.5D y 3D.

6.1.- Descripción de la fusión.

Se han presentado tres Verificadores Faciales diferentes, basados en distintas características físicas de la cara: textura, profundidad y superficie facial. El que mejores resultados ha obtenido es el verificador 2.5D, pero cada uno de los otros verificadores (2D y 3D) ha mostrado ser mejor que los demás en alguna condición de adquisición de datos determinada. A partir de estos resultados, se puede suponer que una estrategia para construir un sistema más eficaz es fusionar los sistemas presentados. La filosofía seguida ha sido el fusionar el verificador mejor (2.5D) con cada uno de los otros dos, no considerando la fusión de los dos verificadores más débiles. Se han diseñado por lo tanto dos sistemas verificadores faciales fusionados en el entorno de esta tesis:

- Verificador que fusiona la información de rango (2.5D) con la información de textura (2D).
- Verificador donde los datos fusionados son la información de rango (2.5D) con la del mallado tridimensional (3D).

Respecto a la fuente de datos, ambos sistemas son de la categoría de múltiples representaciones faciales (ver Figura 2.26): imagen de rango 2.5D y textura 2D en el primer

caso, e imagen de rango 2.5D y mallado 3D en el segundo. Los sistemas verificadores individuales fusionados son los presentados en el Capítulo 5. La fusión ha sido realizada a nivel de similitud o salida del clasificadores (*scores*) (ver Figura 2.27). Los datos han sido normalizados mediante dos técnicas distintas: mínimo-máximo o normalización y Z-score o estandarización (ver apartado 2.5). Esta normalización de los datos se produce previamente a la aplicación de la regla de fusión, para que los datos puedan ser comparables, a pesar de corresponder a clasificadores diferentes. Como ha quedado patente en diversos estudios [Sne05] el método de normalización influirá en el resultado final, por lo que se ha realizado un estudio en profundidad de los resultados en función de los dos métodos de normalización seleccionados. Las expresiones de normalización de datos utilizadas son las siguientes (siendo S el conjunto de valores dados como salida por el clasificador, s el valor de salida del clasificador, σ la desviación estándar y n el valor una vez normalizado):

- Mínimo-máximo (MM) o normalización:
$$n = \frac{s - \min(S)}{\max(S) - \min(S)} \quad [\text{Eq. 6. 1}]$$

- Z-score (ZS) o estandarización:
$$n = K \cdot \frac{s - \text{media}(S)}{\sigma(S)} \quad [\text{Eq. 6. 2}]$$

En el caso de la estandarización ZS, se ha multiplicado por una constante $K=4$ para que en ambos tipos de normalización los datos quedaran situados en un rango de valores semejantes, y de este modo evitar la influencia de la resolución numérica de los datos.

La regla de fusión utilizada ha sido la suma ponderada, mediante la siguiente expresión:

$$score_{fusion} = \lambda \cdot score_1 + (1 - \lambda) \cdot score_2 \quad [\text{Eq. 6. 3}]$$

donde $score_i$ es la salida de cada uno de los clasificadores de los sistemas verificadores individuales (una vez normalizados), y λ es el peso dado a cada una de ellas. Se ha variado $\lambda \in [0,1]$, en incrementos de 0.05, para realizar todo el barrido entre los dos extremos: únicamente considerar el sistema 1 ($\lambda=1$), y sólo tener en cuenta el sistema 2 ($\lambda=0$). De este modo se contemplan todos los valores intermedios.

Como ya hemos dicho, se han creado dos sistemas fusionados con las características descritas:

- Fusión 2.5D+2D: en este caso se pretende comprobar cómo el introducir la información de textura, además de la imagen de rango, mejora la verificación. La ecuación de fusión utilizada es la siguiente:

$$score_{fusion} = \lambda \cdot score_{2.5D} + (1 - \lambda) \cdot score_{2D} \quad [\text{Eq. 6. 4}]$$

- Fusión 2.5D+3D: en este caso se pretende comprobar los resultados obtenidos al fusionar los dos tipos de información tridimensional considerados. La ecuación de fusión aplicada en este caso es la siguiente:

$$score_{fusion} = \lambda \cdot score_{2.5D} + (1 - \lambda) \cdot score_{3D} \quad [\text{Eq. 6. 5}]$$

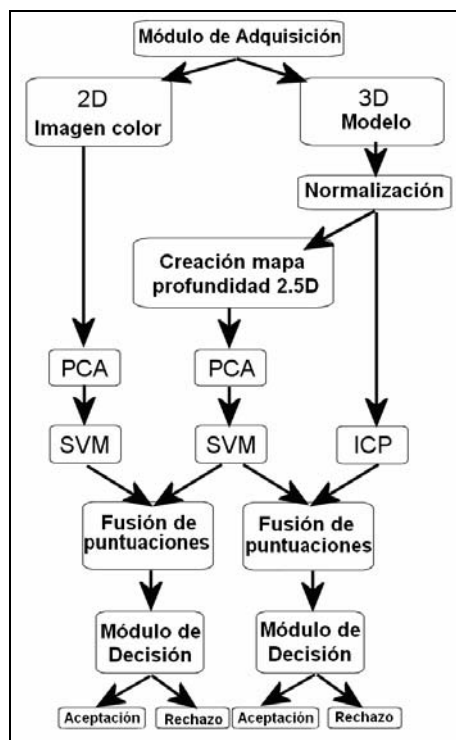


Figura 6.1. Arquitectura de los dos sistemas fusionados

En la Figura 6.1 se presenta el esquema de los distintos módulos de los dos sistemas fusionados creados. El flujo del proceso completo seguido es el siguiente: inicialmente, los datos 2D (imagen en color) y 3D (mallado) son adquiridos mediante el escáner láser. A continuación, el mallado 3D es normalizado. El mallado normalizado es procesado para generar la imagen de rango. A continuación cada uno de los tipos de datos generados (color 2D, imagen de rango 2.5D y mallado 3D) son introducidos en cada uno de los núcleos verificadores. La imagen 2D y la imagen 2.5D son procesados en un verificador del tipo PCA (extracción de características) y SVM (clasificador). De este modo se genera el valor de salida del clasificador

correspondiente a la imagen 2D, y el valor correspondiente a la imagen de rango. El mallado 3D por su parte es introducido en el núcleo verificador 3D, basado en el algoritmo ICP, generando un valor de similitud de los mallados comparados. Es en ese punto del proceso cuando se procede a fusionar las salidas de los clasificadores. Como se ha indicado anteriormente, se han realizado dos fusiones distintas: fusión color + imagen de rango (2.5D+2D), y fusión imagen de rango + mallado (2.5D + 3D).

En el primer caso, la fusión se realiza mediante las salidas o *scores* de dos clasificadores tipo SVM (el entrenado con imágenes en color y el que ha sido entrenado con imágenes de rango). En ambos casos, un valor positivo grande indicará mayor coincidencia entre las dos caras probadas, y un valor negativo, indicará menor coincidencia (ver Figura 6. 2). Es decir, el criterio de los datos numéricos de ambos clasificadores para indicar mayor o menor semejanza es el mismo. Por lo tanto, los datos se pueden normalizar directamente mediante las dos técnicas indicadas: mínimo-máximo y Z-score. La fusión se realizará mediante la suma ponderada indicada en la ecuación 6.1. El resultado fusionado obtenido será introducido en el módulo de decisión, que indicará la aceptación o rechazo del individuo.

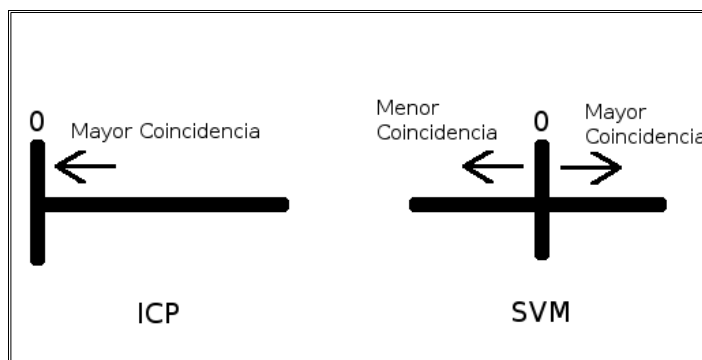


Figura 6. 2. Criterios de similitud de ambos clasificadores: ICP y SVM.

En el caso de la fusión 2.5D+3D, se desea fusionar dos clasificadores de características muy distintas, y cada uno de ellos tiene un criterio diferente para indicar mayor o menor similitud entre los datos. En la Figura 6. 2 se muestra un diagrama donde se indican estos criterios. En el caso del ICP, como salida se obtiene una distancia entre las dos superficies analizadas, por lo que siempre es positiva. Cuanto menor sea el valor obtenido, las superficies faciales comparadas son más parecidas, y la coincidencia es mayor. Cuanto mayor sea la salida del ICP, las superficies se diferencian más. Como este criterio difiere del seguido por el SVM, se han de procesar los datos antes de ser normalizados para poder ser comparados. Por esta razón, se procedió a multiplicar por -1 los resultados del ICP, y que siguieran un criterio semejante al del SVM. Posteriormente, se procedió a normalizar los resultados de ambos clasificadores con los dos métodos indicados (mínimo-máximo y Z-score), y se realizó la fusión

mediante una suma ponderada. El resultado fusionado a su vez es introducido en el módulo de decisión, que determinará la aceptación o rechazo del sujeto.

6.2.- Resultados experimentales.

Los dos sistemas fusionados han sido evaluados de la misma manera que cada sistema verificador individual. Se han realizado las mismas quince pruebas, presentadas en la Tabla 5.1. El método seguido en la ejecución de las pruebas es el método de validación cruzada.

En este apartado vamos a presentar los resultados obtenidos en la realización de estas pruebas. Se mostrarán mediante las curvas de eficiencia y el valor del EER. Las curvas de eficiencia representan el EER del sistema fusionado vs. el valor del peso de fusión λ . De este rango de EER obtenidos, se escogerá el valor mínimo. Para medir la mejora introducida por la fusión, éstos EER mínimos serán comparados con los valores del EER obtenidos por cada uno de los verificadores individuales. Como se ha dicho en el apartado anterior, se han realizados dos normalizaciones de datos diferentes: mínimo-máximo (MM) y Z-score (ZS). Se mostrarán los resultados de ambos tipos de normalización.

Se han fusionado imágenes adquiridas en diferentes condiciones, y mapas de profundidad creados con distintas características. A continuación se enumeran los parámetros variados:

- El tipo de normalización usado: mínimo-máximo (MM) y Z-score (ZS).
- Ecuilibración de las imágenes de rango 2.5D.
- Tamaño de las imágenes (color y rango).
- Las propias condiciones de adquisición de las imágenes.

En este apartado se van a mostrar los resultados de la fusión considerando las imágenes que han mostrado dar un resultado óptimo en el proceso de verificación: tamaño de 200x200 píxeles e imágenes de rango creadas con una función exponencial. El conjunto de datos completo se muestra en el Anexo C. Se han realizado quince pruebas diferentes, considerando distintas condiciones de adquisición de las caras. Éstas pruebas coinciden con las realizadas en los sistemas verificadores individuales. Son las mostradas en la Tabla 5.1.

A modo de referencia, se presentan en la Tabla 6. 1 los valores del EER (%) obtenidos por cada verificador individual, antes de la fusión. A continuación, se presentan los distintos resultados obtenidos para los dos sistemas fusionados creados: 2.5D+2D y 2.5D+3D.

Tabla 6. 1. EER(%) obtenido por los verificadores 2D, 2.5D y 3D, antes de la fusión de datos.

PRUEBA	Verificador 2D	Verificador 2.5D	Verificador 3D
1	2,9126	0,0934	4,8544
2	5,1328	4,6414	10,2964
3	12,6214	12,6214	12,5806
4	8,6977	0,9709	3,3656
5	14,6049	1,0099	4,3689
6	33,9289	2,1879	7,3687
7	13,3380	1,9417	5,2557
8	27,0227	4,8544	5,8252
9	41,1371	3,7114	7,3766
10	1,9417	0,4854	3,6893
11	4,8544	0,4854	5,3398
12	4,1729	0,6472	4,2141
13	4,0919	1,6596	6,6673
14	9,1502	10,2783	11,8082
15	1,9417	0,5650	3,6893

6.2.1. Fusión 2.5D+2D

En el primer sistema se han fusionado las salidas de los clasificadores SVM referentes al sistema verificador 2D (color) y 2.5D (imágenes de rango). De este modo se pretende obtener un sistema global que tenga en cuenta ambas características: textura y geometría. La regla de fusión aplicada se ha presentado en la ecuación 6.2.

A continuación se muestran los resultados obtenidos en las quince pruebas realizadas, teniendo en cuenta ambas normalizaciones: MM (normalización mínimo-máximo) y ZS (normalización Z-score). En primer lugar, presentaremos cómo varía el EER del sistema, a medida que se va variando el parámetro de fusión λ . Esta variación será representada en forma de curva de eficiencia EER (%) vs. λ . A partir de la ecuación 6.2 puede comprobar cómo en el caso $\lambda=0$ el único sistema que contribuye al resultado es el verificador 2D, y si $\lambda=1$ únicamente contribuye el verificador 2.5D. Todos los valores intermedios de λ representan las contribuciones parciales de cada verificador.

En las figuras Figura 6. 3 y Figura 6. 4 se muestran las curvas de eficiencia del sistema 2.5D+2D en el caso de ambas normalizaciones (MM y ZS), para las pruebas 1, 2, 10 y 13. En el Anexo C se presentan las curvas de eficiencia de todas las pruebas. En todos los casos presentados, tanto para la normalización mínimo-máximo como Z-score, existe un mínimo en la curva de eficiencia. Es decir, la fusión hace que efectivamente el EER del sistema disminuya respecto a cada EER de los verificadores antes de ser fusionados.

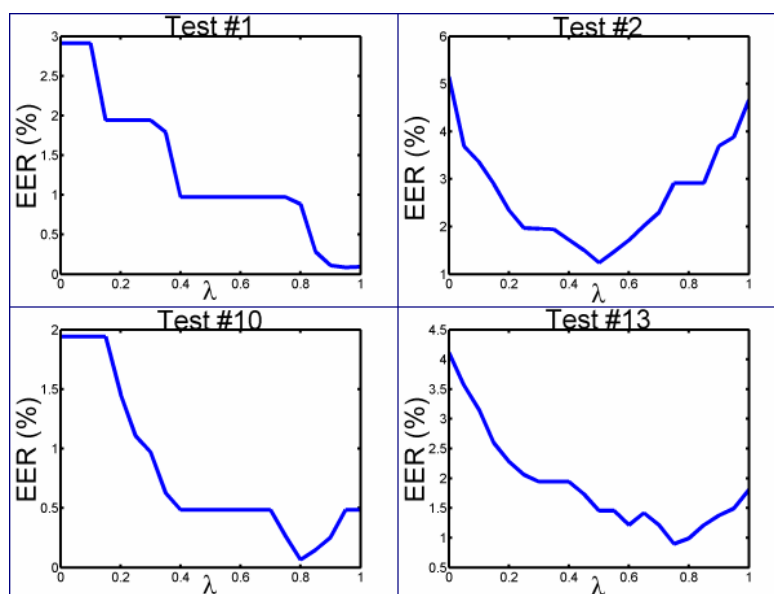


Figura 6. 3. Curvas de eficiencia (EER vs. valor de λ) de la fusión 2.5D+2D en el caso de la normalización ZS.

En la Tabla 6. 2 se presentan los EER (%) mínimos obtenidos, y el valor λ en el que se alcanzan, para cada una de las quince pruebas. Se muestran los resultados de ambas normalizaciones. Como puede verse en estos resultados, excepto en las pruebas 9 y 14, la normalización Z-score siempre muestra un error igual o menos que la normalización máximo-mínimo.

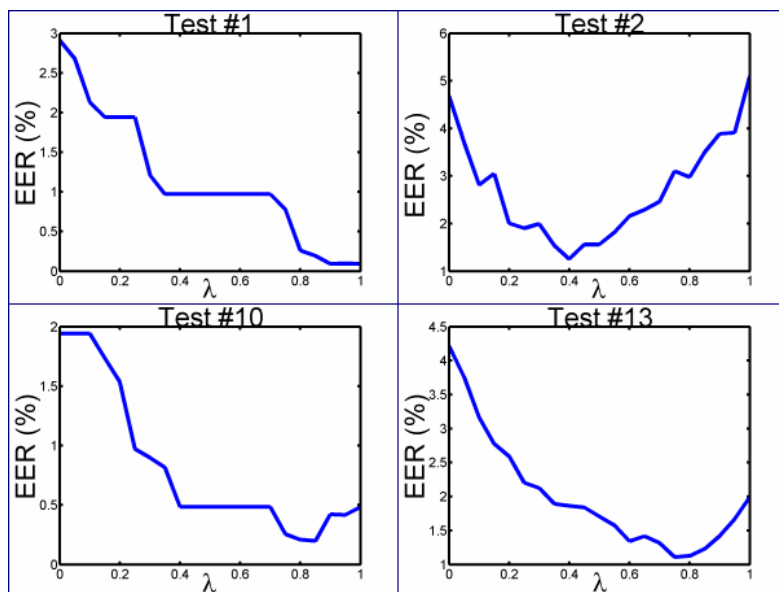


Figura 6. 4. Curvas de eficiencia (EER vs. valor de λ) de la fusión 2.5D+2D en el caso de la normalización MM.

6.2.2. Fusión 2.5D + 3D

En este apartado se mostrarán los resultados obtenidos por el sistema verificador fusionado 2.5D + 3D. En este caso se fusionan las salidas del clasificador SVM entrenado con las imágenes de rango, con la salida del módulo ICP (error cuadrático medio entre las superficies alineadas), según la ecuación 6.3. Se presentan los resultados obtenidos en cada una de las normalizaciones usadas.

En primer lugar, vamos a presentar las curvas de eficiencia obtenidas en el caso de las pruebas 1, 6, 9 y 14 (Figura 6.5 y Figura 6.6), para ambas normalizaciones. Los extremos de la curva de eficiencia representarán el EER obtenido de manera individual por cada uno de los sistemas que han sido fusionados. Como puede verse en la Ecuación 6.3, en el caso $\lambda=0$ el valor del EER representado corresponde al del verificador 3D, y si $\lambda=1$ el EER representado es el del sistema 2.5D. El resto de curvas de eficiencia de las quince pruebas se presentan en el Anexo C.

Como puede verse en la figuras Figura 6.5 y Figura 6.6, tanto en el caso de la normalización MM como ZS, todas las curvas muestran un mínimo del valor del EER. Es decir, el proceso de fusión mejora el porcentaje de error, disminuyéndolo o por lo menos manteniéndolo.

Tabla 6. 2. EER(%) mínimos obtenidos durante la fusión 2.5D+2D, considerando las salidas de los clasificadores normalizadas ZS, y normalizadas MM. Se señala en negrita el mejor EER obtenido entre las dos normalizaciones.

PRUEBA	2.5D+2D (ZS)	λ_{ZS}	2.5D+2D (MM)	λ_{MM}
1	0,0857	0,95	0,0925	0,9
2	1,2409	0,50	1,2520	0,4
3	6,3752	0,30	6,7919	0,25
4	0,6128	0,85	0,8039	0,9
5	0,9709	0,80	1,0099	0,9
6	1,9417	0,75	2,0875	0,85
7	1,0981	0,70	1,1982	0,7
8	3,8328	0,85	3,8835	0,85
9	3,7114	1,00	3,5431	1
10	0,0647	0,80	0,1968	0,85
11	0,4854	1,00	0,4854	0,8
12	0,3814	0,75	0,5351	0,85
13	0,8980	0,75	1,1080	0,75
14	4,7124	0,35	4,4735	0,2
15	0,4472	0,85	0,4707	0,85

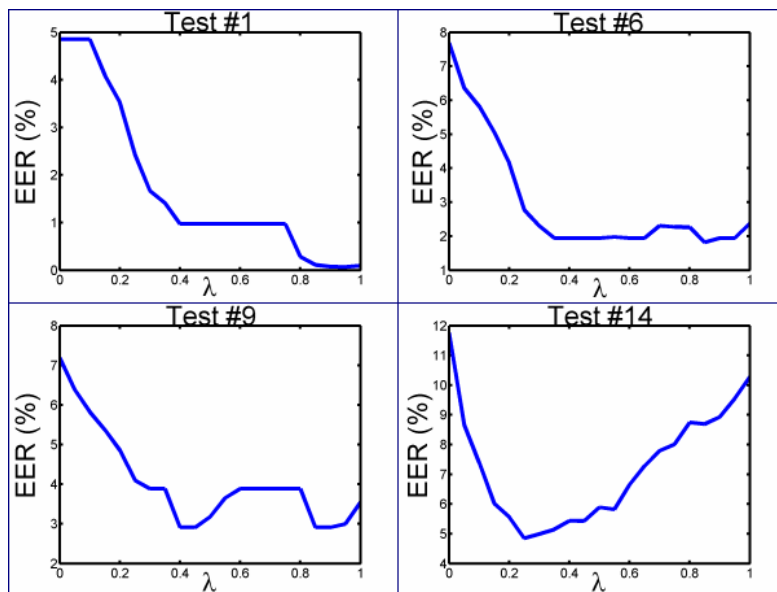


Figura 6.5. Curvas de eficiencia (EER vs. valor de λ) de la fusión 2.5D + 3D en el caso de la normalización ZS.

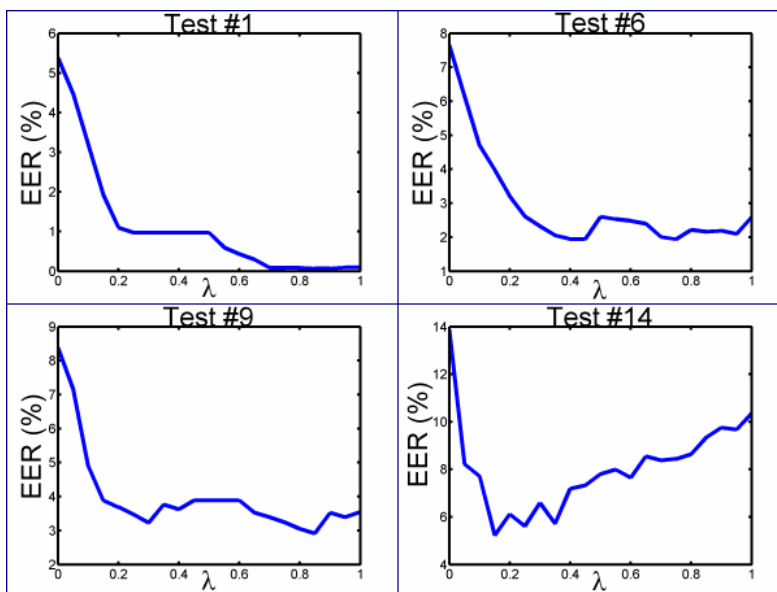


Figura 6.6. Curvas de eficiencia (EER vs. valor de λ) de la fusión 2.5D + 3D en el caso de la normalización MM.

En la Tabla 6. 3 se presentan, para cada una de las quince pruebas realizadas, los valores mínimos del EER, y el valor de λ para el cual es alcanzado. Se incluyen los resultados obtenidos con ambas normalizaciones: ZS y MM.

Tabla 6. 3. EER(%) mínimos obtenidos durante la fusión 2.5D+3D, considerando las salidas de los clasificadores estandarizadas ZS, y normalizadas MM. Se señala en negrita el mejor EER obtenido entre las dos normalizaciones.

PRUEBA	2.5D + 3D (ZS)	λ_{ZS}	2.5D + 3D (MM)	λ_{MM}
1	0,0660	0,95	0,0660	0,85
2	3,4974	0,30	3,1709	0,2
3	5,8252	0,25	6,5470	0,15
4	0,1603	0,45	0,3474	0,35
5	0,9709	0,80	0,8973	0,55
6	1,8149	0,85	1,9372	0,75
7	1,2973	0,65	1,4200	0,6
8	0,9709	0,65	1,1068	0,4
9	2,9126	0,40	2,9126	0,85
10	0,4854	1,00	0,4579	0,95
11	0,4854	1,00	0,4854	0,65
12	0,6044	0,85	0,6326	0,8
13	1,4454	0,90	1,5370	0,8
14	4,8453	0,25	5,2228	0,15
15	0,5237	0,85	0,4854	0,7

Si se comparan los resultados fusionados con los obtenidos por los verificadores 2D y 3D individuales, puede observarse una notable mejora general. Por ejemplo, en el caso de la prueba 9 (giros alrededor del eje Z), el verificador 3D se caracterizaba por un EER del 7.37%, y el 2.5D por un 3.71% de EER. La fusión de ambos verificadores en el caso de la normalización ZS, presenta un EER del 2.91% para el valor de $\lambda=0.40$. El EER ha disminuido sensiblemente.

En todos los casos (excepto las pruebas 2 y 5), el EER obtenido por la fusión con normalización ZS es menor o igual que el obtenido mediante la fusión con normalización MM.

6.2.3. Discusión de los resultados

Como puede verse en las tablas Tabla 6. 1, Tabla 6. 2 y Tabla 6. 3, siempre existe un valor del parámetro de fusión λ que reduce o iguala el EER obtenido por los verificadores antes de ser fusionados. Es decir, la fusión mejora los resultados obtenidos, ya que permite hacer separables casos que previamente no lo eran.

Las tablas Tabla 6. 2 y Tabla 6. 3 muestran que el valor óptimo de λ es muy variable, dependiendo del tipo de imágenes consideradas, los sistemas verificadores fusionados, e incluso la normalización realizada de las salidas de los clasificadores. En el caso del verificador 2.5D+2D, si ignoramos las pruebas donde se consideran caras con gestos faciales (pruebas 2, 3 y 14), podemos considerar entonces que el rango de valor óptimo para λ es de entre 0.5 y 0.9. Este rango está más próximo a 1 que a 0, por lo que podemos deducir que el Verificador 2.5D contribuye en mayor medida que el verificador color. En la prueba 4 (iluminación) también se observa este efecto. Es lógico suponer en este caso que las imágenes de rango son más robustas frente a variaciones en la iluminación que las imágenes de textura en color. En el caso del verificador 2.5D+3D, esta situación ($\lambda < 0.5$) corresponde con una mayor contribución del verificador 3D. Éste es el caso de las pruebas de gestos (2,3, y 14), iluminación y giros severos.

Para poder observar la mejora introducida por la fusión de manera más sencilla, se ha presentado en la Tabla 6. 4 el porcentaje de mejora obtenido (sobre el EER) para el valor λ óptimo, respecto al verificador individual que mejor resultado proporcionara. Prácticamente en todos los casos, la normalización ZS produce un EER menor que la MM. En la Figura 6. 7 se representan gráficamente estos resultados.

Si consideramos únicamente los resultados obtenidos en la fusión 2.5D+2D mediante la normalización de tipo ZS, en la prueba 10 (entrenamiento con 4 imágenes frontales y prueba con 2 imágenes giradas en el eje Z) se obtiene un porcentaje de mejora del 87%. Esta mejora es del 83% en el caso de la fusión 2.5D + 3D.

También es interesante señalar que en ciertas condiciones de adquisición, la fusión no ofrece una mejora en el resultado final, como puede verse en las pruebas 9, 10 y 11. Sin embargo, el EER tampoco empeora.

Tabla 6. 4. EER (%) de los verificadores individuales (2D, 2.5D y 3D) y fusionados (2.5D+2D normalizados ZS y MM; 2.5D+3D normalizados ZS y MM). Porcentaje de mejora (%) al fusionar los datos, respecto al mejor verificador individual, en el caso de normalización ZS y MM. Se señala en negrita el porcentaje de mejora máximo obtenido en cada prueba.

PRUEBA	Individuales (EER (%))			Rango+Color (EER (%))		Rango + ICP (EER (%))		% Mejora			
	2D	2.5D	3D	2.5D+2D (ZS)	2.5D+2D(MM)	2.5D + 3D (ZS)	2.5D + 3D (MM)	2.5D+2D (ZS)	2.5D+2D (MM)	2.5D+3D (ZS)	2.5D+3D (MM)
1	2,9126	0,0934	4,8544	0,0857	0,0925	0,0660	0,0660	8,2	0,95	29,3	29,32
2	5,1328	4,6414	10,2964	1,2409	1,2520	3,4974	3,1709	73,3	73,02	24,7	31,68
3	12,6214	12,6214	12,5806	6,3752	6,7919	5,8252	6,5470	49,5	46,19	53,7	47,96
4	8,6977	0,9709	3,3656	0,6128	0,8039	0,1603	0,3474	36,9	17,20	83,5	64,21
5	14,6049	1,0099	4,3689	0,9709	1,0099	0,9709	0,8973	3,9	0,00	3,9	11,14
6	33,9289	2,1879	7,3687	1,9417	2,0875	1,8149	1,9372	11,3	4,59	17,1	11,46
7	13,3380	1,9417	5,2557	1,0981	1,1982	1,2973	1,4200	43,4	38,29	33,2	26,87
8	27,0227	4,8544	5,8252	3,8328	3,8835	0,9709	1,1068	21,0	20,00	80,0	77,20
9	41,1371	3,7114	7,3766	3,7114	3,5431	2,9126	2,9126	0,0	4,53	21,5	21,52
10	1,9417	0,4854	3,6893	0,0647	0,1968	0,4854	0,4579	86,7	59,46	0,0	5,66
11	4,8544	0,4854	5,3398	0,4854	0,4854	0,4854	0,4854	0,0	0,00	0,0	0,00
12	4,1729	0,6472	4,2141	0,3814	0,5351	0,6044	0,6326	41,1	17,32	6,6	2,25
13	4,0919	1,6596	6,6673	0,8980	1,1080	1,4454	1,5370	45,9	33,23	12,9	7,38
14	9,1502	10,2783	11,8082	4,7124	4,4735	4,8453	5,2228	48,5	51,11	52,9	49,19
15	1,9417	0,5650	3,6893	0,4472	0,4707	0,5237	0,4854	20,9	16,70	7,3	14,08

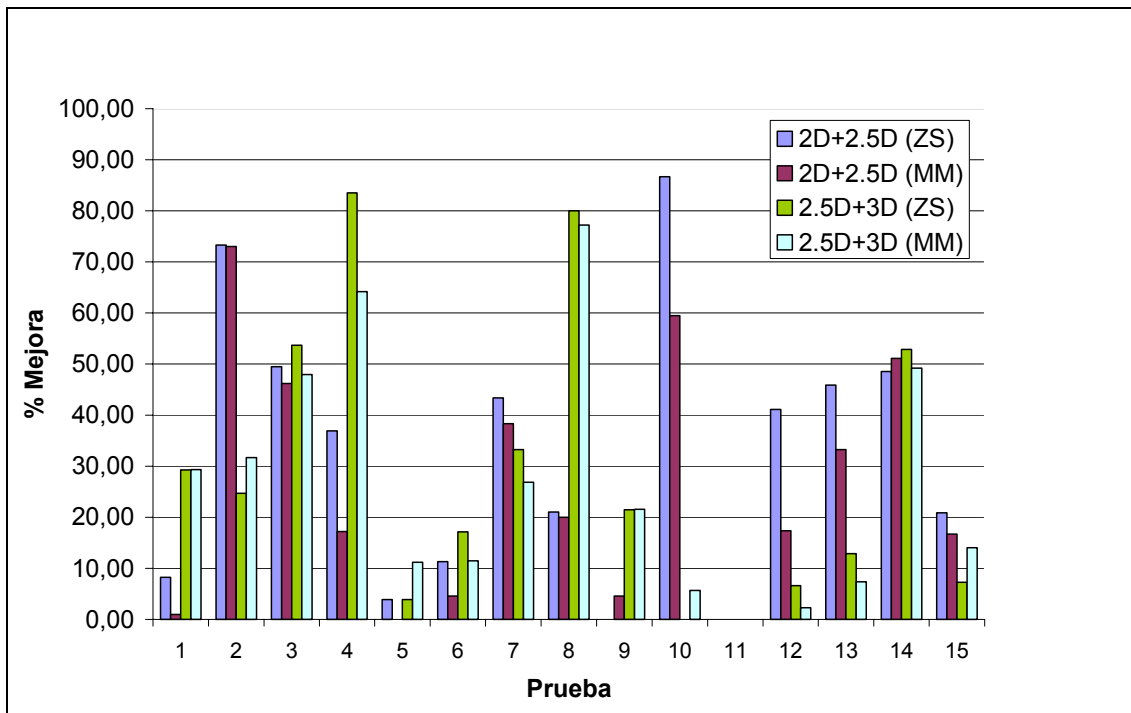


Figura 6. 7. Diagrama del porcentaje de mejora introducido por la fusión en el caso de los dos verificadores considerados (2.5D+2D y 2.5D+3D), y las dos normalizaciones (Z-Score y Máximo-Mínimo). El porcentaje es sobre el mejor de los verificadores individuales.

Capítulo 7

Conclusiones. Líneas de Investigación Futuras.

7.1.- Descripción del capítulo.

La motivación general de esta tesis ha sido el contribuir al desarrollo de diferentes técnicas de verificación facial en dos y tres dimensiones, así como al estudio de la capacidad de integración o fusión de ambos tipos de información para un mejor resultado.

En este capítulo mostraremos las principales conclusiones obtenidas en la presente tesis. En primer lugar, se presentarán las aportaciones realizadas por esta tesis, y posteriormente se analizarán en detalle las conclusiones obtenidas a partir de los trabajos realizados en las diferentes etapas del proceso de verificación facial. Finalmente, se mostrarán las posibles líneas de continuación o trabajos futuros de la investigación que surgen de los aquí presentados.

7.2.- Aportaciones de la tesis.

Esta tesis ha presentado un trabajo de investigación centrado en el campo del reconocimiento facial automático. Las contribuciones principales se enumeran a continuación:

- Se han presentado tres métodos de normalización automática de la posición facial en caras tridimensionales: una aproximación inicial a los rasgos de la cara a partir de los

valores de la curvatura; un método de localización de tres puntos característicos en la cara (ojos y nariz) mediante el uso de la técnica de registro global Spin Images unido a un clasificador de Máquinas de Vector Soporte; un método global de normalización en posición a partir del ajuste de los puntos a distintos planos y rectas de regresión.

- Se ha investigado la capacidad de reconocimiento facial a partir de diferentes tipos de representación de la cara: imagen en color (2D), imagen de rango (2.5D) y mallado tridimensional (3D).
 - Se ha propuesto un sistema de verificación facial aplicable a imágenes en color e imágenes de rango. Se basa en la reducción del espacio de características mediante un análisis de componentes principales, y la posterior clasificación mediante el método de máquinas de vector soporte (kernel lineal).
 - Se ha presentado un sistema de verificación facial aplicable a mallados tridimensionales basado en la medida de la similitud entre dos superficies mediante el algoritmo de registro Iterative Closest Point.
- Se ha estudiado la construcción del mapa de profundidad y qué características óptimas debe cumplir para su aplicación al reconocimiento facial.
- Se ha investigado la verificación facial multimodal mediante la fusión de las diferentes modalidades de representación facial: imagen color + imagen de rango y imagen de rango + mallado 3D. La fusión se ha realizado mediante una suma ponderada a nivel de “score” o salida del clasificador. Se ha realizado un estudio del valor del peso de ponderación en función del tipo de información fusionada y de las condiciones de adquisición de las imágenes.
- Se ha estudiado la influencia de la normalización de los “scores” o salidas de los clasificadores previa a la fusión de los datos. Para ellos se han utilizado dos métodos de normalización de los datos: Mínimo-máximo y Z-score.
- Para la evaluación de los métodos propuestos, se ha adquirido una nueva base de datos multimodal (2D y 3D), llamada FRAV3D. Consta de 105 individuos, con 16 capturas por individuo en diferentes condiciones de adquisición (giros, iluminación, y expresiones). Esta base de datos se encuentra disponible para la comunidad científica, para fines de investigación.

- Se han probado los métodos presentados tanto de normalización como verificación facial en la base de datos FRAV3D, mediante pruebas exhaustivas, manteniendo las mismas quince pruebas en todos los casos.

7.3.- Conclusiones.

Se han cumplido los objetivos presentados en el capítulo 1: creación de un sistema verificador facial basado en la fusión de la información bidimensional y tridimensional. Los resultados finales obtenidos han sido muy satisfactorios, alcanzando un 99.93% de aciertos en el caso de imágenes frontales, y más del 95% en el resto de condiciones (excepto en gestos con la boca abierta).

En el Capítulo 1, apartado 1.3, se presentaron las dos corrientes actuales existentes en la biometría facial [Phi05]: superioridad de la capacidad de verificación de la información tridimensional o de las imágenes en alta resolución. Respecto a esta discusión, podemos afirmar que los resultados obtenidos en esta tesis muestran una mayor capacidad de reconocimiento de la información tridimensional (concretamente en forma de imagen de rango). Si bien, es importante destacar que la información bidimensional es extremadamente importante y puede contribuir en gran medida a complementar a los datos tridimensionales.

7.3.1. Creación BBDD Multimodal FRAV3D.

Se ha adquirido una base de datos facial multimodal (2D y 3D) con 105 individuos. El capturar una base de datos homogénea y controlada ha requerido las siguientes observaciones:

- Durante el proceso de adquisición es vital mantener un protocolo común para todos los individuos. De esta manera, es posible controlar cada uno de los factores que influyen en los datos adquiridos de manera independiente (posición de la cara, iluminación, gestos, etc.)
- Para que el resultado de las capturas sea natural, es necesario que entre captura y captura exista un tiempo, es decir, que las adquisiciones no sean consecutivas. El protocolo debe incluir una serie de indicaciones, pero no forzar al individuo a una posición concreta con métodos externos.

7.3.2. Normalización Automática de Caras en 3D.

Se han presentado tres sistemas originales de normalización automática facial en 3D, basados en técnicas diferentes:

- Localización de ojos, nariz y boca a partir de la medida de las curvaturas en la superficie facial.
- Localización de ojos y nariz mediante Spin Images y Máquinas de Vectores soporte.
- Normalización global a partir de la caracterización de conjuntos de puntos faciales mediante rectas y planos de regresión.

El primer método se ha mostrado poco fiable respecto a problemas comunes en la adquisición de los datos, como puede ser la presencia de pelo o picos de ruido. Por lo tanto, podemos concluir que únicamente a partir de la medida de los valores de las curvaturas media y de Gauss, no es posible identificar satisfactoriamente los rasgos faciales en todos los casos.

El método de las Spin Images y SVM se ha mostrado muy robusto frente a estos fallos en la adquisición: es capaz de localizar y eliminar los picos de ruidos, así como de localizar los puntos buscados incluso en el caso de áreas de puntos perdidos (no adquiridos por oclusión, o por presencia de pelo). También ha mostrado ser relativamente independiente de las condiciones de adquisición de los datos. El porcentaje medio de aciertos de esta técnica en caso de imágenes sin gestos ni giros muy severos es próximo al 98%. Las principales limitaciones de este método se dan en el caso de los giros muy severos, donde las grandes áreas de puntos no adquiridos por el escáner pueden producir que los puntos buscados no existan. En este caso, el localizador fallará.

El tercer método de normalización automática, basado en la disposición global de los puntos, se introdujo precisamente para trabajar en los casos en que fallara el método anterior. Se trata de un método no robusto frente a los picos de ruido, pero en el caso de los puntos perdidos es capaz de normalizar la cara de manera bastante satisfactoria. Con la aplicación consecutiva del método Spin Images + SVM, y del método global, se consiguió reducir el error a tan sólo un 1.7% de error medio.

Es importante destacar que los métodos presentados actúan directamente sobre los puntos en el espacio 3D, siendo ésta una de sus principales ventajas. De este modo, se permite aprovechar al máximo la capacidad de normalización en el espacio 3D, previamente a cualquier manipulación de la información (por ejemplo, su representación como mapa de profundidad).

Respecto al tiempo de cálculo empleado en la normalización de una cara, éste es muy variable, y depende principalmente del grado de giro de la cara. En el caso de las imágenes frontales el proceso completo ocupa menos de un minuto, y en el caso de las imágenes muy giradas el proceso puede alargarse hasta varios minutos.

7.3.3. Verificación Facial 2D, 2.5D y 3D.

Se han diseñado dos sistemas verificadores diferentes:

- Sistema basado en PCA y SVM para la información de color (2D) y rango (2.5D).
- Sistema basado en ICP para la información en forma de mallado (3D).

Respecto a las imágenes en color, se ha estudiado el tamaño de imagen que ofrecía mejores resultados (200x200 píxeles y 400x400 píxeles). A partir de los resultados, se puede concluir que el tamaño 200x200 píxeles es el que mejor resultados proporciona en general en una mayor variedad de condiciones.

En el caso de las imágenes de rango, se estudió tanto la influencia del tamaño de imagen (mismos tamaños que en el caso de la imagen en color), como de la función de ecualización para asignar un nivel de gris en función de la profundidad (exponencial, lineal, lineal por secciones y gaussiana). Las imágenes que han mostrado un mejor resultado han sido las creadas con ecualización exponencial y tamaño 200x200 píxeles.

Si analizamos el comportamiento de los tres verificadores en función de la condición de adquisición de las imágenes, podemos concluir:

- Frontales: el mejor verificador es el 2.5D (imágenes de rango). El sistema acierta en el 99.9% de los casos, siendo este un resultado muy satisfactorio. En el caso del color, los aciertos descienden al 97.08% y en el caso 3D al 95%.
- Gestos: la sonrisa influye en menor medida en el resultado que la boca abierta. En el caso de la sonrisa, el mejor verificador es otra vez el 2.5D.
- Iluminación: como era de esperar, los mejores resultados se dan en el caso de los verificadores que tratan con información tridimensional (2.5D y 3D), ya que son mucho menos dependientes de la iluminación que el color. El mejor resultado es otra vez el dado por el verificador 2.5D, con un 99.1% de aciertos. Ha descendido el porcentaje de aciertos respecto a las imágenes frontales, ya que el escáner sí depende ligeramente de la

iluminación. La existencia de sombras o zonas mal iluminadas en la cara, hace que en esas áreas los puntos sean peor adquiridos. En el caso del verificador 3D, no se ve afectado por esta ligera pérdida de puntos durante la adquisición.

- Giros: obviamente, los mejores resultados se obtienen para los verificadores donde se ha procedido previamente a realizar una normalización en posición de las caras (2.5D y 3D).
- Entrenamiento en diferentes condiciones: en estos casos, se incorporaron al conjunto de datos de entrenamiento del clasificador (en el verificador 2D y 2.5D) imágenes de distintos tipos, para observar cómo el sistema era capaz de realizar un aprendizaje de estas variaciones. En todos los casos 2D y 2.5D se produce una mejora en los resultados.

Como conclusión final podemos decir que en general el verificador 2.5D obtiene el mejor resultado. Este sistema aprovecha por un lado las ventajas de la representación tridimensional (independencia relativa de la iluminación, normalización previa) así como del motor verificador PCA + SVM, que produce unos resultados mucho mejores que el basado en ICP.

7.3.4. Fusión de Verificadores.

Se han diseñados dos sistemas verificadores multimodales fusionados (a nivel de salida del clasificador o “score”), donde se han unido los siguientes tipos de información:

- Color (2D) fusionado con Rango (2.5D).
- Rango (2.5D) fusionado con mallado (3D).

A partir del análisis de los resultados, se puede concluir que el uso de los diferentes tipos de información complementaria produce una gran mejora en el resultado final en la gran mayoría de los casos. La combinación de los resultados permite aprovechar las ventajas de cada uno de los verificadores individuales, produciendo finalmente un sistema mucho más robusto y fiable. La mejora en muchos casos es de más del 50% respecto al mejor verificador individual.

Se ha estudiado la influencia de la normalización de los datos previa a la fusión. Se han probado dos normalizaciones diferentes: una basada en el valor máximo y mínimo, y una estandarización o Z-score. En la mayoría de los casos, la normalización Z-score ofrece un mejor resultado.

7.4.- Líneas Futuras.

A partir del trabajo realizado en la presente tesis, han surgido varias líneas de continuación de las técnicas desarrolladas:

- Evaluación de los sistemas presentados sobre una BBDD pública (próximamente estarán disponibles FRGC “*Face Recognition Grand Challenge*” y UND “*University of Notre Dame*”).
- Localización de rasgos faciales: una posible mejora sería introducir un proceso iterativo en el método de localización de los lagrimales a partir de la clasificación con SVM de las Spin Images. En el método presentado, el proceso de entrenamiento del SVM se realiza una sola vez. Sería posible iterar el proceso y realizar un entrenamiento con los propios candidatos rechazados en un conjunto de caras.
- Eliminación del ruido en el proceso de localización de rasgos faciales: en el método presentado, se entrena un único modelo general con SVM, correspondiente a las Spin Images de puntos de ruido (pelo, pico bajo la nariz, flequillo, etc.). Una continuación de este trabajo sería el introducir modelos específicos para cada tipo de ruido.
- Verificación 3D, mejora sistema ICP: el motor verificador ICP se ha basado en la utilización de una única captura facial como modelo de comparación. Una combinación de ejemplos faciales para crear el modelo de referencia podría introducir una mejora en el sistema. Otra posible aproximación a este problema podría ser realizar una fusión a partir de los resultados individuales de la comparación de varios modelos de un mismo individuo (por ejemplo, con un sistema de votación).
- Diseño de otros verificadores 3D: como posible línea de investigación respecto a la verificación 3D, se podría diseñar otro sistema en 3D que realizara la clasificación según otras características diferentes al ICP. Una primera aproximación, podría ser la clasificación de las caras a partir de la medida de los coeficientes de deformación durante un proceso de “morphing” (adaptación de un modelo 3D a otro) de un modelo genérico a una cara. Este método requeriría la localización de unos puntos de control de la cara, que podrían identificarse como los rasgos localizados anteriormente mediante la técnica de clasificación de las Spin Images a partir de SVM.

- Fusión de clasificadores: sin lugar a dudas, los prometedores resultados mostrados en esta tesis, respecto a la fusión de diferentes modos de representación facial, muestran una clara línea futura de investigación. Por un lado, se podría trabajar en la fusión de los resultados de los tres verificadores presentados: 2D, 2.5D y 3D. Por otro lado, sería necesaria una investigación más profunda de los distintos métodos de fusión (en la presente tesis se ha trabajado con una regla de fusión de tipo suma ponderada). En este sentido, el estudio en detalle del valor del peso de cada modo de representación (color, rango, mallado) en función de las condiciones de adquisición de las imágenes sería otra línea de trabajo complementaria. Finalmente, se ha mostrado la influencia de la normalización de los datos previa a la fusión, por lo que otra posible línea futura de trabajo podría insistir en este aspecto, creando métodos de normalización de datos dinámicas, más dirigidos al conjunto de datos concreto obtenido.
- Paralelización de los módulos del sistema más lentos mediante lenguaje MPI (Message Passing Interface).
- Finalmente, el método de detección automática del umbral de aceptación (Anexo A), aplicado actualmente sólo al verificador 2D, podría ser rediseñado y aplicado al resto de los verificadores, así como a los sistemas fusionados.

Chapter 7

Conclusions. Future works.

7.1.- Summary.

The purpose of this PhD has been to make a contribution on the development of different facial verification techniques in 2 and 3 dimensions, as much as to study the capability of joining or mixing both information systems for a better output.

In this chapter we will display the main conclusions achieved by this PhD. First of all, the main contribution of this work will be presented; lately the conclusions achieved from the steps of the facial verification system will be analyzed on detail. Finally, the future works to continue this research will be shown.

7.2.- Main Contributions.

This PhD has displayed a research work focused on the automatic facial recognition system field. Main contributions are:

- Three different automatic normalization systems of facial pose have been presented. One initial approximation to the facial features by the mean and Gaussian curvature values; a method of three characteristic points of the face (Eyes and nose) by using the

global register technique called Spin Images together with a Support Vector Machine classifier, and a global normalization method of the pose by adjusting the points to different regression planes.

- The capability of facial recognition by different face displaying; colour image (2D), range image (2.5D) and three-dimensional mesh (3D) has been analyzed:
 - A facial verification system applied to colour and range images has been proposed, based in a space reduction by the Principal Component Analysis system, and a next step of classification by a support vector machine classifier (Lineal Kernel).
 - A facial verification system applied to tree-dimensional mesh has been proposed, based on the measure of two surfaces similarities by the Iterative Closest Point algorithm.
- A study over the depth map construction has been made in order to find which optimal characteristics must be accomplish for its application to the facial recognition.
- A multimodal facial verification system has been researched by joining the different facial representations: colour image + range image and range image + 3D mesh. The merge has been done by a weighted sum of the scores or classifier outputs. A study of the weights value has been done according to the information merged and the image acquisition environment.
- The influence of the scores normalization has been done previous to the data merging. Two normalization methods has been used; Minimum-Maximum and Z-score.
- In order to make a proper evaluation of the proposed methods, a new multimodal (2D&3D) database has been acquired, called FRAV3D. It has 105 people, with 16 captures per person in different pose environment (Turnings, illumination, and face gestures). The database is available for the scientific community for researching purposes.
- Presented methods of normalization and facial verification have been tested in the FRAV3D database by exhaustive proves keeping the same fifteen tests for each single individual.

7.3.- Conclusions.

Purposes from Chapter 1 have been accomplished. A facial verification system based on the fusion of bi-dimensional and three-dimensional data has been created. The final results has been really interesting, achieving a 99,93% of rights in frontal images and over 95% on the rest of environment conditions (exception are open mouth gestures)

In Chapter 1, section 1.3, the two current thinking streams about facial biometrics [Phi05] were exposed; superiority of the verification capability of the three-dimensional data or from the high resolution images. About these arguments, we can assert that the results from this PhD display a higher capability of three-dimensional information recognition (Range images). But is also important to highline that bi-dimensional information is very important and can contribute to complement the three-dimensional data.

7.3.1 Multimodal FRAV3D Face Database creation.

A facial multimodal database has been acquired (2D&3D) with 105 people. To capture data for building a controlled and homogeneous database has required the following:

- During the acquisition process is extremely important to keep a common protocol for every individual. This is the way to control the different things that has influence over the acquired data (Face pose, illumination, poses)
- To make captures natural, it is necessary a time gap between captures, not to make them consecutives. Protocol must include some outlines but not to force the individual to a specific pose.

7.3.2. 3D Automatic face normalization.

Three original systems have been presented in 3D facial automatic normalization.

- Localization of the eyes, nose and mouth by measuring the facial surface curvatures.
- Localization of the eyes and nose by Spin Images and Vector Support Machines.
- Global normalization from the facial combined points by lines and regression planes.

First method has been not too reliable for common problems in the data acquisition like hair or noise peaks, for instance. Therefore we can conclude that using only the values from the

mean and Gaussian curvatures makes difficult to identify properly the facial features for all individuals.

Spin images and SVM has been more robust versus this acquisition fails. It is able to locate and erase all noise peaks and to find the searched points even within lost areas (Not acquired because of occlusion or hair). It also has proof to be relatively independent from acquisition data environments. Average success rate of this technique using images without poses or movements is near 98%. A limitation on this method lies on the strong movements where lost areas of not acquired points can turn that area into null points.

Third method of automatic normalization, based on global position of the points, was introduced in order to work when the previous method fails. It is not as robust as this one about noise peaks, but in lost points is able to normalize de face in a very satisfactory way. A consecutive use of Spin Images + SVM and the Global Method, lowered the mistakes into a 1.7% average error.

It is important to say that the presented methods work directly over the 3D space points, being this one of the main advantages. This way allows using to the maximum the normalization capability in 3D space, previously to any use of the information.

About normalization estimated time for a face it varies a lot, especially according to the face pose movement. In frontal images the complete process last less than a minute, and in very turned images it can increase to some minutes (See Appendix B).

7.3.3. 2D, 2.5D and 3D Face Verification.

Two different verifier systems have been developed:

- A system based on PCA and SVM that can be applied to colour and range images.
- A system based on ICP designed to work with 3D meshes.

Respecting to colour images, it has been studied what image size offers better results (200x200 pixels or 400x400 pixels). Analyzing the results, it can be concluded that in general the 200x200 pixels size offers more satisfactory results. This is the case of the most of the different acquisition conditions.

In the case of range images, it was studied the image size (same sizes as in the case of colour images where probed) and the influence of the equalization function used in the range

image creation (exponential, lineal, lineal by sections and Gaussian). The better results have been obtained by the exponential images of 200x200 pixels size.

If the behaviour of the three verifiers is analyzed for the different acquisition conditions it can be concluded:

- Frontal images: better verifier is the 2.5D. The success rate is 99.9%. In the case of colour images, the success rate decrease to 97.08% and to 95% in the case of 3D.
- Gesture: the influence of the smile is lower than the influence of the open mouth. In the case of smiling, again the best classifier is the 2.5D.
- Illumination: as it was expected, better results are obtained for the classifiers that work with three-dimensional information: 2.5D and 3D. The three-dimensional data is much less sensitive to lighting changes. Better results are shown for the 2.5D classifier, with a success rate of 99.1%. The success rate in case of frontal images has gone down lightly, because the data acquired by the scanner is a few dependent from illumination. Shadows provoke lost points. The 3D verifier is not affected by this situation.
- Rotations: better results are obtained again for the three-dimensional verifiers where a previous normalization has been done (2.5D and 3D).
- Train in different conditions: different kind of images where added to the train set (in the case of 2D and 2.5D verifiers), to check the systems responses if different conditions are learnt. In all cases the results are improved.

As main conclusion it can be said that the best verifier is the 2.5D. This system takes advantages from the three-dimensional representation (relatively independence from illumination or previous normalization) and from the PCA+SVM engine verifier, that produces much better results than ICP.

7.3.4. Fusion

It has been developed two multimodal fusion systems (at decision level or scores), where it has been joined following information:

- Fusion of colour (2D) and range (2.5D)
- Fusion of range (2.5D) and mesh (3D)

Analyzing the results, it can be concluded that the use of different kind of complementary information produces an important improvement over the final result, in the most of acquisition conditions considered. Combining both types of information allows to take advantage of every individual verifier, producing a more robust and reliable system. The improvement is in more cases more than 50% regarding to the best individual classifier.

The influence of normalization data previous to the fusion has been analyzed. Two different normalization methods have been considered: maximum-minimum and Z-score. In most of the cases, Z-score offers better result.

7.4.- Future Work.

From the work presented in this thesis, several continuation ways has arisen:

- Evaluation of the system presented over a standard and publish database (in few months FRGC “*Face Recognition Grand Challenge*” and UND “*University of Notre Dame*” will be available).
- Facial feature points location: a good improvement could be the inclusion of an iterative process in the eyes location method. In the presented system, the SVM training process is done only one time. It could be possible to repeat this step several times with the rejected candidate points.
- Noise elimination during the feature location: in the method presented a model is generated by the SVM training corresponding to the Spin Images of noise (hair, peak below nose, etc.). A continuation of this work could be the introduction of specific models of each kind of noise.
- 3D Face verification, ICP improvements: the 3D motor verifier ICP it is based on just one capture as model. A combination of different faces to generate the model could produce better results.
- Other 3D verifiers: as a future research work respecting to 3D verification, it could be designed a different system that classify people by other methods. A first approach could be classifying faces by the measure of deformation between models, using a morphing technique (adaptation of a 3D model to other one). Morphing require the

location of a set of control points in the face, than can be select using the Spin Image plus SVM technique presented.

- Classifier fusion: the really good results produced by the fusion system presented show a promising research way. In one hand, it could be analyzed other fusion methods (maximum, minimum, an adaptative fusion, etc.) In this sense, it could be interesting to analyze more deeply the contribution of each kind of information: colour, range and three-dimensional, depending the acquisition conditions. On the other hand, it has been sown the influence of the normalization previous to the fusion stage, so a future work could be the study of more normalizations methods.
- Parallelization of the system using MPI (Message Passing Interface) language.
- Finally, the method of calculating the optimal acceptance threshold presented in Appendix A could be applied not only 2D system, but also the other verifiers and the fusion systems.

Anexo A

Cálculo Automático del Umbral de Aceptación óptimo en un sistema de Verificación Facial.

En todo sistema verificador facial, existe un valor llamado umbral de aceptación que delimita el valor frontera a partir del cual, en función de la salida del clasificador, se considera que el resultado ha sido de aceptación o de rechazo. Es decir, este valor frontera divide la población entre individuos impostores y auténticos. Esta tarea es realizada en el llamado Módulo de Decisión (ver Figura 2.3). En el Capítulo 5 de esta tesis, se ha presentado el sistema verificador 2D. Integrado en el módulo de Decisión de este sistema se ha desarrollado un método para calcular de manera automática el umbral de aceptación con el que el error cometido por el sistema sea menor. Este método es presentado en este apartado [Mon04] [Mon05].

El cálculo del valor óptimo del umbral de aceptación ha sido realizado utilizando técnicas de cribado bayesiano [Mon00]. El usuario introduce el cociente de los costes asumidos por los dos errores del sistema: falso positivo (o falsa aceptación) y falso negativo (o falso rechazo). Esta tasa entre los costes puede ser intuitivamente fijada, en función del nivel de seguridad deseado por el sistema verificador. Este método de detección del umbral de aceptación óptimo ha sido probado en el sistema verificador 2D presentado en esta tesis, y considerando dos clasificadores diferentes: Máquina de Vector Soporte (SVM) y una red neuronal de tipo Función de base radial (RBF). Se ha aplicado este método sobre la base de datos FRAV2D [Rod05], de 100 individuos (Figura A. 1).

A.1.- Sistema de Verificación Facial.

El sistema verificador sobre el que se ha probado el método de detección del valor del umbral óptimo es el presentado en el capítulo 5 de la presente tesis (ver Figura 5.2), basado en una reducción de la dimensión del espacio de características mediante el método de autocaros o Análisis de Componentes Principales (PCA). Respecto a los clasificadores, además del clasificador SVM se ha añadido otro clasificador de tipo red neuronal RBF (*Radial Basis Function*). En ambos casos, el entrenamiento es realizado con ocho imágenes por persona (las mismas que han sido utilizadas para el análisis PCA). Las pruebas han sido realizadas con cuatro imágenes de cada sujeto. Los conjuntos de entrenamiento y prueba son disjuntos. El tamaño original de cada imagen es de 320x240 píxeles (como puede verse en la Figura A. 1). Una vez extraída sólo el área de la cara, el tamaño es reducido a 130x140 píxeles.



Figura A. 1. Ejemplos de la Base de Datos FRAV2D.

Ambos clasificadores, SVM y RBF, producen un valor de salida de magnitud mayor cuanto mayor sea la confianza del resultado. Por lo tanto, se ha considerado que la verificación positiva o aceptación se produce cuando la salida del clasificador sea mayor que el valor del umbral de aceptación. La magnitud de salida de cada uno de los clasificadores es diferente: en caso de la red neuronal RBF se trata del valor de la neurona de salida; en el caso del SVM, del valor de la función de decisión.

El proceso de verificación de la información facial de una persona mediante la red RBF se realiza del siguiente modo: la información inicial consiste en una imagen del individuo y un número identificativo o PIN (*Personal Identification Number*). Este PIN indica qué neurona de salida debe ser considerada. En este caso, las funciones Gaussianas consideradas son simétricas y centradas en el centro del cluster correspondiente a cada sujeto. En el caso del clasificador SVM, se consideró un kernel de tipo lineal.

A.2.-Cálculo del Umbral de Aceptación Óptimo.

El método utilizado para calcular el umbral de aceptación óptimo fue un cribado bayesiano [Mon00], considerando dos variables llamadas:

- Una variable binaria de resultado T , que identifica cuando una imagen corresponde a un individuo auténtico o genuino ($T = 1$) o cuándo se trata de un impostor ($T = 0$).
- Una variable de cribado X definida por la salida del clasificador, SVM o RBF en nuestro caso.

Debido a que la variable de cribado X no está perfectamente correlada con la variable de rendimiento T , el cribado es propenso al error (bien una falsa aceptación o un falso rechazo).

A.2.1. Diseño del cribado.

Supongamos que la variable de cribado X es continua y del tipo “cuanto mayor, mejor”. Es decir, un valor mayor de X tiende a indicar la aceptación de un individuo auténtico ($T = 1$), mientras que un valor pequeño de X es un signo de que el individuo es un impostor ($T = 0$).

Bajo dicha suposición, podemos esperar la existencia de un punto de corte o umbral w , que divide nuestra población de candidatos en dos grupos: genuinos e impostores. Esta distinción puede realizarse si la variable X es mayor que w (genuino) o si es menor (impostor). En el caso particular en que X es igual a w , se debe tener imponer un criterio para considerar esta situación de aceptación o de rechazo. En nuestro caso, hemos considerado lo sujetos en que $X = w$ como genuinos. Por lo tanto, podemos definir nuestro cribado como:

- Si $X \geq w$, la persona es aceptada.
- Si $X < w$, la persona es rechazada.

A.2.2. Umbral de Aceptación Óptimo.

La principal novedad de este método aquí presentado es el cálculo automático del valor del umbral w que minimiza el coste total esperado en el proceso.

Sean c_a y c_r los costes de cada error del sistema, falsa aceptación y falso rechazo respectivamente. El coste total esperado por un sujeto, de acuerdo con la variable X (considerada como la salida del clasificador SVM o RBF) puede ser expresado en función de w , como la suma del coste debido a un rechazo erróneo (“falso negativo”) mas el coste debido a las imágenes erróneamente aceptadas (“falso positivo”). En otras palabras, el coste total esperado (*Expected Total Cost*) puede expresarse como:

$$ETC(w) = c_r P(T = 1, X < w) + c_a P(T = 0, x \geq w)$$

Considerando X continua, y que $ETC(w)$ puede ser minimizada respecto a w , puede obtenerse:

$$P(T = 1 | X = w) = k$$

Esta ecuación da el valor óptimo de w para ser considerado umbral de aceptación, donde $k = c_a / (c_a + c_r)$. Este parámetro puede ser calculado de manera más inmediata que cada uno de los costes c_a y c_r individualmente.

Estamos interesados en obtener la probabilidad condicionada de que la verificación se realice de manera correcta dado un determinado valor de la variable cribado $X = x$:

$$P(T = 1 | X = x, \text{datos}) = \frac{f(x|T = 1, \text{datos})}{\sum_{i=0,1} f(x|T = i, \text{datos})}$$

donde estamos asumiendo también que $P(T = 1) = 1/2$, es decir, que ambos grupos (genuinos e impostores) son igualmente probables.

Si suponemos que la variable X sigue una distribución normal en ambos grupos, y usando una distribución no informativa a priori para los parámetros desconocidos, las densidades predictivas a posteriori $f(x|T = i, \text{datos})$ para $i = 0, 1$ son funciones de densidad de tipo T-student:

$$f(x | T = i, \text{datos}) \propto \frac{1}{\sqrt{p_i}} \left\{ 1 + \frac{(x - \bar{x}_i)^2}{(n_i - 2)p_i} \right\}^{-\frac{1}{2}(n-1)}$$

donde $p_i = (1 + n_i^{-1})s_i^2$ y donde \bar{x}_i , s_i y n_i son la media, desviación estándar y tamaño del conjunto de muestra para cada uno de los dos grupos.

Los valores óptimos del umbral de aceptación w son entonces calculados mediante técnicas numéricas.

A.3.- Resultados.

A continuación se presentarán los resultados obtenidos al aplicar el método descrito sobre la base de datos FRAV2D. Se presentarán en dos partes: en primer lugar, se mostrará la variación del umbral de aceptación óptimo w , como una función del valor del cociente entre los costes de aceptación y rechazo, para ambos clasificadores SVM y RBF; en segundo lugar, se discutirá la variación de los errores FRR (Falsos Negativos) y FAR (Falsos Positivos) para cada uno de los valores de los costes considerados.

Tabla A 1. Resultados estadísticos para el conjunto de genuinos y de impostores, para los dos clasificadores considerados: SVM y RBF.

	SVM			RBF		
	\bar{x}_i	s_i	n_i	\bar{x}_i	s_i	n_i
$T = 1$	4.009	1.735	400	0.828	0.340	400
$T = 0$	0.306	0.277	39600	-1.696	0.455	39600

En la primera parte, los resultados muestran que la variable de cribado X es continua y del tipo “a mayor mejor”, como previamente habíamos supuesto en el diseño del cribado. En la tabla 1 se muestran los resultados de este experimento. \bar{x}_i representa la media del conjunto de muestra de nuestra variable de cribado X , S_i es la desviación estándar del conjunto de muestra y n_i es el tamaño de la muestra en cada caso.

La base de datos considerada consta de 100 individuos, con 4 imágenes por sujeto. El método de prueba considerado es el método de validación cruzada: cada cara de cada individuo

es comparada con todo el resto de la base de datos, por lo que el número de casos genuinos es de 400 ($T = 1$). Para cada uno de los 100 individuos, se consideraron entonces 99 impostores, con 4 imágenes cada uno, por lo que el total de pruebas con impostores es de 39600 ($T = 0$).

Tabla A 2. Variación del umbral de aceptación óptimo, con el porcentaje de FAR y FRR en el caso de los tres niveles de seguridad discutidos.

$tasa$ c_a / c_r	k	SVM			RBF		
		w	FRR (%)	FAR (%)	w	FRR (%)	FAR (%)
0.1	0.091	-0.717	1	0.17	1.081	2.00	2.45
1	0.500	-0.366	1	0.01	1.527	7.21	0.32
10	0.909	0.001	3.50	0	1.888	11.72	0.31

Se han computado las variaciones del umbral de aceptación óptimo w para diferentes costes c_a y c_r , con un rango de k entre $0 \leq k \leq 1$, para los dos clasificadores considerados (SVM y RBF). En las Figura A. 2 y A.3 se presentan estos resultados.

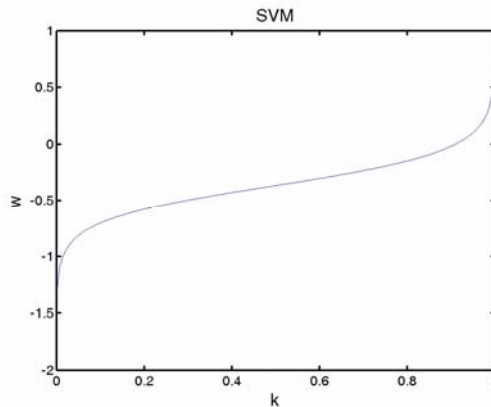


Figura A. 2. Variación del umbral de aceptación óptimo en el caso del clasificador SVM, en función de la variación del parámetro k .

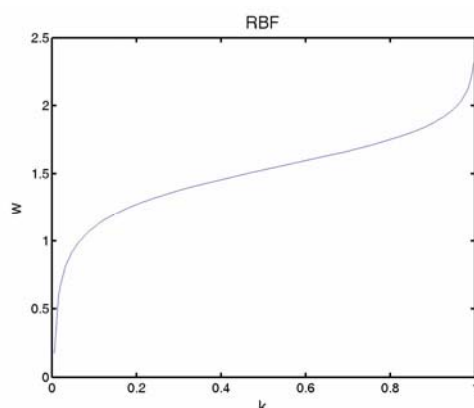


Figura A. 3. Variación del umbral de aceptación óptimo en el caso del clasificador RBF, en función de la variación del parámetro k .

Si tenemos en cuenta que los diferentes valores del parámetro k pueden ser interpretados como diferentes niveles de seguridad del sistema, podemos realizar la siguiente discusión:

- En un sistema de baja seguridad, el coste de una falsa aceptación será menor que el de un falso rechazo. Si consideramos una cociente estándar entre los costes de $c_a = 0.1c_r$, por ejemplo, entonces $k = 0.091$. Este es el caso de un sistema poco restrictivo, donde se fuerza que la tasa FRR sea baja. Este nivel de seguridad podría ser aplicado por ejemplo en un parking con un control de acceso supervisado, donde es más importante que no se bloquee el acceso a usuarios permitidos, que evitar que entren intrusos.
- En un sistema de nivel de seguridad medio, los costes de falsa aceptación y falso rechazo pueden ser equivalentes, es decir, $k = 1/2$. En este caso, ambos tipos de errores son penalizados de la misma manera.
- En un sistema de alta seguridad (por ejemplo un banco), el coste de una falsa aceptación será mucho mayor que el de un falso rechazo. Si suponemos por ejemplo un cociente entre costes de $c_a = 10c_r$, entonces $k = 0.909$. En este caso los impostores deben ser rechazados en cualquier caso, en detrimento de que aumente el número de falsos rechazos.

Estas tres situaciones son presentadas en la Tabla 2. Como puede verse, el número de FAR decrece cuando el coste de una falsa aceptación se incrementa. Se ha observado que en el caso del clasificador RBF, la tasa de FAR cae por debajo del 0.31%, mientras que en el caso del SVM llega a un valor nulo.

Para una mejor observación del funcionamiento del sistema para varios valores del umbral de aceptación w , se ha representado en la Figura A. 4 una curva ROC (Receiver Operating Characteristic). El clasificador SVM (cuadrados) alcanza un valor menor de FAR para el mismo FRR, que el clasificador RBF (círculos). La escala de la gráfica ha sido aumentada para distinguir mejor ambas curvas.

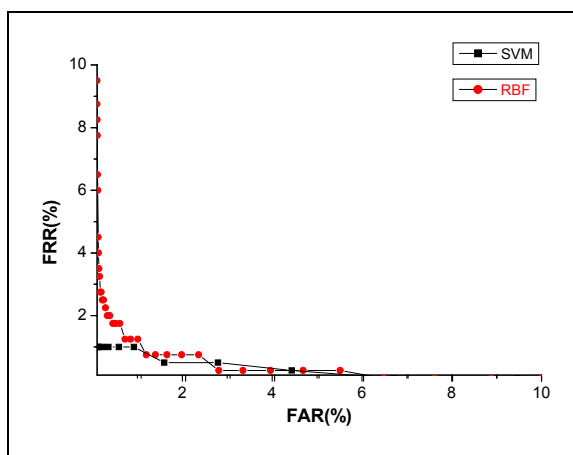


Figura A. 4. Curva ROC del sistema verificador. Clasificador SVM (cuadrados) y RBF (círculos). Se representa una variación de los FRR y FAR del 0% al 100%.

En la Figura A. 5 , se ha presentado una curva DET, donde los ejes son representados en escala logarítmica, permitiendo una mejor observación de las curvas. Como puede verse, en el caso del clasificador SVM el resultado es mejor, con un $EER(SVM) = 0.99$, mientras $EER(RBF) = 2.43$.

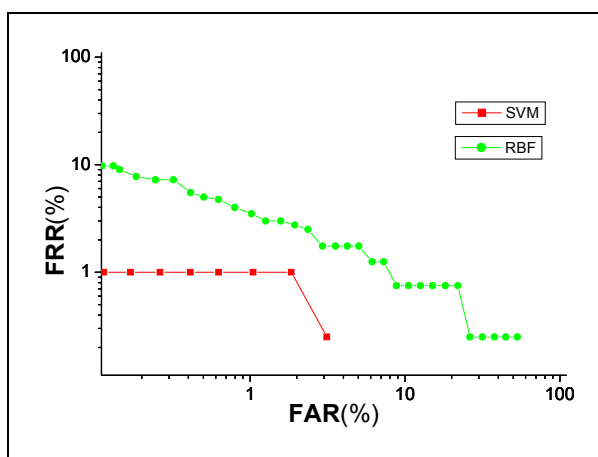


Figura A. 5. Curva DET del sistema verificador. Resultados del clasificador SVM (cuadrados) y RBF (círculos).

A.4.- Discusión

En este Anexo se ha mostrado un módulo innovador correspondiente a un sistema de verificación facial, que permite una evaluación automática del valor del umbral de aceptación óptimo mediante técnicas de cribado bayesiano. De este modo, el nivel de seguridad del sistema puede ser modificado, manteniendo un número de fallos mínimo.

Mediante el algoritmo propuesto, se permite al usuario del sistema introducir el coste asumido para los dos tipos de errores posibles: falsa aceptación y falso rechazo. El nivel de seguridad se da de un modo muy intuitivo, en forma de cociente de costes de ambos errores. El sistema propuesto por lo tanto tiene esa capacidad de trabajar a diferentes niveles de seguridad en función de los requerimientos del usuario.

El método propuesto es válido para cualquier sistema de verificación facial, independientemente del clasificador utilizado. Su integración dentro del sistema verificador es muy sencilla, como ha sido mostrado. De este modo, cualquier sistema verificador puede adaptarse a su entorno y a las condiciones específicas de la aplicación deseada.

Anexo B

Paralelización de la Verificación Facial 3D.

El proceso de normalización y verificación facial tridimensional basado en clasificación de Spin Images y el algoritmo ICP (Iterative Closest Point) es un proceso complejo. Como se ha descrito en los Capítulos 4 y 5, consta de una serie de pasos en los que se han de realizar búsquedas en los puntos del mallado 3D, generación de las correspondientes Spin Images, emparejamiento de puntos más cercanos, etc. Estos procesos son muy costosos computacionalmente, y deben ser realizados de manera iterativa.

Considerando el tamaño de la base de datos FRAV3D (105 individuos, con 16 capturas por persona), y el gran número de pruebas a realizar (cada sujeto es verificado contra el resto de la base de datos, en cada una de las condiciones de adquisición), se decidió paralelizar el proceso.

Para proceder a la paralelización se utilizó el cluster Hydra de la Universidad Rey Juan Carlos. Un cluster es un conjunto de ordenadores unidos mediante una red de alta velocidad, de tal forma que el conjunto de ordenadores se comporta como un ordenador único muy potente de cara al usuario. En la Figura B. 1 puede verse el esquema de conexión del cluster Hydra.

Hydra está formado por 40 ordenadores tipo PC, con las siguientes características:

- Procesador AMD Athlon XP a 2Ghz

- 512 MB de memoria DDR-RAM
- Disco duro de 92 GB. en RAID compartido por todos los nodos por NFS
- Disco duro independiente para cada nodo
- Doble conexión de red interna, Myrinet y Fast Ethernet
- Sistema operativo RedHat Linux 7.3 recompilado con optimizaciones para Athlon
- Librerías de comunicación mediante paso de mensajes MPICH y LAM-MPI
- Gestor de trabajos OpenPBS

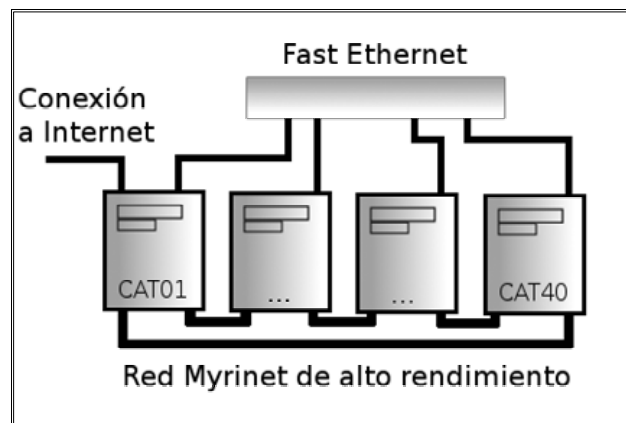


Figura B. 1. Esquema de conexión del cluster Hydra (Universidad Rey Juan Carlos) utilizado en la ejecución en paralelo de la verificación facial 3D.

En cuanto a la interconexión entre los nodos, Hydra posee una doble red de comunicaciones: una red Myrinet de muy alto rendimiento (especialmente indicada para el paso de mensajes entre aplicaciones distribuidas), y una red Fast-Ethernet (para el resto de tareas administrativas).

En la figura B.2 puede verse el diagrama de los distintos módulos que componen el sistema completo. Se decidió paralelizar los módulos correspondientes al procesamiento 3D (normalización y verificación, redondeados en rojo), que son los que mostraron un mayor tiempo de ejecución. No se contempló la necesidad de la paralelización de los sistemas verificadores 2D y 2.5D, ya que el tiempo de ejecución era significativamente menor en estos casos.

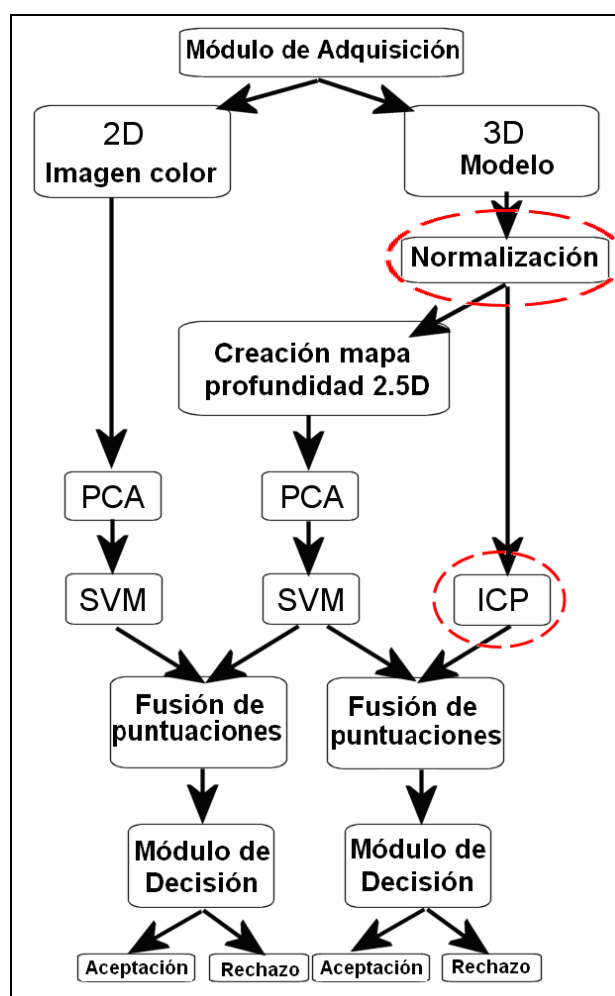


Figura B. 2. Arquitectura del sistema completo. Se señalan en rojo los dos procesos paralelizados: Normalización y Verificación 3D con ICP.

El proceso de normalización y verificación 3D consiste en 1680 pruebas diferentes (105 (individuos) x 16 (imágenes)). El tiempo de realización de estas pruebas, no será el mismo para todas, ya que el tiempo de ejecución del proceso de normalización mediante spin images depende del número de puntos candidatos considerados. En el caso de imágenes frontales, rápidamente se considera como candidato el punto característico y éste es localizado. En el caso de imágenes muy giradas, el número de puntos candidatos considerados hasta llegar al punto buscado es mayor, por lo que el proceso llevará más tiempo. En el caso de la verificación 3D, el tiempo también depende de las condiciones de adquisición de los datos. Una cara girada tendrá que realizar más iteraciones en el algoritmo ICP que una cara frontal. A pesar de que la verificación 3D se realiza tras la

normalización, las imágenes giradas no llegan a poseer una calidad igual a las frontales, por lo que su verificación se ve ralentizada.

Cada una de estas pruebas puede ser generada de manera independiente, lo cual permite la paralelización empleando técnicas de muy alto nivel, sin necesidad de emplear programas especialmente diseñados para sistemas multiprocesador. En la Tabla B. 1 se muestra el Análisis de tiempos del problema no paralelizado, en el caso de un subconjunto de la Base de datos FRAV3D de únicamente dos individuos. Esto hace un total de 32 capturas a normalizar y verificar. Estas pruebas fueron realizadas primero en un único nodo del cluster. Como ya hemos dicho, el tiempo de ejecución por imagen depende de las condiciones de adquisición. En la tabla se muestra un tiempo medio por captura. Como puede verse, el tiempo de procesamiento es considerable, por lo que resulta importante acortar este proceso.

Tabla B. 1. Tiempos de ejecución de la normalización y verificación 3D en un nodo del cluster. Las pruebas son realizadas con un subconjunto de la BBDD de dos individuos.

		Subtarea	Duración por Subtareas	Duración por tareas
NORMALIZACIÓN	Por Imagen	Localización nariz	11.6 sg.	1m.28sg.
		Localización lagrimales	55 sg.	
		Corrección posición facial y eliminación de fondo y ruido	21.3sg.	
	BBDD dos individuos (32 imágenes)			46m.56sg.
VERIFICACIÓN 3D	Verificación 3D por imagen			1m.27sg.
	Verificación 3D dos individuos (64 pruebas, cada modelo es comparado con las 16 imágenes propias y las 16 imágenes de los otros individuos)			1h.32m.48sg.
TOTAL BBDD dos personas				2h.19m.44sg.

Se decidió paralelizar el proceso mediante la generación de resultados de las 1680 pruebas diferentes como 1680 problemas independientes, y dividir la resolución de los mismos en varios nodos del cluster. La ejecución de estas tareas se realizó con el gestor de trabajos OpenPBS (*Portable Batch System*). Este gestor reparte automáticamente las tareas entre los nodos libre del

cluster. El tiempo de ejecución dependerá del número de nodos disponibles en el sistema. En la Tabla B. 2 puede verse una ejecución del subconjunto de la Base de Datos de dos individuos usado anteriormente, disponiendo de 16 nodos de ejecución libres.

Tabla B. 2. Tiempos de ejecución de la normalización y verificación 3D en 16 nodos del cluster mediante el gestor de colas. Las pruebas son realizadas con un subconjunto de la BBDD de dos individuos.

Tarea global	Duración por tareas
Normalización 32 capturas	5m.11 sg.
Verificación 3D.32 capturas (64 pruebas de verificación)	10m.34sg.
TOTAL	15m.45sg.

Para medir la mejora en el rendimiento introducida por la paralelización, calculamos el factor de speed-up:

$$S = \frac{t. \text{ejecución en un nodo}}{t. \text{ejecución en los 16 nodos disponibles}} = 8.87$$

Anexo C

Resultados Experimentales Completos.

En este Anexo se presentan los resultados experimentales completos, tanto de los sistemas verificadores individuales 2D, 2.5D y 3D, así como los resultados de los sistemas fusionados 2D+2.5D y 2.5D+3D. Se presentarán los resultados de cada una de las quince pruebas realizadas (Tabla C. 1).

Tabla C. 1. Pruebas realizadas en el Verificador 2D, 2.5D y 3D. Número y tipo de imágenes que forman en cada caso el conjunto de entrenamiento y de test (en el caso de los Verificadores 2D y 2.5D). En el caso del Verificador 3D el modelo de entrenamiento es siempre frontal, y el conjunto de prueba es el presentado.

PRUEBA	Conjunto entrenamiento	Conjunto de test
1	3 frontal	1 frente
2	4 frontal	1 gestos (sonrisa)
3	4 frontal	1 gestos (boca abierta)
4	4 frontal	2 iluminación
5	4 frontal	2 giro Y 5°
6	4 frontal	1 giro Z (leve)
7	4 frontal	2 giro X
8	4 frontal	2 giro Y 25°
9	4 frontal	1 giro Z (severo)
10	4 frontal - 2 iluminación	2 frontal
11	3 frontal - 1 Giro Y 5°	1 frontal - 1 giro Y 5°
12	3 frontal - 1 Giro Y 5° - 1 iluminación	1 frontal - 1 giro Y 5° - 1 iluminación
13	3 frontal - 1 Giro Y 5° - 1 iluminación	1 frontal - 1 giro Y 5° - 1 iluminación 1 gestos (sonrisa)
14	4 frontal	2 gestos
15	2 frontal	2 frontal

C.1.- Verificador 2D.

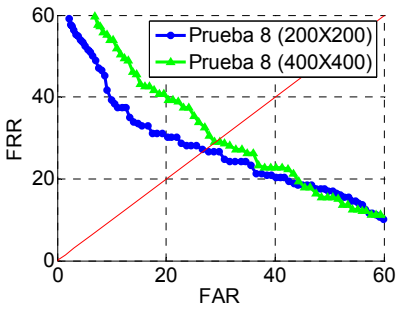
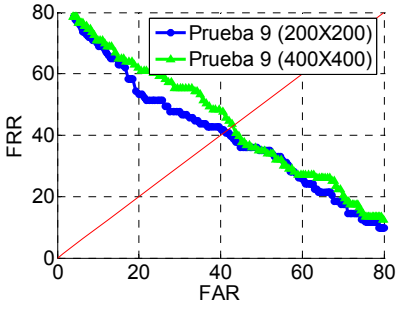
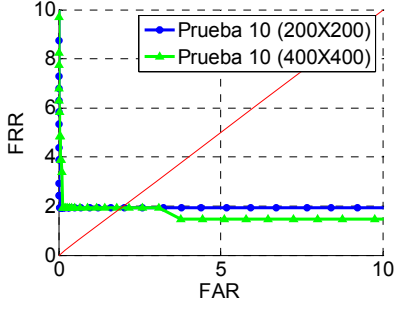
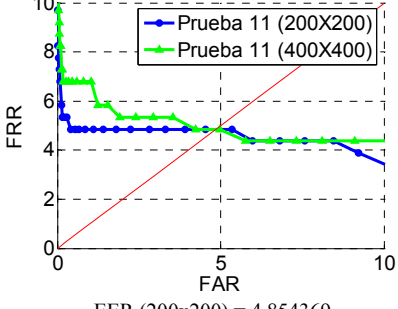
En este apartado se van a presentar las curvas ROC correspondientes a la verificación 2D (color) para cada una de las quince pruebas realizadas. Se han realizado pruebas con dos tamaños de imagen distintos: 200x200 y 400x400 píxeles. Se presentará en cada gráfica ROC los resultados obtenidos para ambos tamaños, así como el valor del EER obtenido en cada caso.

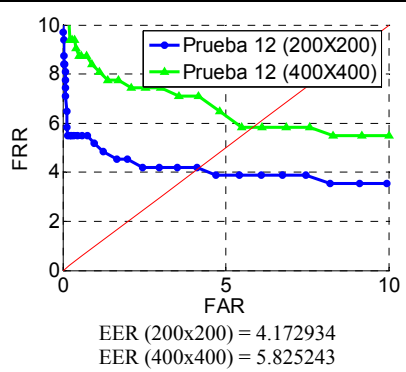
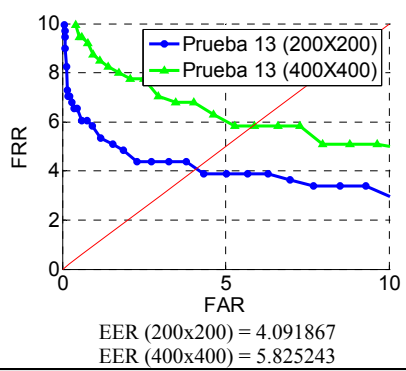
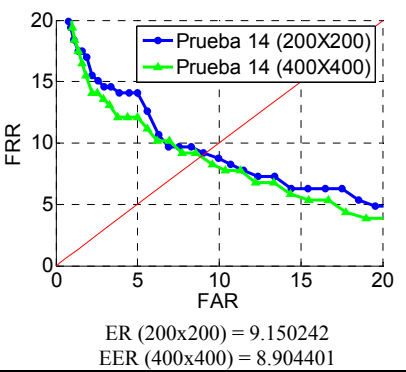
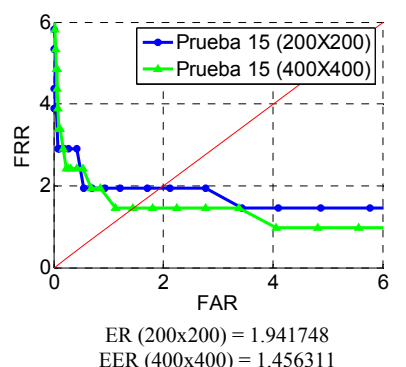
Tabla C. 2. Resultados Verificador 2D (color). Para cada prueba y tamaño de imagen, se presentan de izquierda a derecha: curva ROC y EER (%), datos numéricos en torno al EER: Umbral de aceptación, Tasa de Falso Rechazo (FRR) y Tasa de Falsa Aceptación (FAR).

CURVA ROC	200x200 píxeles	400x400 píxeles																																																																								
PRUEBA 1																																																																										
<p>EER (200x200) = 2.9126; EER (400x400) = 1.9417</p>	<table border="1"> <thead> <tr> <th>UMBRAL</th> <th>FRR</th> <th>FAR</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>-7.6000</td><td>0.9709</td><td>90.0533</td></tr> <tr><td>-6.9000</td><td>0.9709</td><td>88.1211</td></tr> <tr><td>-6.2000</td><td>0.9709</td><td>85.0466</td></tr> <tr><td>-5.5000</td><td>0.9709</td><td>81.0394</td></tr> <tr><td>-4.8000</td><td>0.9709</td><td>74.9096</td></tr> <tr><td>-4.1000</td><td>0.9709</td><td>65.5816</td></tr> <tr><td>-3.4000</td><td>1.9417</td><td>52.3606</td></tr> <tr><td>-2.7000</td><td>1.9417</td><td>36.8932</td></tr> <tr><td>-2.0000</td><td>1.9417</td><td>20.0838</td></tr> <tr><td>-1.3000</td><td>2.9126</td><td>5.3588</td></tr> <tr><td>-0.6000</td><td>2.9126</td><td>0.0761</td></tr> </tbody> </table>	UMBRAL	FRR	FAR	-7.6000	0.9709	90.0533	-6.9000	0.9709	88.1211	-6.2000	0.9709	85.0466	-5.5000	0.9709	81.0394	-4.8000	0.9709	74.9096	-4.1000	0.9709	65.5816	-3.4000	1.9417	52.3606	-2.7000	1.9417	36.8932	-2.0000	1.9417	20.0838	-1.3000	2.9126	5.3588	-0.6000	2.9126	0.0761	<table border="1"> <thead> <tr> <th>UMBRAL</th> <th>FRR</th> <th>FAR</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>-2.3500</td><td>0.9709</td><td>30.0305</td></tr> <tr><td>-2.1500</td><td>0.9709</td><td>24.2338</td></tr> <tr><td>-1.9500</td><td>0.9709</td><td>18.8083</td></tr> <tr><td>-1.7500</td><td>1.9417</td><td>14.3061</td></tr> <tr><td>-1.5500</td><td>1.9417</td><td>9.9657</td></tr> <tr><td>-1.3500</td><td>1.9417</td><td>6.3392</td></tr> <tr><td>-1.1500</td><td>1.9417</td><td>3.2362</td></tr> <tr><td>-0.9500</td><td>1.9417</td><td>1.2850</td></tr> <tr><td>-0.7500</td><td>1.9417</td><td>0.4283</td></tr> <tr><td>-0.5500</td><td>2.9126</td><td>0.1523</td></tr> <tr><td>-0.3500</td><td>2.9126</td><td>0.0571</td></tr> </tbody> </table>	UMBRAL	FRR	FAR	-2.3500	0.9709	30.0305	-2.1500	0.9709	24.2338	-1.9500	0.9709	18.8083	-1.7500	1.9417	14.3061	-1.5500	1.9417	9.9657	-1.3500	1.9417	6.3392	-1.1500	1.9417	3.2362	-0.9500	1.9417	1.2850	-0.7500	1.9417	0.4283	-0.5500	2.9126	0.1523	-0.3500	2.9126	0.0571
	UMBRAL	FRR	FAR																																																																							
	-7.6000	0.9709	90.0533																																																																							
	-6.9000	0.9709	88.1211																																																																							
	-6.2000	0.9709	85.0466																																																																							
	-5.5000	0.9709	81.0394																																																																							
	-4.8000	0.9709	74.9096																																																																							
	-4.1000	0.9709	65.5816																																																																							
	-3.4000	1.9417	52.3606																																																																							
	-2.7000	1.9417	36.8932																																																																							
	-2.0000	1.9417	20.0838																																																																							
	-1.3000	2.9126	5.3588																																																																							
	-0.6000	2.9126	0.0761																																																																							
UMBRAL	FRR	FAR																																																																								
-2.3500	0.9709	30.0305																																																																								
-2.1500	0.9709	24.2338																																																																								
-1.9500	0.9709	18.8083																																																																								
-1.7500	1.9417	14.3061																																																																								
-1.5500	1.9417	9.9657																																																																								
-1.3500	1.9417	6.3392																																																																								
-1.1500	1.9417	3.2362																																																																								
-0.9500	1.9417	1.2850																																																																								
-0.7500	1.9417	0.4283																																																																								
-0.5500	2.9126	0.1523																																																																								
-0.3500	2.9126	0.0571																																																																								
PRUEBA 2																																																																										
<p>EER (200x200) = 5.1328; EER (400x400) = 6.79611</p>	<table border="1"> <thead> <tr> <th>UMBRAL</th> <th>FRR</th> <th>FAR</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>-3.1500</td><td>0.9709</td><td>40.9004</td></tr> <tr><td>-2.8000</td><td>0.9709</td><td>32.6480</td></tr> <tr><td>-2.4500</td><td>1.9417</td><td>24.2814</td></tr> <tr><td>-2.1000</td><td>1.9417</td><td>16.4763</td></tr> <tr><td>-1.7500</td><td>1.9417</td><td>9.1281</td></tr> <tr><td>-1.4000</td><td>5.8252</td><td>4.3309</td></tr> <tr><td>-1.0500</td><td>7.7670</td><td>1.2659</td></tr> <tr><td>-0.7000</td><td>13.5922</td><td>0.3046</td></tr> <tr><td>-0.3500</td><td>16.5049</td><td>0.0476</td></tr> <tr><td>0.0000</td><td>22.3301</td><td>0.0190</td></tr> <tr><td>0.3500</td><td>37.8641</td><td>0.0095</td></tr> </tbody> </table>	UMBRAL	FRR	FAR	-3.1500	0.9709	40.9004	-2.8000	0.9709	32.6480	-2.4500	1.9417	24.2814	-2.1000	1.9417	16.4763	-1.7500	1.9417	9.1281	-1.4000	5.8252	4.3309	-1.0500	7.7670	1.2659	-0.7000	13.5922	0.3046	-0.3500	16.5049	0.0476	0.0000	22.3301	0.0190	0.3500	37.8641	0.0095	<table border="1"> <thead> <tr> <th>UMBRAL</th> <th>FRR</th> <th>FAR</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>-2.8000</td><td>0.9709</td><td>39.1586</td></tr> <tr><td>-2.5000</td><td>1.9417</td><td>30.3160</td></tr> <tr><td>-2.2000</td><td>2.9126</td><td>22.1588</td></tr> <tr><td>-1.9000</td><td>4.8544</td><td>14.4965</td></tr> <tr><td>-1.6000</td><td>6.7961</td><td>8.5856</td></tr> <tr><td>-1.3000</td><td>7.7670</td><td>4.1310</td></tr> <tr><td>-1.0000</td><td>7.7670</td><td>1.5610</td></tr> <tr><td>-0.7000</td><td>12.6214</td><td>0.4854</td></tr> <tr><td>-0.4000</td><td>15.5340</td><td>0.1333</td></tr> <tr><td>-0.1000</td><td>23.3010</td><td>0.0571</td></tr> <tr><td>0.2000</td><td>34.9515</td><td>0.0190</td></tr> </tbody> </table>	UMBRAL	FRR	FAR	-2.8000	0.9709	39.1586	-2.5000	1.9417	30.3160	-2.2000	2.9126	22.1588	-1.9000	4.8544	14.4965	-1.6000	6.7961	8.5856	-1.3000	7.7670	4.1310	-1.0000	7.7670	1.5610	-0.7000	12.6214	0.4854	-0.4000	15.5340	0.1333	-0.1000	23.3010	0.0571	0.2000	34.9515	0.0190
	UMBRAL	FRR	FAR																																																																							
	-3.1500	0.9709	40.9004																																																																							
	-2.8000	0.9709	32.6480																																																																							
	-2.4500	1.9417	24.2814																																																																							
	-2.1000	1.9417	16.4763																																																																							
	-1.7500	1.9417	9.1281																																																																							
	-1.4000	5.8252	4.3309																																																																							
	-1.0500	7.7670	1.2659																																																																							
	-0.7000	13.5922	0.3046																																																																							
	-0.3500	16.5049	0.0476																																																																							
	0.0000	22.3301	0.0190																																																																							
	0.3500	37.8641	0.0095																																																																							
UMBRAL	FRR	FAR																																																																								
-2.8000	0.9709	39.1586																																																																								
-2.5000	1.9417	30.3160																																																																								
-2.2000	2.9126	22.1588																																																																								
-1.9000	4.8544	14.4965																																																																								
-1.6000	6.7961	8.5856																																																																								
-1.3000	7.7670	4.1310																																																																								
-1.0000	7.7670	1.5610																																																																								
-0.7000	12.6214	0.4854																																																																								
-0.4000	15.5340	0.1333																																																																								
-0.1000	23.3010	0.0571																																																																								
0.2000	34.9515	0.0190																																																																								
PRUEBA 3																																																																										
<p>EER (200x200) = 12.621359 EER (400x400) = 10.679611</p>	<table border="1"> <thead> <tr> <th>UMBRAL</th> <th>FRR</th> <th>FAR</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>-7.4500</td><td>0.9709</td><td>88.4161</td></tr> <tr><td>-6.7000</td><td>1.9417</td><td>85.2465</td></tr> <tr><td>-5.9500</td><td>1.9417</td><td>80.8110</td></tr> <tr><td>-5.2000</td><td>1.9417</td><td>73.7483</td></tr> <tr><td>-4.4500</td><td>1.9417</td><td>63.6398</td></tr> <tr><td>-3.7000</td><td>1.9417</td><td>49.4289</td></tr> <tr><td>-2.9500</td><td>5.8252</td><td>32.3815</td></tr> <tr><td>-2.2000</td><td>10.6796</td><td>16.2574</td></tr> <tr><td>-1.4500</td><td>22.3301</td><td>5.1209</td></tr> <tr><td>-0.7000</td><td>34.9515</td><td>0.6187</td></tr> <tr><td>0.0500</td><td>66.0194</td><td>0.0381</td></tr> </tbody> </table>	UMBRAL	FRR	FAR	-7.4500	0.9709	88.4161	-6.7000	1.9417	85.2465	-5.9500	1.9417	80.8110	-5.2000	1.9417	73.7483	-4.4500	1.9417	63.6398	-3.7000	1.9417	49.4289	-2.9500	5.8252	32.3815	-2.2000	10.6796	16.2574	-1.4500	22.3301	5.1209	-0.7000	34.9515	0.6187	0.0500	66.0194	0.0381	<table border="1"> <thead> <tr> <th>UMBRAL</th> <th>FRR</th> <th>FAR</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>-3.1000</td><td>0.9709</td><td>45.3455</td></tr> <tr><td>-2.7500</td><td>1.9417</td><td>35.7891</td></tr> <tr><td>-2.4000</td><td>4.8544</td><td>26.0423</td></tr> <tr><td>-2.0500</td><td>5.8252</td><td>17.3520</td></tr> <tr><td>-1.7000</td><td>10.6796</td><td>10.1275</td></tr> <tr><td>-1.3500</td><td>16.5049</td><td>5.2256</td></tr> <tr><td>-1.0000</td><td>23.3010</td><td>2.1512</td></tr> <tr><td>-0.6500</td><td>33.0097</td><td>0.7805</td></tr> <tr><td>-0.3000</td><td>49.5146</td><td>0.1808</td></tr> <tr><td>0.0500</td><td>63.1068</td><td>0.0286</td></tr> <tr><td>0.4000</td><td>77.6699</td><td>0.0190</td></tr> </tbody> </table>	UMBRAL	FRR	FAR	-3.1000	0.9709	45.3455	-2.7500	1.9417	35.7891	-2.4000	4.8544	26.0423	-2.0500	5.8252	17.3520	-1.7000	10.6796	10.1275	-1.3500	16.5049	5.2256	-1.0000	23.3010	2.1512	-0.6500	33.0097	0.7805	-0.3000	49.5146	0.1808	0.0500	63.1068	0.0286	0.4000	77.6699	0.0190
	UMBRAL	FRR	FAR																																																																							
	-7.4500	0.9709	88.4161																																																																							
	-6.7000	1.9417	85.2465																																																																							
	-5.9500	1.9417	80.8110																																																																							
	-5.2000	1.9417	73.7483																																																																							
	-4.4500	1.9417	63.6398																																																																							
	-3.7000	1.9417	49.4289																																																																							
	-2.9500	5.8252	32.3815																																																																							
	-2.2000	10.6796	16.2574																																																																							
	-1.4500	22.3301	5.1209																																																																							
	-0.7000	34.9515	0.6187																																																																							
	0.0500	66.0194	0.0381																																																																							
UMBRAL	FRR	FAR																																																																								
-3.1000	0.9709	45.3455																																																																								
-2.7500	1.9417	35.7891																																																																								
-2.4000	4.8544	26.0423																																																																								
-2.0500	5.8252	17.3520																																																																								
-1.7000	10.6796	10.1275																																																																								
-1.3500	16.5049	5.2256																																																																								
-1.0000	23.3010	2.1512																																																																								
-0.6500	33.0097	0.7805																																																																								
-0.3000	49.5146	0.1808																																																																								
0.0500	63.1068	0.0286																																																																								
0.4000	77.6699	0.0190																																																																								

CURVA ROC	200x200 píxeles	400x400 píxeles																																																																								
PRUEBA 4																																																																										
<p>EER (200x200) = 8.697715 EER (400x400) = 14.549528</p>	<table border="1"> <thead> <tr> <th>UMBRAL</th> <th>FRR</th> <th>FAR</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>-8.7000</td><td>0.4854</td><td>91.5429</td></tr> <tr><td>-7.6000</td><td>1.4563</td><td>88.1306</td></tr> <tr><td>-6.5000</td><td>1.4563</td><td>83.1430</td></tr> <tr><td>-5.4000</td><td>2.9126</td><td>75.4378</td></tr> <tr><td>-4.3000</td><td>3.8835</td><td>62.6642</td></tr> <tr><td>-3.2000</td><td>4.8544</td><td>42.9231</td></tr> <tr><td>-2.1000</td><td>7.2816</td><td>18.0611</td></tr> <tr><td>-1.0000</td><td>12.1359</td><td>1.8989</td></tr> <tr><td>0.1000</td><td>26.2136</td><td>0.0809</td></tr> <tr><td>1.2000</td><td>91.7476</td><td>0.0190</td></tr> <tr><td>2.3000</td><td>100.0000</td><td>0.0048</td></tr> </tbody> </table>	UMBRAL	FRR	FAR	-8.7000	0.4854	91.5429	-7.6000	1.4563	88.1306	-6.5000	1.4563	83.1430	-5.4000	2.9126	75.4378	-4.3000	3.8835	62.6642	-3.2000	4.8544	42.9231	-2.1000	7.2816	18.0611	-1.0000	12.1359	1.8989	0.1000	26.2136	0.0809	1.2000	91.7476	0.0190	2.3000	100.0000	0.0048	<table border="1"> <thead> <tr> <th>UMBRAL</th> <th>FRR</th> <th>FAR</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>-10.0000</td><td>2.9126</td><td>96.9827</td></tr> <tr><td>-8.9000</td><td>2.9126</td><td>95.6453</td></tr> <tr><td>-7.8000</td><td>3.8835</td><td>93.7940</td></tr> <tr><td>-6.7000</td><td>3.8835</td><td>90.1247</td></tr> <tr><td>-5.6000</td><td>5.8252</td><td>83.3428</td></tr> <tr><td>-4.5000</td><td>8.7379</td><td>71.2926</td></tr> <tr><td>-3.4000</td><td>10.1942</td><td>51.5943</td></tr> <tr><td>-2.3000</td><td>11.6505</td><td>24.7049</td></tr> <tr><td>-1.2000</td><td>16.0194</td><td>4.0168</td></tr> <tr><td>-0.1000</td><td>26.6990</td><td>0.1618</td></tr> <tr><td>1.0000</td><td>81.5534</td><td>0.0048</td></tr> </tbody> </table>	UMBRAL	FRR	FAR	-10.0000	2.9126	96.9827	-8.9000	2.9126	95.6453	-7.8000	3.8835	93.7940	-6.7000	3.8835	90.1247	-5.6000	5.8252	83.3428	-4.5000	8.7379	71.2926	-3.4000	10.1942	51.5943	-2.3000	11.6505	24.7049	-1.2000	16.0194	4.0168	-0.1000	26.6990	0.1618	1.0000	81.5534	0.0048
UMBRAL	FRR	FAR																																																																								
-8.7000	0.4854	91.5429																																																																								
-7.6000	1.4563	88.1306																																																																								
-6.5000	1.4563	83.1430																																																																								
-5.4000	2.9126	75.4378																																																																								
-4.3000	3.8835	62.6642																																																																								
-3.2000	4.8544	42.9231																																																																								
-2.1000	7.2816	18.0611																																																																								
-1.0000	12.1359	1.8989																																																																								
0.1000	26.2136	0.0809																																																																								
1.2000	91.7476	0.0190																																																																								
2.3000	100.0000	0.0048																																																																								
UMBRAL	FRR	FAR																																																																								
-10.0000	2.9126	96.9827																																																																								
-8.9000	2.9126	95.6453																																																																								
-7.8000	3.8835	93.7940																																																																								
-6.7000	3.8835	90.1247																																																																								
-5.6000	5.8252	83.3428																																																																								
-4.5000	8.7379	71.2926																																																																								
-3.4000	10.1942	51.5943																																																																								
-2.3000	11.6505	24.7049																																																																								
-1.2000	16.0194	4.0168																																																																								
-0.1000	26.6990	0.1618																																																																								
1.0000	81.5534	0.0048																																																																								
PRUEBA 5																																																																										
<p>EER (200x200) = 14.604865 EER (400x400) = 17.902800</p>	<table border="1"> <thead> <tr> <th>UMBRAL</th> <th>FRR</th> <th>FAR</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>-9.3500</td><td>0.4854</td><td>92.3568</td></tr> <tr><td>-8.3500</td><td>0.4854</td><td>89.1824</td></tr> <tr><td>-7.3500</td><td>0.4854</td><td>84.9800</td></tr> <tr><td>-6.3500</td><td>1.4563</td><td>78.4742</td></tr> <tr><td>-5.3500</td><td>2.4272</td><td>69.0510</td></tr> <tr><td>-4.3500</td><td>2.9126</td><td>55.3303</td></tr> <tr><td>-3.3500</td><td>7.7670</td><td>35.1894</td></tr> <tr><td>-2.3500</td><td>14.5631</td><td>14.6393</td></tr> <tr><td>-1.3500</td><td>32.0388</td><td>2.4557</td></tr> <tr><td>-0.3500</td><td>63.5922</td><td>0.2142</td></tr> <tr><td>0.6500</td><td>96.6019</td><td>0.0190</td></tr> </tbody> </table>	UMBRAL	FRR	FAR	-9.3500	0.4854	92.3568	-8.3500	0.4854	89.1824	-7.3500	0.4854	84.9800	-6.3500	1.4563	78.4742	-5.3500	2.4272	69.0510	-4.3500	2.9126	55.3303	-3.3500	7.7670	35.1894	-2.3500	14.5631	14.6393	-1.3500	32.0388	2.4557	-0.3500	63.5922	0.2142	0.6500	96.6019	0.0190	<table border="1"> <thead> <tr> <th>UMBRAL</th> <th>FRR</th> <th>FAR</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>-6.3500</td><td>0.4854</td><td>89.3965</td></tr> <tr><td>-5.6500</td><td>0.4854</td><td>83.4523</td></tr> <tr><td>-4.9500</td><td>1.4563</td><td>74.9524</td></tr> <tr><td>-4.2500</td><td>3.3981</td><td>62.7499</td></tr> <tr><td>-3.5500</td><td>5.3398</td><td>46.7875</td></tr> <tr><td>-2.8500</td><td>10.6796</td><td>29.3118</td></tr> <tr><td>-2.1500</td><td>21.3592</td><td>13.5780</td></tr> <tr><td>-1.4500</td><td>31.5534</td><td>3.6170</td></tr> <tr><td>-0.7500</td><td>50.9709</td><td>0.5806</td></tr> <tr><td>-0.0500</td><td>66.5049</td><td>0.0571</td></tr> <tr><td>0.6500</td><td>92.7184</td><td>0.0095</td></tr> </tbody> </table>	UMBRAL	FRR	FAR	-6.3500	0.4854	89.3965	-5.6500	0.4854	83.4523	-4.9500	1.4563	74.9524	-4.2500	3.3981	62.7499	-3.5500	5.3398	46.7875	-2.8500	10.6796	29.3118	-2.1500	21.3592	13.5780	-1.4500	31.5534	3.6170	-0.7500	50.9709	0.5806	-0.0500	66.5049	0.0571	0.6500	92.7184	0.0095
UMBRAL	FRR	FAR																																																																								
-9.3500	0.4854	92.3568																																																																								
-8.3500	0.4854	89.1824																																																																								
-7.3500	0.4854	84.9800																																																																								
-6.3500	1.4563	78.4742																																																																								
-5.3500	2.4272	69.0510																																																																								
-4.3500	2.9126	55.3303																																																																								
-3.3500	7.7670	35.1894																																																																								
-2.3500	14.5631	14.6393																																																																								
-1.3500	32.0388	2.4557																																																																								
-0.3500	63.5922	0.2142																																																																								
0.6500	96.6019	0.0190																																																																								
UMBRAL	FRR	FAR																																																																								
-6.3500	0.4854	89.3965																																																																								
-5.6500	0.4854	83.4523																																																																								
-4.9500	1.4563	74.9524																																																																								
-4.2500	3.3981	62.7499																																																																								
-3.5500	5.3398	46.7875																																																																								
-2.8500	10.6796	29.3118																																																																								
-2.1500	21.3592	13.5780																																																																								
-1.4500	31.5534	3.6170																																																																								
-0.7500	50.9709	0.5806																																																																								
-0.0500	66.5049	0.0571																																																																								
0.6500	92.7184	0.0095																																																																								
PRUEBA 6																																																																										
<p>EER (200x200) = 33.928941 EER (400x400) = 36.421636</p>	<table border="1"> <thead> <tr> <th>UMBRAL</th> <th>FRR</th> <th>FAR</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>-10.0000</td><td>2.9126</td><td>89.8725</td></tr> <tr><td>-8.9000</td><td>5.8252</td><td>85.0562</td></tr> <tr><td>-7.8000</td><td>6.7961</td><td>78.4694</td></tr> <tr><td>-6.7000</td><td>9.7087</td><td>70.7405</td></tr> <tr><td>-5.6000</td><td>13.5922</td><td>60.8414</td></tr> <tr><td>-4.5000</td><td>20.3883</td><td>46.3354</td></tr> <tr><td>-3.4000</td><td>37.8641</td><td>27.9840</td></tr> <tr><td>-2.3000</td><td>54.3689</td><td>10.9842</td></tr> <tr><td>-1.2000</td><td>77.6699</td><td>1.5229</td></tr> <tr><td>-0.1000</td><td>95.1456</td><td>0.1142</td></tr> <tr><td>1.0000</td><td>99.0291</td><td>0.0190</td></tr> </tbody> </table>	UMBRAL	FRR	FAR	-10.0000	2.9126	89.8725	-8.9000	5.8252	85.0562	-7.8000	6.7961	78.4694	-6.7000	9.7087	70.7405	-5.6000	13.5922	60.8414	-4.5000	20.3883	46.3354	-3.4000	37.8641	27.9840	-2.3000	54.3689	10.9842	-1.2000	77.6699	1.5229	-0.1000	95.1456	0.1142	1.0000	99.0291	0.0190	<table border="1"> <thead> <tr> <th>UMBRAL</th> <th>FRR</th> <th>FAR</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>-10.0000</td><td>0.9709</td><td>95.9452</td></tr> <tr><td>-8.9000</td><td>2.9126</td><td>92.9469</td></tr> <tr><td>-7.8000</td><td>7.7670</td><td>87.6927</td></tr> <tr><td>-6.7000</td><td>10.6796</td><td>79.8782</td></tr> <tr><td>-5.6000</td><td>20.3883</td><td>68.9225</td></tr> <tr><td>-4.5000</td><td>26.2136</td><td>54.3499</td></tr> <tr><td>-3.4000</td><td>36.8932</td><td>33.7426</td></tr> <tr><td>-2.3000</td><td>60.1942</td><td>13.2401</td></tr> <tr><td>-1.2000</td><td>79.6116</td><td>2.5890</td></tr> <tr><td>-0.1000</td><td>95.1456</td><td>0.1808</td></tr> <tr><td>1.0000</td><td>100.0000</td><td>0.0190</td></tr> </tbody> </table>	UMBRAL	FRR	FAR	-10.0000	0.9709	95.9452	-8.9000	2.9126	92.9469	-7.8000	7.7670	87.6927	-6.7000	10.6796	79.8782	-5.6000	20.3883	68.9225	-4.5000	26.2136	54.3499	-3.4000	36.8932	33.7426	-2.3000	60.1942	13.2401	-1.2000	79.6116	2.5890	-0.1000	95.1456	0.1808	1.0000	100.0000	0.0190
UMBRAL	FRR	FAR																																																																								
-10.0000	2.9126	89.8725																																																																								
-8.9000	5.8252	85.0562																																																																								
-7.8000	6.7961	78.4694																																																																								
-6.7000	9.7087	70.7405																																																																								
-5.6000	13.5922	60.8414																																																																								
-4.5000	20.3883	46.3354																																																																								
-3.4000	37.8641	27.9840																																																																								
-2.3000	54.3689	10.9842																																																																								
-1.2000	77.6699	1.5229																																																																								
-0.1000	95.1456	0.1142																																																																								
1.0000	99.0291	0.0190																																																																								
UMBRAL	FRR	FAR																																																																								
-10.0000	0.9709	95.9452																																																																								
-8.9000	2.9126	92.9469																																																																								
-7.8000	7.7670	87.6927																																																																								
-6.7000	10.6796	79.8782																																																																								
-5.6000	20.3883	68.9225																																																																								
-4.5000	26.2136	54.3499																																																																								
-3.4000	36.8932	33.7426																																																																								
-2.3000	60.1942	13.2401																																																																								
-1.2000	79.6116	2.5890																																																																								
-0.1000	95.1456	0.1808																																																																								
1.0000	100.0000	0.0190																																																																								
PRUEBA 7																																																																										
<p>EER (200x200) = 13.337957 EER (400x400) = 12.621359</p>	<table border="1"> <thead> <tr> <th>UMBRAL</th> <th>FRR</th> <th>FAR</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>-5.5000</td><td>0.4854</td><td>73.3533</td></tr> <tr><td>-4.8500</td><td>1.9417</td><td>66.4525</td></tr> <tr><td>-4.2000</td><td>2.9126</td><td>57.7813</td></tr> <tr><td>-3.5500</td><td>3.3981</td><td>46.3069</td></tr> <tr><td>-2.9000</td><td>6.3107</td><td>32.4862</td></tr> <tr><td>-2.2500</td><td>10.6796</td><td>19.2366</td></tr> <tr><td>-1.6000</td><td>18.4466</td><td>7.7384</td></tr> <tr><td>-0.9500</td><td>31.5534</td><td>1.6467</td></tr> <tr><td>-0.3000</td><td>45.6311</td><td>0.2142</td></tr> <tr><td>0.3500</td><td>65.5340</td><td>0.0190</td></tr> </tbody> </table>	UMBRAL	FRR	FAR	-5.5000	0.4854	73.3533	-4.8500	1.9417	66.4525	-4.2000	2.9126	57.7813	-3.5500	3.3981	46.3069	-2.9000	6.3107	32.4862	-2.2500	10.6796	19.2366	-1.6000	18.4466	7.7384	-0.9500	31.5534	1.6467	-0.3000	45.6311	0.2142	0.3500	65.5340	0.0190	<table border="1"> <thead> <tr> <th>UMBRAL</th> <th>FRR</th> <th>FAR</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>-10.0000</td><td>0.4854</td><td>98.7769</td></tr> <tr><td>-8.9000</td><td>0.4854</td><td>97.8917</td></tr> <tr><td>-7.8000</td><td>0.9709</td><td>96.1927</td></tr> <tr><td>-6.7000</td><td>0.9709</td><td>92.7851</td></tr> <tr><td>-5.6000</td><td>0.9709</td><td>86.0080</td></tr> <tr><td>-4.5000</td><td>1.4563</td><td>73.5342</td></tr> <tr><td>-3.4000</td><td>3.3981</td><td>52.3415</td></tr> <tr><td>-2.3000</td><td>7.7670</td><td>24.8525</td></tr> <tr><td>-1.2000</td><td>19.9029</td><td>4.2975</td></tr> <tr><td>-0.1000</td><td>43.2039</td><td>0.1951</td></tr> <tr><td>1.0000</td><td>90.2913</td><td>0.0095</td></tr> </tbody> </table>	UMBRAL	FRR	FAR	-10.0000	0.4854	98.7769	-8.9000	0.4854	97.8917	-7.8000	0.9709	96.1927	-6.7000	0.9709	92.7851	-5.6000	0.9709	86.0080	-4.5000	1.4563	73.5342	-3.4000	3.3981	52.3415	-2.3000	7.7670	24.8525	-1.2000	19.9029	4.2975	-0.1000	43.2039	0.1951	1.0000	90.2913	0.0095			
UMBRAL	FRR	FAR																																																																								
-5.5000	0.4854	73.3533																																																																								
-4.8500	1.9417	66.4525																																																																								
-4.2000	2.9126	57.7813																																																																								
-3.5500	3.3981	46.3069																																																																								
-2.9000	6.3107	32.4862																																																																								
-2.2500	10.6796	19.2366																																																																								
-1.6000	18.4466	7.7384																																																																								
-0.9500	31.5534	1.6467																																																																								
-0.3000	45.6311	0.2142																																																																								
0.3500	65.5340	0.0190																																																																								
UMBRAL	FRR	FAR																																																																								
-10.0000	0.4854	98.7769																																																																								
-8.9000	0.4854	97.8917																																																																								
-7.8000	0.9709	96.1927																																																																								
-6.7000	0.9709	92.7851																																																																								
-5.6000	0.9709	86.0080																																																																								
-4.5000	1.4563	73.5342																																																																								
-3.4000	3.3981	52.3415																																																																								
-2.3000	7.7670	24.8525																																																																								
-1.2000	19.9029	4.2975																																																																								
-0.1000	43.2039	0.1951																																																																								
1.0000	90.2913	0.0095																																																																								

Anexo C: Resultados experimentales completos

CURVA ROC	200x200 píxeles	400x400 píxeles																																																																											
PRUEBA 8																																																																													
 <p>EER (200x200) = 27.022654 EER (400x400) = 29.126213</p>	<table border="1"> <thead> <tr> <th>UMBRAL</th> <th>FRR</th> <th>FAR</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>-9.4500</td><td>0.4854</td><td>91.3050</td></tr> <tr><td>-8.3000</td><td>0.4854</td><td>86.4601</td></tr> <tr><td>-7.1500</td><td>2.4272</td><td>79.2785</td></tr> <tr><td>-6.0000</td><td>6.3107</td><td>69.2366</td></tr> <tr><td>-4.8500</td><td>13.5922</td><td>55.9633</td></tr> <tr><td>-3.7000</td><td>20.8738</td><td>38.4304</td></tr> <tr><td>-2.5500</td><td>33.0097</td><td>16.5715</td></tr> <tr><td>-1.4000</td><td>56.3107</td><td>3.0126</td></tr> <tr><td>-0.2500</td><td>83.4951</td><td>0.1999</td></tr> <tr><td>0.9000</td><td>98.5437</td><td>0.0095</td></tr> <tr><td>2.0500</td><td>99.5146</td><td>0.0048</td></tr> </tbody> </table>	UMBRAL	FRR	FAR	-9.4500	0.4854	91.3050	-8.3000	0.4854	86.4601	-7.1500	2.4272	79.2785	-6.0000	6.3107	69.2366	-4.8500	13.5922	55.9633	-3.7000	20.8738	38.4304	-2.5500	33.0097	16.5715	-1.4000	56.3107	3.0126	-0.2500	83.4951	0.1999	0.9000	98.5437	0.0095	2.0500	99.5146	0.0048	<table border="1"> <thead> <tr> <th>UMBRAL</th> <th>FRR</th> <th>FAR</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>-7.9000</td><td>0.4854</td><td>93.1801</td></tr> <tr><td>-7.0000</td><td>2.9126</td><td>88.7112</td></tr> <tr><td>-6.1000</td><td>5.8252</td><td>81.9294</td></tr> <tr><td>-5.2000</td><td>7.7670</td><td>71.5591</td></tr> <tr><td>-4.3000</td><td>12.1359</td><td>56.7818</td></tr> <tr><td>-3.4000</td><td>22.8155</td><td>39.1205</td></tr> <tr><td>-2.5000</td><td>39.3204</td><td>21.2022</td></tr> <tr><td>-1.6000</td><td>57.2816</td><td>7.9336</td></tr> <tr><td>-0.7000</td><td>71.3592</td><td>1.3326</td></tr> <tr><td>0.2000</td><td>88.3495</td><td>0.0476</td></tr> </tbody> </table>	UMBRAL	FRR	FAR	-7.9000	0.4854	93.1801	-7.0000	2.9126	88.7112	-6.1000	5.8252	81.9294	-5.2000	7.7670	71.5591	-4.3000	12.1359	56.7818	-3.4000	22.8155	39.1205	-2.5000	39.3204	21.2022	-1.6000	57.2816	7.9336	-0.7000	71.3592	1.3326	0.2000	88.3495	0.0476						
UMBRAL	FRR	FAR																																																																											
-9.4500	0.4854	91.3050																																																																											
-8.3000	0.4854	86.4601																																																																											
-7.1500	2.4272	79.2785																																																																											
-6.0000	6.3107	69.2366																																																																											
-4.8500	13.5922	55.9633																																																																											
-3.7000	20.8738	38.4304																																																																											
-2.5500	33.0097	16.5715																																																																											
-1.4000	56.3107	3.0126																																																																											
-0.2500	83.4951	0.1999																																																																											
0.9000	98.5437	0.0095																																																																											
2.0500	99.5146	0.0048																																																																											
UMBRAL	FRR	FAR																																																																											
-7.9000	0.4854	93.1801																																																																											
-7.0000	2.9126	88.7112																																																																											
-6.1000	5.8252	81.9294																																																																											
-5.2000	7.7670	71.5591																																																																											
-4.3000	12.1359	56.7818																																																																											
-3.4000	22.8155	39.1205																																																																											
-2.5000	39.3204	21.2022																																																																											
-1.6000	57.2816	7.9336																																																																											
-0.7000	71.3592	1.3326																																																																											
0.2000	88.3495	0.0476																																																																											
PRUEBA 9																																																																													
 <p>EER (200x200) = 41.137143 EER (400x400) = 43.009708</p>	<table border="1"> <thead> <tr> <th>UMBRAL</th> <th>FRR</th> <th>FAR</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>-10.0000</td><td>7.7670</td><td>85.1038</td></tr> <tr><td>-8.9000</td><td>9.7087</td><td>79.7259</td></tr> <tr><td>-7.8000</td><td>14.5631</td><td>71.7114</td></tr> <tr><td>-6.7000</td><td>24.2718</td><td>61.8218</td></tr> <tr><td>-5.6000</td><td>34.9515</td><td>50.5997</td></tr> <tr><td>-4.5000</td><td>42.7184</td><td>37.4643</td></tr> <tr><td>-3.4000</td><td>51.4563</td><td>23.2248</td></tr> <tr><td>-2.3000</td><td>68.9320</td><td>10.1085</td></tr> <tr><td>-1.2000</td><td>83.4951</td><td>2.0845</td></tr> <tr><td>-0.1000</td><td>93.2039</td><td>0.2094</td></tr> <tr><td>1.0000</td><td>100.0000</td><td>0.0095</td></tr> </tbody> </table>	UMBRAL	FRR	FAR	-10.0000	7.7670	85.1038	-8.9000	9.7087	79.7259	-7.8000	14.5631	71.7114	-6.7000	24.2718	61.8218	-5.6000	34.9515	50.5997	-4.5000	42.7184	37.4643	-3.4000	51.4563	23.2248	-2.3000	68.9320	10.1085	-1.2000	83.4951	2.0845	-0.1000	93.2039	0.2094	1.0000	100.0000	0.0095	<table border="1"> <thead> <tr> <th>UMBRAL</th> <th>FRR</th> <th>FAR</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>-10.0000</td><td>2.9126</td><td>93.4038</td></tr> <tr><td>-8.9000</td><td>4.8544</td><td>88.5208</td></tr> <tr><td>-7.8000</td><td>8.7379</td><td>81.9246</td></tr> <tr><td>-6.7000</td><td>17.4757</td><td>73.5484</td></tr> <tr><td>-5.6000</td><td>27.1845</td><td>62.2311</td></tr> <tr><td>-4.5000</td><td>36.8932</td><td>47.0303</td></tr> <tr><td>-3.4000</td><td>55.3398</td><td>30.7919</td></tr> <tr><td>-2.3000</td><td>65.0485</td><td>14.8582</td></tr> <tr><td>-1.2000</td><td>78.6408</td><td>4.0643</td></tr> <tr><td>-0.1000</td><td>94.1748</td><td>0.3617</td></tr> <tr><td>1.0000</td><td>100.0000</td><td>0.0095</td></tr> </tbody> </table>	UMBRAL	FRR	FAR	-10.0000	2.9126	93.4038	-8.9000	4.8544	88.5208	-7.8000	8.7379	81.9246	-6.7000	17.4757	73.5484	-5.6000	27.1845	62.2311	-4.5000	36.8932	47.0303	-3.4000	55.3398	30.7919	-2.3000	65.0485	14.8582	-1.2000	78.6408	4.0643	-0.1000	94.1748	0.3617	1.0000	100.0000	0.0095			
UMBRAL	FRR	FAR																																																																											
-10.0000	7.7670	85.1038																																																																											
-8.9000	9.7087	79.7259																																																																											
-7.8000	14.5631	71.7114																																																																											
-6.7000	24.2718	61.8218																																																																											
-5.6000	34.9515	50.5997																																																																											
-4.5000	42.7184	37.4643																																																																											
-3.4000	51.4563	23.2248																																																																											
-2.3000	68.9320	10.1085																																																																											
-1.2000	83.4951	2.0845																																																																											
-0.1000	93.2039	0.2094																																																																											
1.0000	100.0000	0.0095																																																																											
UMBRAL	FRR	FAR																																																																											
-10.0000	2.9126	93.4038																																																																											
-8.9000	4.8544	88.5208																																																																											
-7.8000	8.7379	81.9246																																																																											
-6.7000	17.4757	73.5484																																																																											
-5.6000	27.1845	62.2311																																																																											
-4.5000	36.8932	47.0303																																																																											
-3.4000	55.3398	30.7919																																																																											
-2.3000	65.0485	14.8582																																																																											
-1.2000	78.6408	4.0643																																																																											
-0.1000	94.1748	0.3617																																																																											
1.0000	100.0000	0.0095																																																																											
PRUEBA 10																																																																													
 <p>EER (200x200) = 1.941748 EER (400x400) = 1.941748</p>	<table border="1"> <thead> <tr> <th>UMBRAL</th> <th>FRR</th> <th>FAR</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>-8.6000</td><td>0.4854</td><td>91.4953</td></tr> <tr><td>-7.7500</td><td>0.4854</td><td>89.4822</td></tr> <tr><td>-6.9000</td><td>0.4854</td><td>86.6648</td></tr> <tr><td>-6.0500</td><td>0.4854</td><td>82.2244</td></tr> <tr><td>-5.2000</td><td>0.4854</td><td>75.4331</td></tr> <tr><td>-4.3500</td><td>0.4854</td><td>65.5911</td></tr> <tr><td>-3.5000</td><td>0.4854</td><td>51.1470</td></tr> <tr><td>-2.6500</td><td>0.9709</td><td>31.9960</td></tr> <tr><td>-1.8000</td><td>1.9417</td><td>13.0211</td></tr> <tr><td>-0.9500</td><td>1.9417</td><td>0.9518</td></tr> <tr><td>-0.1000</td><td>4.3689</td><td>0.0143</td></tr> </tbody> </table>	UMBRAL	FRR	FAR	-8.6000	0.4854	91.4953	-7.7500	0.4854	89.4822	-6.9000	0.4854	86.6648	-6.0500	0.4854	82.2244	-5.2000	0.4854	75.4331	-4.3500	0.4854	65.5911	-3.5000	0.4854	51.1470	-2.6500	0.9709	31.9960	-1.8000	1.9417	13.0211	-0.9500	1.9417	0.9518	-0.1000	4.3689	0.0143	<table border="1"> <thead> <tr> <th>UMBRAL</th> <th>FRR</th> <th>FAR</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>-3.2500</td><td>0.4854</td><td>49.8334</td></tr> <tr><td>-2.9500</td><td>0.4854</td><td>41.8570</td></tr> <tr><td>-2.6500</td><td>1.4563</td><td>34.0187</td></tr> <tr><td>-2.3500</td><td>1.4563</td><td>25.7757</td></tr> <tr><td>-2.0500</td><td>1.4563</td><td>18.2229</td></tr> <tr><td>-1.7500</td><td>1.4563</td><td>11.6743</td></tr> <tr><td>-1.4500</td><td>1.4563</td><td>6.4535</td></tr> <tr><td>-1.1500</td><td>1.9417</td><td>2.5938</td></tr> <tr><td>-0.8500</td><td>1.9417</td><td>0.6710</td></tr> <tr><td>-0.5500</td><td>1.9417</td><td>0.1808</td></tr> <tr><td>-0.2500</td><td>4.8544</td><td>0.0524</td></tr> <tr><td>0.0500</td><td>6.7961</td><td>0.0048</td></tr> </tbody> </table>	UMBRAL	FRR	FAR	-3.2500	0.4854	49.8334	-2.9500	0.4854	41.8570	-2.6500	1.4563	34.0187	-2.3500	1.4563	25.7757	-2.0500	1.4563	18.2229	-1.7500	1.4563	11.6743	-1.4500	1.4563	6.4535	-1.1500	1.9417	2.5938	-0.8500	1.9417	0.6710	-0.5500	1.9417	0.1808	-0.2500	4.8544	0.0524	0.0500	6.7961	0.0048
UMBRAL	FRR	FAR																																																																											
-8.6000	0.4854	91.4953																																																																											
-7.7500	0.4854	89.4822																																																																											
-6.9000	0.4854	86.6648																																																																											
-6.0500	0.4854	82.2244																																																																											
-5.2000	0.4854	75.4331																																																																											
-4.3500	0.4854	65.5911																																																																											
-3.5000	0.4854	51.1470																																																																											
-2.6500	0.9709	31.9960																																																																											
-1.8000	1.9417	13.0211																																																																											
-0.9500	1.9417	0.9518																																																																											
-0.1000	4.3689	0.0143																																																																											
UMBRAL	FRR	FAR																																																																											
-3.2500	0.4854	49.8334																																																																											
-2.9500	0.4854	41.8570																																																																											
-2.6500	1.4563	34.0187																																																																											
-2.3500	1.4563	25.7757																																																																											
-2.0500	1.4563	18.2229																																																																											
-1.7500	1.4563	11.6743																																																																											
-1.4500	1.4563	6.4535																																																																											
-1.1500	1.9417	2.5938																																																																											
-0.8500	1.9417	0.6710																																																																											
-0.5500	1.9417	0.1808																																																																											
-0.2500	4.8544	0.0524																																																																											
0.0500	6.7961	0.0048																																																																											
PRUEBA 11																																																																													
 <p>EER (200x200) = 4.854369 EER (400x400) = 4.854369</p>	<table border="1"> <thead> <tr> <th>UMBRAL</th> <th>FRR</th> <th>FAR</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>-6.7000</td><td>0.4854</td><td>84.7706</td></tr> <tr><td>-6.0500</td><td>0.9709</td><td>80.9299</td></tr> <tr><td>-5.4000</td><td>0.9709</td><td>75.9090</td></tr> <tr><td>-4.7500</td><td>1.4563</td><td>69.3889</td></tr> <tr><td>-4.1000</td><td>1.4563</td><td>60.6511</td></tr> <tr><td>-3.4500</td><td>1.9417</td><td>49.0053</td></tr> <tr><td>-2.8000</td><td>1.9417</td><td>35.1323</td></tr> <tr><td>-2.1500</td><td>3.3981</td><td>20.2313</td></tr> <tr><td>-1.5000</td><td>4.3689</td><td>7.5671</td></tr> <tr><td>-0.8500</td><td>4.8544</td><td>0.6615</td></tr> <tr><td>-0.2000</td><td>9.7087</td><td>0.0143</td></tr> </tbody> </table>	UMBRAL	FRR	FAR	-6.7000	0.4854	84.7706	-6.0500	0.9709	80.9299	-5.4000	0.9709	75.9090	-4.7500	1.4563	69.3889	-4.1000	1.4563	60.6511	-3.4500	1.9417	49.0053	-2.8000	1.9417	35.1323	-2.1500	3.3981	20.2313	-1.5000	4.3689	7.5671	-0.8500	4.8544	0.6615	-0.2000	9.7087	0.0143	<table border="1"> <thead> <tr> <th>UMBRAL</th> <th>FRR</th> <th>FAR</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>-2.8500</td><td>0.4854</td><td>40.5958</td></tr> <tr><td>-2.5000</td><td>1.4563</td><td>31.1822</td></tr> <tr><td>-2.1500</td><td>2.4272</td><td>21.9922</td></tr> <tr><td>-1.8000</td><td>3.8835</td><td>13.9063</td></tr> <tr><td>-1.4500</td><td>4.3689</td><td>7.3101</td></tr> <tr><td>-1.1000</td><td>5.3398</td><td>2.4129</td></tr> <tr><td>-0.7500</td><td>6.7961</td><td>0.4426</td></tr> <tr><td>-0.4000</td><td>8.2524</td><td>0.0809</td></tr> <tr><td>-0.0500</td><td>10.6796</td><td>0.0238</td></tr> <tr><td>0.3000</td><td>16.0194</td><td>0.0048</td></tr> </tbody> </table>	UMBRAL	FRR	FAR	-2.8500	0.4854	40.5958	-2.5000	1.4563	31.1822	-2.1500	2.4272	21.9922	-1.8000	3.8835	13.9063	-1.4500	4.3689	7.3101	-1.1000	5.3398	2.4129	-0.7500	6.7961	0.4426	-0.4000	8.2524	0.0809	-0.0500	10.6796	0.0238	0.3000	16.0194	0.0048						
UMBRAL	FRR	FAR																																																																											
-6.7000	0.4854	84.7706																																																																											
-6.0500	0.9709	80.9299																																																																											
-5.4000	0.9709	75.9090																																																																											
-4.7500	1.4563	69.3889																																																																											
-4.1000	1.4563	60.6511																																																																											
-3.4500	1.9417	49.0053																																																																											
-2.8000	1.9417	35.1323																																																																											
-2.1500	3.3981	20.2313																																																																											
-1.5000	4.3689	7.5671																																																																											
-0.8500	4.8544	0.6615																																																																											
-0.2000	9.7087	0.0143																																																																											
UMBRAL	FRR	FAR																																																																											
-2.8500	0.4854	40.5958																																																																											
-2.5000	1.4563	31.1822																																																																											
-2.1500	2.4272	21.9922																																																																											
-1.8000	3.8835	13.9063																																																																											
-1.4500	4.3689	7.3101																																																																											
-1.1000	5.3398	2.4129																																																																											
-0.7500	6.7961	0.4426																																																																											
-0.4000	8.2524	0.0809																																																																											
-0.0500	10.6796	0.0238																																																																											
0.3000	16.0194	0.0048																																																																											

CURVA ROC		200x200 píxeles	400x400 píxeles																																																																										
PRUEBA 12																																																																													
 <p>EER (200x200) = 4.172934 EER (400x400) = 5.825243</p>	<table border="1"> <thead> <tr> <th>UMBRAL</th> <th>FRR</th> <th>FAR</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>-9.6000</td><td>0.3236</td><td>92.6455</td></tr> <tr><td>-8.5000</td><td>0.6472</td><td>89.7836</td></tr> <tr><td>-7.4000</td><td>0.9709</td><td>85.6558</td></tr> <tr><td>-6.3000</td><td>0.9709</td><td>79.6814</td></tr> <tr><td>-5.2000</td><td>1.2945</td><td>70.7469</td></tr> <tr><td>-4.1000</td><td>1.2945</td><td>58.0557</td></tr> <tr><td>-3.0000</td><td>1.6181</td><td>37.8546</td></tr> <tr><td>-1.9000</td><td>3.2362</td><td>13.7033</td></tr> <tr><td>-0.8000</td><td>5.5016</td><td>0.4537</td></tr> <tr><td>0.3000</td><td>13.9159</td><td>0.0127</td></tr> <tr><td>1.4000</td><td>94.1748</td><td>0.0032</td></tr> </tbody> </table>	UMBRAL	FRR	FAR	-9.6000	0.3236	92.6455	-8.5000	0.6472	89.7836	-7.4000	0.9709	85.6558	-6.3000	0.9709	79.6814	-5.2000	1.2945	70.7469	-4.1000	1.2945	58.0557	-3.0000	1.6181	37.8546	-1.9000	3.2362	13.7033	-0.8000	5.5016	0.4537	0.3000	13.9159	0.0127	1.4000	94.1748	0.0032	<table border="1"> <thead> <tr> <th>UMBRAL</th> <th>FRR</th> <th>FAR</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>-10.0000</td><td>0.3236</td><td>97.8679</td></tr> <tr><td>-8.8000</td><td>0.3236</td><td>96.5670</td></tr> <tr><td>-7.6000</td><td>0.3236</td><td>94.4889</td></tr> <tr><td>-6.4000</td><td>0.3236</td><td>89.8947</td></tr> <tr><td>-5.2000</td><td>0.9709</td><td>80.2494</td></tr> <tr><td>-4.0000</td><td>2.2654</td><td>62.4532</td></tr> <tr><td>-2.8000</td><td>2.9126</td><td>34.7547</td></tr> <tr><td>-1.6000</td><td>5.5016</td><td>8.3000</td></tr> <tr><td>-0.4000</td><td>10.3560</td><td>0.1586</td></tr> <tr><td>0.8000</td><td>39.4822</td><td>0.0063</td></tr> <tr><td>2.0000</td><td>100.0000</td><td>0.0032</td></tr> </tbody> </table>	UMBRAL	FRR	FAR	-10.0000	0.3236	97.8679	-8.8000	0.3236	96.5670	-7.6000	0.3236	94.4889	-6.4000	0.3236	89.8947	-5.2000	0.9709	80.2494	-4.0000	2.2654	62.4532	-2.8000	2.9126	34.7547	-1.6000	5.5016	8.3000	-0.4000	10.3560	0.1586	0.8000	39.4822	0.0063	2.0000	100.0000	0.0032			
	UMBRAL	FRR	FAR																																																																										
-9.6000	0.3236	92.6455																																																																											
-8.5000	0.6472	89.7836																																																																											
-7.4000	0.9709	85.6558																																																																											
-6.3000	0.9709	79.6814																																																																											
-5.2000	1.2945	70.7469																																																																											
-4.1000	1.2945	58.0557																																																																											
-3.0000	1.6181	37.8546																																																																											
-1.9000	3.2362	13.7033																																																																											
-0.8000	5.5016	0.4537																																																																											
0.3000	13.9159	0.0127																																																																											
1.4000	94.1748	0.0032																																																																											
UMBRAL	FRR	FAR																																																																											
-10.0000	0.3236	97.8679																																																																											
-8.8000	0.3236	96.5670																																																																											
-7.6000	0.3236	94.4889																																																																											
-6.4000	0.3236	89.8947																																																																											
-5.2000	0.9709	80.2494																																																																											
-4.0000	2.2654	62.4532																																																																											
-2.8000	2.9126	34.7547																																																																											
-1.6000	5.5016	8.3000																																																																											
-0.4000	10.3560	0.1586																																																																											
0.8000	39.4822	0.0063																																																																											
2.0000	100.0000	0.0032																																																																											
PRUEBA 13																																																																													
 <p>EER (200x200) = 4.091867 EER (400x400) = 5.825243</p>	<table border="1"> <thead> <tr> <th>UMBRAL</th> <th>FRR</th> <th>FAR</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>-9.6000</td><td>0.2427</td><td>92.7565</td></tr> <tr><td>-8.5000</td><td>0.4854</td><td>89.9462</td></tr> <tr><td>-7.4000</td><td>0.7282</td><td>85.8034</td></tr> <tr><td>-6.3000</td><td>0.7282</td><td>79.6569</td></tr> <tr><td>-5.2000</td><td>0.9709</td><td>70.5192</td></tr> <tr><td>-4.1000</td><td>0.9709</td><td>57.4648</td></tr> <tr><td>-3.0000</td><td>1.4563</td><td>36.9456</td></tr> <tr><td>-1.9000</td><td>2.9126</td><td>12.8760</td></tr> <tr><td>-0.8000</td><td>6.5534</td><td>0.4616</td></tr> <tr><td>0.3000</td><td>16.9903</td><td>0.0119</td></tr> <tr><td>1.4000</td><td>94.4175</td><td>0.0024</td></tr> </tbody> </table>	UMBRAL	FRR	FAR	-9.6000	0.2427	92.7565	-8.5000	0.4854	89.9462	-7.4000	0.7282	85.8034	-6.3000	0.7282	79.6569	-5.2000	0.9709	70.5192	-4.1000	0.9709	57.4648	-3.0000	1.4563	36.9456	-1.9000	2.9126	12.8760	-0.8000	6.5534	0.4616	0.3000	16.9903	0.0119	1.4000	94.4175	0.0024	<table border="1"> <thead> <tr> <th>UMBRAL</th> <th>FRR</th> <th>FAR</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>-10.0000</td><td>0.2427</td><td>98.1154</td></tr> <tr><td>-8.8000</td><td>0.2427</td><td>96.9279</td></tr> <tr><td>-7.6000</td><td>0.2427</td><td>94.8791</td></tr> <tr><td>-6.4000</td><td>0.2427</td><td>90.3222</td></tr> <tr><td>-5.2000</td><td>0.7282</td><td>80.5468</td></tr> <tr><td>-4.0000</td><td>1.9417</td><td>62.2597</td></tr> <tr><td>-2.8000</td><td>2.6699</td><td>34.1662</td></tr> <tr><td>-1.6000</td><td>5.0971</td><td>7.9788</td></tr> <tr><td>-0.4000</td><td>11.8932</td><td>0.1499</td></tr> <tr><td>0.8000</td><td>47.0874</td><td>0.0071</td></tr> <tr><td>2.0000</td><td>100.0000</td><td>0.0024</td></tr> </tbody> </table>	UMBRAL	FRR	FAR	-10.0000	0.2427	98.1154	-8.8000	0.2427	96.9279	-7.6000	0.2427	94.8791	-6.4000	0.2427	90.3222	-5.2000	0.7282	80.5468	-4.0000	1.9417	62.2597	-2.8000	2.6699	34.1662	-1.6000	5.0971	7.9788	-0.4000	11.8932	0.1499	0.8000	47.0874	0.0071	2.0000	100.0000	0.0024			
	UMBRAL	FRR	FAR																																																																										
-9.6000	0.2427	92.7565																																																																											
-8.5000	0.4854	89.9462																																																																											
-7.4000	0.7282	85.8034																																																																											
-6.3000	0.7282	79.6569																																																																											
-5.2000	0.9709	70.5192																																																																											
-4.1000	0.9709	57.4648																																																																											
-3.0000	1.4563	36.9456																																																																											
-1.9000	2.9126	12.8760																																																																											
-0.8000	6.5534	0.4616																																																																											
0.3000	16.9903	0.0119																																																																											
1.4000	94.4175	0.0024																																																																											
UMBRAL	FRR	FAR																																																																											
-10.0000	0.2427	98.1154																																																																											
-8.8000	0.2427	96.9279																																																																											
-7.6000	0.2427	94.8791																																																																											
-6.4000	0.2427	90.3222																																																																											
-5.2000	0.7282	80.5468																																																																											
-4.0000	1.9417	62.2597																																																																											
-2.8000	2.6699	34.1662																																																																											
-1.6000	5.0971	7.9788																																																																											
-0.4000	11.8932	0.1499																																																																											
0.8000	47.0874	0.0071																																																																											
2.0000	100.0000	0.0024																																																																											
PRUEBA 14																																																																													
 <p>ER (200x200) = 9.150242 EER (400x400) = 8.904401</p>	<table border="1"> <thead> <tr> <th>UMBRAL</th> <th>FRR</th> <th>FAR</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>-7.4500</td><td>0.4854</td><td>88.6303</td></tr> <tr><td>-6.6500</td><td>0.9709</td><td>85.1656</td></tr> <tr><td>-5.8500</td><td>0.9709</td><td>80.3255</td></tr> <tr><td>-5.0500</td><td>0.9709</td><td>72.8917</td></tr> <tr><td>-4.2500</td><td>0.9709</td><td>61.9218</td></tr> <tr><td>-3.4500</td><td>0.9709</td><td>45.7310</td></tr> <tr><td>-2.6500</td><td>3.3981</td><td>27.3320</td></tr> <tr><td>-1.8500</td><td>8.2524</td><td>10.7034</td></tr> <tr><td>-1.0500</td><td>17.4757</td><td>1.6134</td></tr> <tr><td>-0.2500</td><td>38.3495</td><td>0.0809</td></tr> <tr><td>0.5500</td><td>66.0194</td><td>0.0048</td></tr> </tbody> </table>	UMBRAL	FRR	FAR	-7.4500	0.4854	88.6303	-6.6500	0.9709	85.1656	-5.8500	0.9709	80.3255	-5.0500	0.9709	72.8917	-4.2500	0.9709	61.9218	-3.4500	0.9709	45.7310	-2.6500	3.3981	27.3320	-1.8500	8.2524	10.7034	-1.0500	17.4757	1.6134	-0.2500	38.3495	0.0809	0.5500	66.0194	0.0048	<table border="1"> <thead> <tr> <th>UMBRAL</th> <th>FRR</th> <th>FAR</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>-3.1000</td><td>0.4854</td><td>46.6162</td></tr> <tr><td>-2.7500</td><td>1.4563</td><td>36.7314</td></tr> <tr><td>-2.4000</td><td>3.8835</td><td>26.8561</td></tr> <tr><td>-2.0500</td><td>4.3689</td><td>17.7327</td></tr> <tr><td>-1.7000</td><td>7.7670</td><td>10.3655</td></tr> <tr><td>-1.3500</td><td>12.1359</td><td>4.9924</td></tr> <tr><td>-1.0000</td><td>15.5340</td><td>1.8561</td></tr> <tr><td>-0.6500</td><td>23.3010</td><td>0.6092</td></tr> <tr><td>-0.3000</td><td>33.0097</td><td>0.1380</td></tr> <tr><td>0.0500</td><td>45.1456</td><td>0.0286</td></tr> <tr><td>0.4000</td><td>62.1359</td><td>0.0095</td></tr> </tbody> </table>	UMBRAL	FRR	FAR	-3.1000	0.4854	46.6162	-2.7500	1.4563	36.7314	-2.4000	3.8835	26.8561	-2.0500	4.3689	17.7327	-1.7000	7.7670	10.3655	-1.3500	12.1359	4.9924	-1.0000	15.5340	1.8561	-0.6500	23.3010	0.6092	-0.3000	33.0097	0.1380	0.0500	45.1456	0.0286	0.4000	62.1359	0.0095			
	UMBRAL	FRR	FAR																																																																										
-7.4500	0.4854	88.6303																																																																											
-6.6500	0.9709	85.1656																																																																											
-5.8500	0.9709	80.3255																																																																											
-5.0500	0.9709	72.8917																																																																											
-4.2500	0.9709	61.9218																																																																											
-3.4500	0.9709	45.7310																																																																											
-2.6500	3.3981	27.3320																																																																											
-1.8500	8.2524	10.7034																																																																											
-1.0500	17.4757	1.6134																																																																											
-0.2500	38.3495	0.0809																																																																											
0.5500	66.0194	0.0048																																																																											
UMBRAL	FRR	FAR																																																																											
-3.1000	0.4854	46.6162																																																																											
-2.7500	1.4563	36.7314																																																																											
-2.4000	3.8835	26.8561																																																																											
-2.0500	4.3689	17.7327																																																																											
-1.7000	7.7670	10.3655																																																																											
-1.3500	12.1359	4.9924																																																																											
-1.0000	15.5340	1.8561																																																																											
-0.6500	23.3010	0.6092																																																																											
-0.3000	33.0097	0.1380																																																																											
0.0500	45.1456	0.0286																																																																											
0.4000	62.1359	0.0095																																																																											
PRUEBA 15																																																																													
 <p>ER (200x200) = 1.941748 EER (400x400) = 1.456311</p>	<table border="1"> <thead> <tr> <th>UMBRAL</th> <th>FRR</th> <th>FAR</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>-6.4500</td><td>0.4854</td><td>88.3876</td></tr> <tr><td>-5.8000</td><td>0.4854</td><td>84.9467</td></tr> <tr><td>-5.1500</td><td>0.4854</td><td>80.6063</td></tr> <tr><td>-4.5000</td><td>0.4854</td><td>74.3004</td></tr> <tr><td>-3.8500</td><td>0.4854</td><td>64.4965</td></tr> <tr><td>-3.2000</td><td>0.9709</td><td>50.9518</td></tr> <tr><td>-2.5500</td><td>0.9709</td><td>35.3036</td></tr> <tr><td>-1.9000</td><td>0.9709</td><td>18.9463</td></tr> <tr><td>-1.2500</td><td>1.4563</td><td>5.7681</td></tr> <tr><td>-0.6000</td><td>2.9126</td><td>0.1904</td></tr> <tr><td>0.0500</td><td>5.8252</td><td>0.0048</td></tr> </tbody> </table>	UMBRAL	FRR	FAR	-6.4500	0.4854	88.3876	-5.8000	0.4854	84.9467	-5.1500	0.4854	80.6063	-4.5000	0.4854	74.3004	-3.8500	0.4854	64.4965	-3.2000	0.9709	50.9518	-2.5500	0.9709	35.3036	-1.9000	0.9709	18.9463	-1.2500	1.4563	5.7681	-0.6000	2.9126	0.1904	0.0500	5.8252	0.0048	<table border="1"> <thead> <tr> <th>UMBRAL</th> <th>FRR</th> <th>FAR</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>-2.6500</td><td>0.4854</td><td>40.6339</td></tr> <tr><td>-2.4000</td><td>0.4854</td><td>33.1144</td></tr> <tr><td>-2.1500</td><td>0.4854</td><td>25.4854</td></tr> <tr><td>-1.9000</td><td>0.9709</td><td>18.8273</td></tr> <tr><td>-1.6500</td><td>0.9709</td><td>12.9307</td></tr> <tr><td>-1.4000</td><td>0.9709</td><td>8.0383</td></tr> <tr><td>-1.1500</td><td>0.9709</td><td>4.0548</td></tr> <tr><td>-0.9000</td><td>1.4563</td><td>1.4420</td></tr> <tr><td>-0.6500</td><td>2.4272</td><td>0.4236</td></tr> <tr><td>-0.4000</td><td>3.3981</td><td>0.1237</td></tr> <tr><td>-0.1500</td><td>4.8544</td><td>0.0571</td></tr> <tr><td>0.1000</td><td>6.3107</td><td>0.0143</td></tr> </tbody> </table>	UMBRAL	FRR	FAR	-2.6500	0.4854	40.6339	-2.4000	0.4854	33.1144	-2.1500	0.4854	25.4854	-1.9000	0.9709	18.8273	-1.6500	0.9709	12.9307	-1.4000	0.9709	8.0383	-1.1500	0.9709	4.0548	-0.9000	1.4563	1.4420	-0.6500	2.4272	0.4236	-0.4000	3.3981	0.1237	-0.1500	4.8544	0.0571	0.1000	6.3107	0.0143
	UMBRAL	FRR	FAR																																																																										
-6.4500	0.4854	88.3876																																																																											
-5.8000	0.4854	84.9467																																																																											
-5.1500	0.4854	80.6063																																																																											
-4.5000	0.4854	74.3004																																																																											
-3.8500	0.4854	64.4965																																																																											
-3.2000	0.9709	50.9518																																																																											
-2.5500	0.9709	35.3036																																																																											
-1.9000	0.9709	18.9463																																																																											
-1.2500	1.4563	5.7681																																																																											
-0.6000	2.9126	0.1904																																																																											
0.0500	5.8252	0.0048																																																																											
UMBRAL	FRR	FAR																																																																											
-2.6500	0.4854	40.6339																																																																											
-2.4000	0.4854	33.1144																																																																											
-2.1500	0.4854	25.4854																																																																											
-1.9000	0.9709	18.8273																																																																											
-1.6500	0.9709	12.9307																																																																											
-1.4000	0.9709	8.0383																																																																											
-1.1500	0.9709	4.0548																																																																											
-0.9000	1.4563	1.4420																																																																											
-0.6500	2.4272	0.4236																																																																											
-0.4000	3.3981	0.1237																																																																											
-0.1500	4.8544	0.0571																																																																											
0.1000	6.3107	0.0143																																																																											

C.2.- Verificador 2.5D.

Se han realizado pruebas con distintas condiciones de creación de las imágenes, respecto a los siguientes aspectos:

- Tamaño: dos tamaños de imagen (color y rango) diferentes: 200x200 y 400x400 píxeles. La resolución de los mallados 3D se ha mantenido constante.
- Función de creación de las imágenes de rango: han sido consideradas cuatro funciones diferentes: lineal, exponencial, lineal por secciones y gaussiana. Se presentarán los resultados únicamente de las funciones exponencial y gaussiana.
- Normalización: se han considerado las imágenes sin ningún tipo de normalización en posición, y una vez normalizadas.

En la Tabla C. 3 se muestran los EER(%) obtenidos por el Verificador 2.5D en cada una de estas condiciones consideradas. En la Figura C. 1 se presenta un diagrama para una más rápida comparación del EER(%) obtenido para cada tamaño de imagen y con cada función de ecualización. A continuación se presentarán las curvas ROC obtenidas por el Verificador 2.5D (imágenes de rango), para cada una de las condiciones descritas. Se presentarán dos tablas diferentes, cada una de ellas correspondiente a cada una de las dos funciones de ecualización que mejores resultados han dado: exponencial y gaussiana. Se consideran los dos tamaños de imagen: la Tabla C. 4 corresponde a un tamaño de imagen de 200x200 píxeles y la Tabla C. 5 a 400x400 píxeles. En cada curva ROC mostraremos las curvas correspondientes a cada función de ecualización: exponencial y gaussiana.

Tabla C. 3. EER(%) del verificador 2.5D obtenido en lass distintas condiciones estudiadas: tamaño imagen 200x200 y 400x400 píxeles; función de creación exponencial y gaussiana; datos sin normalizar y normalizados.

PRUEBA	NO NORMALIZADOS				NORMALIZADOS			
	EXP 200x200	GSS 200x200	EXP 400x400	GSS 400x400	EXP 200x200	GSS 200x200	EXP 400x400	GSS 400x400
1	1.205357	3.809524	2.857143	2.857143	0.093354	0.970874	0.970874	0.970874
2	6.906579	10.476191	10.476191	14.285714	4.641404	4.279265	5.825243	5.825243
3	20.711111	23.328268	24.366667	27.150337	12.621359	10.226934	15.533980	16.504854
4	4.285714	5.238095	4.123761	5.040075	0.970874	0.570477	0.582524	0.485437
5	15.235732	22.345013	20.476191	19.194139	1.009851	2.136456	2.380837	2.427185
6	33.333332	34.285713	34.632706	35.238094	2.187885	1.941748	3.634857	1.488673
7	35.708996	38.931976	36.541275	39.047619	1.941748	4.776862	2.365542	3.883495
8	27.647163	31.817926	33.333332	31.866447	4.854369	6.324818	5.221269	7.485772
9	39.960037	40.952381	40.000000	43.148689	3.711442	5.582524	3.322406	2.912621
10	1.703297	2.380952	3.809524	2.598745	0.485437	0.970874	1.456311	0.970874
11	5.373525	7.619048	5.979505	7.574086	0.485437	0.833612	1.456311	1.456311
12	4.476861	6.639693	5.079365	6.262749	0.647249	0.970874	0.970874	0.970874
13	5.688064	7.904762	7.300170	8.561171	1.659551	1.682256	2.184466	1.873194
14	14.588058	17.142857	17.527809	21.761560	10.278343	6.755138	12.045447	11.723022
15	4.285714	6.666667	5.238095	5.714286	0.565017	1.941748	1.456311	1.088368

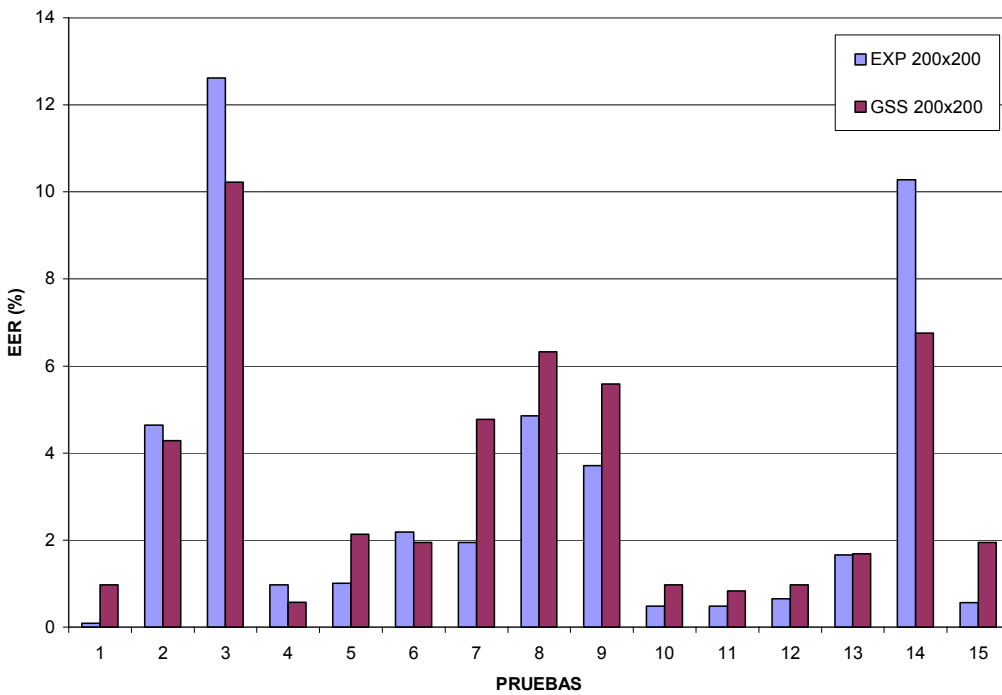
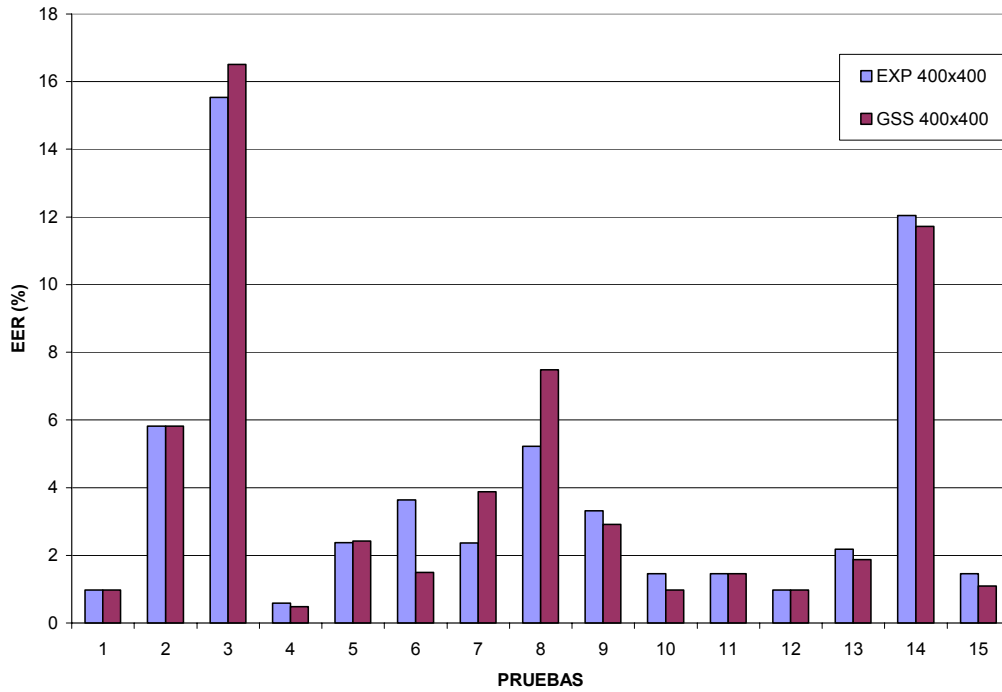
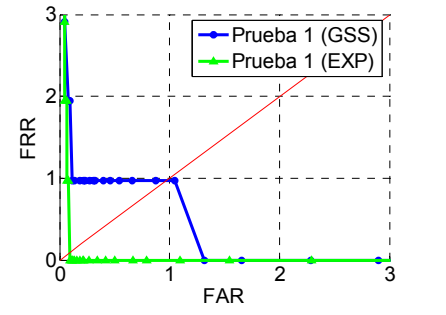
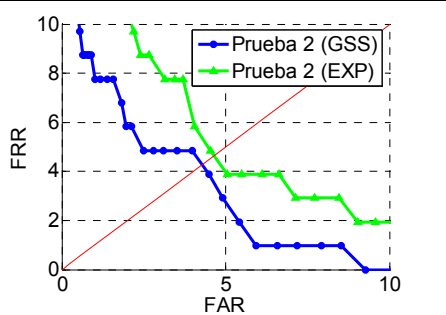
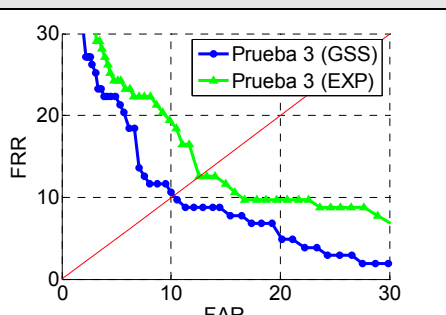


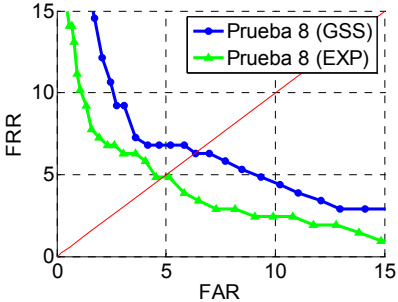
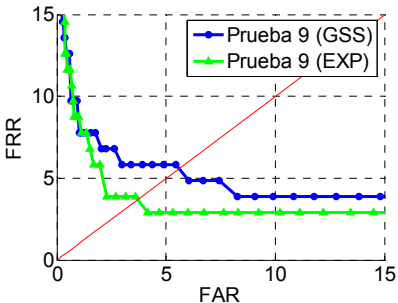
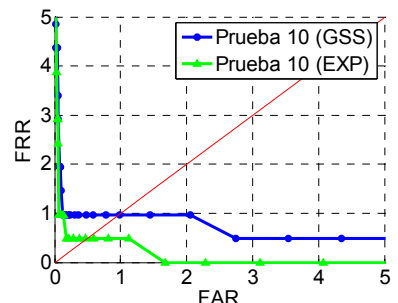
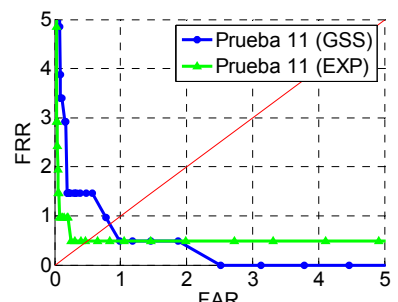
Figura C. 1. Comparación de los valores del EER(%) para cada una de las pruebas, y en el caso de las dos funciones de ecualización estudiadas. Arriba, para un tamaño de imagen de 400x400 píxeles, y abajo para 200x200 píxeles.

Tabla C. 4. Resultados Verificador 2.5D (rango), tamaño de imagen 200x200 píxeles y distintas funciones de ecualización: exponencial y gaussiana. Para cada prueba se presentan de izquierda a derecha: curva ROC y EER (%), datos numéricos en torno al EER: Umbral de aceptación, Tasa de Falso Rechazo (FRR) y Tasa de Falsa Aceptación (FAR).

CURVA ROC	Función Exponencial	Función Gaussiana																																																																											
PRUEBA 1																																																																													
 <p>EER (Exponencial) = 0.093354 EER (Gaussiana) = 0.970874</p>	<table border="1"> <thead> <tr> <th>UMBRAL</th> <th>FRR</th> <th>FAR</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>0.0000</td><td>0.9709</td><td>0.0761</td></tr> <tr><td>0.1500</td><td>0.9709</td><td>0.0666</td></tr> <tr><td>0.3000</td><td>1.9417</td><td>0.0476</td></tr> <tr><td>0.4500</td><td>5.8252</td><td>0.0381</td></tr> <tr><td>0.6000</td><td>18.4466</td><td>0.0381</td></tr> <tr><td>0.7500</td><td>28.1553</td><td>0.0381</td></tr> <tr><td>0.9000</td><td>40.7767</td><td>0.0095</td></tr> <tr><td>1.0500</td><td>66.0194</td><td>0.0095</td></tr> <tr><td>1.2000</td><td>88.3495</td><td>0.0095</td></tr> <tr><td>1.3500</td><td>97.0874</td><td>0.0095</td></tr> <tr><td>1.5000</td><td>98.0583</td><td>0.0095</td></tr> </tbody> </table>	UMBRAL	FRR	FAR	0.0000	0.9709	0.0761	0.1500	0.9709	0.0666	0.3000	1.9417	0.0476	0.4500	5.8252	0.0381	0.6000	18.4466	0.0381	0.7500	28.1553	0.0381	0.9000	40.7767	0.0095	1.0500	66.0194	0.0095	1.2000	88.3495	0.0095	1.3500	97.0874	0.0095	1.5000	98.0583	0.0095	<table border="1"> <thead> <tr> <th>UMBRAL</th> <th>FRR</th> <th>FAR</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>-0.8500</td><td>0.9709</td><td>1.0470</td></tr> <tr><td>-0.5000</td><td>0.9709</td><td>0.3046</td></tr> <tr><td>-0.1500</td><td>0.9709</td><td>0.1142</td></tr> <tr><td>0.2000</td><td>4.8544</td><td>0.0476</td></tr> <tr><td>0.5500</td><td>17.4757</td><td>0.0286</td></tr> <tr><td>0.9000</td><td>41.7476</td><td>0.0190</td></tr> <tr><td>1.2500</td><td>91.2621</td><td>0.0095</td></tr> <tr><td>1.6000</td><td>99.0291</td><td>0.0095</td></tr> <tr><td>1.9500</td><td>100.0000</td><td>0.0095</td></tr> <tr><td>2.3000</td><td>100.0000</td><td>0.0095</td></tr> <tr><td>2.6500</td><td>100.0000</td><td>0.0095</td></tr> </tbody> </table>	UMBRAL	FRR	FAR	-0.8500	0.9709	1.0470	-0.5000	0.9709	0.3046	-0.1500	0.9709	0.1142	0.2000	4.8544	0.0476	0.5500	17.4757	0.0286	0.9000	41.7476	0.0190	1.2500	91.2621	0.0095	1.6000	99.0291	0.0095	1.9500	100.0000	0.0095	2.3000	100.0000	0.0095	2.6500	100.0000	0.0095			
UMBRAL	FRR	FAR																																																																											
0.0000	0.9709	0.0761																																																																											
0.1500	0.9709	0.0666																																																																											
0.3000	1.9417	0.0476																																																																											
0.4500	5.8252	0.0381																																																																											
0.6000	18.4466	0.0381																																																																											
0.7500	28.1553	0.0381																																																																											
0.9000	40.7767	0.0095																																																																											
1.0500	66.0194	0.0095																																																																											
1.2000	88.3495	0.0095																																																																											
1.3500	97.0874	0.0095																																																																											
1.5000	98.0583	0.0095																																																																											
UMBRAL	FRR	FAR																																																																											
-0.8500	0.9709	1.0470																																																																											
-0.5000	0.9709	0.3046																																																																											
-0.1500	0.9709	0.1142																																																																											
0.2000	4.8544	0.0476																																																																											
0.5500	17.4757	0.0286																																																																											
0.9000	41.7476	0.0190																																																																											
1.2500	91.2621	0.0095																																																																											
1.6000	99.0291	0.0095																																																																											
1.9500	100.0000	0.0095																																																																											
2.3000	100.0000	0.0095																																																																											
2.6500	100.0000	0.0095																																																																											
PRUEBA 2																																																																													
 <p>EER (Exponencial) = 4.641403 EER (Gaussiana) = 4.279266</p>	<table border="1"> <thead> <tr> <th>UMBRAL</th> <th>FRR</th> <th>FAR</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>-1.5500</td><td>0.9709</td><td>11.8599</td></tr> <tr><td>-1.2000</td><td>2.9126</td><td>7.1388</td></tr> <tr><td>-0.8500</td><td>7.7670</td><td>3.6931</td></tr> <tr><td>-0.5000</td><td>12.6214</td><td>1.7514</td></tr> <tr><td>-0.1500</td><td>17.4757</td><td>0.7139</td></tr> <tr><td>0.2000</td><td>21.3592</td><td>0.2951</td></tr> <tr><td>0.5500</td><td>30.0971</td><td>0.1237</td></tr> <tr><td>0.9000</td><td>49.5146</td><td>0.0666</td></tr> <tr><td>1.2500</td><td>72.8155</td><td>0.0286</td></tr> <tr><td>1.6000</td><td>89.3204</td><td>0.0095</td></tr> <tr><td>1.9500</td><td>97.0874</td><td>0.0095</td></tr> <tr><td>2.3000</td><td>98.0583</td><td>0.0095</td></tr> </tbody> </table>	UMBRAL	FRR	FAR	-1.5500	0.9709	11.8599	-1.2000	2.9126	7.1388	-0.8500	7.7670	3.6931	-0.5000	12.6214	1.7514	-0.1500	17.4757	0.7139	0.2000	21.3592	0.2951	0.5500	30.0971	0.1237	0.9000	49.5146	0.0666	1.2500	72.8155	0.0286	1.6000	89.3204	0.0095	1.9500	97.0874	0.0095	2.3000	98.0583	0.0095	<table border="1"> <thead> <tr> <th>UMBRAL</th> <th>FRR</th> <th>FAR</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>-1.4000</td><td>0.9709</td><td>8.5189</td></tr> <tr><td>-1.1500</td><td>1.9417</td><td>5.4064</td></tr> <tr><td>-0.9000</td><td>4.8544</td><td>3.0935</td></tr> <tr><td>-0.6500</td><td>6.7961</td><td>1.8180</td></tr> <tr><td>-0.4000</td><td>8.7379</td><td>0.9042</td></tr> <tr><td>-0.1500</td><td>9.7087</td><td>0.5425</td></tr> <tr><td>0.1000</td><td>12.6214</td><td>0.3141</td></tr> <tr><td>0.3500</td><td>18.4466</td><td>0.1333</td></tr> <tr><td>0.6000</td><td>29.1262</td><td>0.0381</td></tr> <tr><td>0.8500</td><td>46.6019</td><td>0.0095</td></tr> <tr><td>1.1000</td><td>68.9320</td><td>0.0095</td></tr> </tbody> </table>	UMBRAL	FRR	FAR	-1.4000	0.9709	8.5189	-1.1500	1.9417	5.4064	-0.9000	4.8544	3.0935	-0.6500	6.7961	1.8180	-0.4000	8.7379	0.9042	-0.1500	9.7087	0.5425	0.1000	12.6214	0.3141	0.3500	18.4466	0.1333	0.6000	29.1262	0.0381	0.8500	46.6019	0.0095	1.1000	68.9320	0.0095
UMBRAL	FRR	FAR																																																																											
-1.5500	0.9709	11.8599																																																																											
-1.2000	2.9126	7.1388																																																																											
-0.8500	7.7670	3.6931																																																																											
-0.5000	12.6214	1.7514																																																																											
-0.1500	17.4757	0.7139																																																																											
0.2000	21.3592	0.2951																																																																											
0.5500	30.0971	0.1237																																																																											
0.9000	49.5146	0.0666																																																																											
1.2500	72.8155	0.0286																																																																											
1.6000	89.3204	0.0095																																																																											
1.9500	97.0874	0.0095																																																																											
2.3000	98.0583	0.0095																																																																											
UMBRAL	FRR	FAR																																																																											
-1.4000	0.9709	8.5189																																																																											
-1.1500	1.9417	5.4064																																																																											
-0.9000	4.8544	3.0935																																																																											
-0.6500	6.7961	1.8180																																																																											
-0.4000	8.7379	0.9042																																																																											
-0.1500	9.7087	0.5425																																																																											
0.1000	12.6214	0.3141																																																																											
0.3500	18.4466	0.1333																																																																											
0.6000	29.1262	0.0381																																																																											
0.8500	46.6019	0.0095																																																																											
1.1000	68.9320	0.0095																																																																											
PRUEBA 3																																																																													
 <p>EER (Exponencial) = 12.621359 EER (Gaussiana) = 10.226934</p>	<table border="1"> <thead> <tr> <th>UMBRAL</th> <th>FRR</th> <th>FAR</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>-10.0000</td><td>0.9709</td><td>98.0868</td></tr> <tr><td>-8.6000</td><td>0.9709</td><td>95.6311</td></tr> <tr><td>-7.2000</td><td>0.9709</td><td>91.1860</td></tr> <tr><td>-5.8000</td><td>0.9709</td><td>83.0763</td></tr> <tr><td>-4.4000</td><td>1.9417</td><td>67.8850</td></tr> <tr><td>-3.0000</td><td>2.9126</td><td>41.1098</td></tr> <tr><td>-1.6000</td><td>12.6214</td><td>12.5642</td></tr> <tr><td>-0.2000</td><td>39.8058</td><td>1.8561</td></tr> <tr><td>1.2000</td><td>87.3786</td><td>0.1999</td></tr> <tr><td>2.6000</td><td>98.0583</td><td>0.0381</td></tr> <tr><td>4.0000</td><td>100.0000</td><td>0.0095</td></tr> </tbody> </table>	UMBRAL	FRR	FAR	-10.0000	0.9709	98.0868	-8.6000	0.9709	95.6311	-7.2000	0.9709	91.1860	-5.8000	0.9709	83.0763	-4.4000	1.9417	67.8850	-3.0000	2.9126	41.1098	-1.6000	12.6214	12.5642	-0.2000	39.8058	1.8561	1.2000	87.3786	0.1999	2.6000	98.0583	0.0381	4.0000	100.0000	0.0095	<table border="1"> <thead> <tr> <th>UMBRAL</th> <th>FRR</th> <th>FAR</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>-6.0500</td><td>0.9709</td><td>88.1306</td></tr> <tr><td>-5.1500</td><td>0.9709</td><td>80.8776</td></tr> <tr><td>-4.2500</td><td>0.9709</td><td>68.9701</td></tr> <tr><td>-3.3500</td><td>0.9709</td><td>52.7223</td></tr> <tr><td>-2.4500</td><td>1.9417</td><td>31.0775</td></tr> <tr><td>-1.5500</td><td>8.7379</td><td>12.8974</td></tr> <tr><td>-0.6500</td><td>23.3010</td><td>3.5599</td></tr> <tr><td>0.2500</td><td>48.5437</td><td>0.8281</td></tr> <tr><td>1.1500</td><td>82.5243</td><td>0.1808</td></tr> <tr><td>2.0500</td><td>98.0583</td><td>0.0286</td></tr> <tr><td>2.9500</td><td>99.0291</td><td>0.0095</td></tr> </tbody> </table>	UMBRAL	FRR	FAR	-6.0500	0.9709	88.1306	-5.1500	0.9709	80.8776	-4.2500	0.9709	68.9701	-3.3500	0.9709	52.7223	-2.4500	1.9417	31.0775	-1.5500	8.7379	12.8974	-0.6500	23.3010	3.5599	0.2500	48.5437	0.8281	1.1500	82.5243	0.1808	2.0500	98.0583	0.0286	2.9500	99.0291	0.0095			
UMBRAL	FRR	FAR																																																																											
-10.0000	0.9709	98.0868																																																																											
-8.6000	0.9709	95.6311																																																																											
-7.2000	0.9709	91.1860																																																																											
-5.8000	0.9709	83.0763																																																																											
-4.4000	1.9417	67.8850																																																																											
-3.0000	2.9126	41.1098																																																																											
-1.6000	12.6214	12.5642																																																																											
-0.2000	39.8058	1.8561																																																																											
1.2000	87.3786	0.1999																																																																											
2.6000	98.0583	0.0381																																																																											
4.0000	100.0000	0.0095																																																																											
UMBRAL	FRR	FAR																																																																											
-6.0500	0.9709	88.1306																																																																											
-5.1500	0.9709	80.8776																																																																											
-4.2500	0.9709	68.9701																																																																											
-3.3500	0.9709	52.7223																																																																											
-2.4500	1.9417	31.0775																																																																											
-1.5500	8.7379	12.8974																																																																											
-0.6500	23.3010	3.5599																																																																											
0.2500	48.5437	0.8281																																																																											
1.1500	82.5243	0.1808																																																																											
2.0500	98.0583	0.0286																																																																											
2.9500	99.0291	0.0095																																																																											

Anexo C: Resultados experimentales completos

CURVA ROC	Función Exponencial	Función Gaussiana																																																																											
PRUEBA 4																																																																													
<p>EER (Exponencial) = 0.970874 EER (Gaussiana) = 0.570477</p>	<table border="1"> <thead> <tr> <th>UMBRAL</th> <th>FRR</th> <th>FAR</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>-2.4500</td><td>0.4854</td><td>33.5761</td></tr> <tr><td>-2.0500</td><td>0.4854</td><td>23.3628</td></tr> <tr><td>-1.6500</td><td>0.4854</td><td>13.9634</td></tr> <tr><td>-1.2500</td><td>0.4854</td><td>6.3345</td></tr> <tr><td>-0.8500</td><td>0.9709</td><td>0.9661</td></tr> <tr><td>-0.4500</td><td>1.9417</td><td>0.1808</td></tr> <tr><td>-0.0500</td><td>3.3981</td><td>0.0476</td></tr> <tr><td>0.3500</td><td>6.7961</td><td>0.0238</td></tr> <tr><td>0.7500</td><td>21.3592</td><td>0.0238</td></tr> <tr><td>1.1500</td><td>72.8155</td><td>0.0190</td></tr> <tr><td>1.5500</td><td>97.0874</td><td>0.0048</td></tr> </tbody> </table>	UMBRAL	FRR	FAR	-2.4500	0.4854	33.5761	-2.0500	0.4854	23.3628	-1.6500	0.4854	13.9634	-1.2500	0.4854	6.3345	-0.8500	0.9709	0.9661	-0.4500	1.9417	0.1808	-0.0500	3.3981	0.0476	0.3500	6.7961	0.0238	0.7500	21.3592	0.0238	1.1500	72.8155	0.0190	1.5500	97.0874	0.0048	<table border="1"> <thead> <tr> <th>UMBRAL</th> <th>FRR</th> <th>FAR</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>-1.4500</td><td>0.4854</td><td>9.3566</td></tr> <tr><td>-1.0000</td><td>0.4854</td><td>2.3510</td></tr> <tr><td>-0.5500</td><td>1.4563</td><td>0.2951</td></tr> <tr><td>-0.1000</td><td>2.4272</td><td>0.0952</td></tr> <tr><td>0.3500</td><td>5.3398</td><td>0.0524</td></tr> <tr><td>0.8000</td><td>35.4369</td><td>0.0238</td></tr> <tr><td>1.2500</td><td>87.8641</td><td>0.0143</td></tr> <tr><td>1.7000</td><td>99.5146</td><td>0.0048</td></tr> <tr><td>2.1500</td><td>100.0000</td><td>0.0048</td></tr> <tr><td>2.6000</td><td>100.0000</td><td>0.0048</td></tr> <tr><td>3.0500</td><td>100.0000</td><td>0.0048</td></tr> </tbody> </table>	UMBRAL	FRR	FAR	-1.4500	0.4854	9.3566	-1.0000	0.4854	2.3510	-0.5500	1.4563	0.2951	-0.1000	2.4272	0.0952	0.3500	5.3398	0.0524	0.8000	35.4369	0.0238	1.2500	87.8641	0.0143	1.7000	99.5146	0.0048	2.1500	100.0000	0.0048	2.6000	100.0000	0.0048	3.0500	100.0000	0.0048			
UMBRAL	FRR	FAR																																																																											
-2.4500	0.4854	33.5761																																																																											
-2.0500	0.4854	23.3628																																																																											
-1.6500	0.4854	13.9634																																																																											
-1.2500	0.4854	6.3345																																																																											
-0.8500	0.9709	0.9661																																																																											
-0.4500	1.9417	0.1808																																																																											
-0.0500	3.3981	0.0476																																																																											
0.3500	6.7961	0.0238																																																																											
0.7500	21.3592	0.0238																																																																											
1.1500	72.8155	0.0190																																																																											
1.5500	97.0874	0.0048																																																																											
UMBRAL	FRR	FAR																																																																											
-1.4500	0.4854	9.3566																																																																											
-1.0000	0.4854	2.3510																																																																											
-0.5500	1.4563	0.2951																																																																											
-0.1000	2.4272	0.0952																																																																											
0.3500	5.3398	0.0524																																																																											
0.8000	35.4369	0.0238																																																																											
1.2500	87.8641	0.0143																																																																											
1.7000	99.5146	0.0048																																																																											
2.1500	100.0000	0.0048																																																																											
2.6000	100.0000	0.0048																																																																											
3.0500	100.0000	0.0048																																																																											
PRUEBA 5																																																																													
<p>EER (Exponencial) = 1.009851 EER (Gaussiana) = 2.136456</p>	<table border="1"> <thead> <tr> <th>UMBRAL</th> <th>FRR</th> <th>FAR</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>-1.6000</td><td>0.4854</td><td>12.8546</td></tr> <tr><td>-1.2500</td><td>0.4854</td><td>6.5772</td></tr> <tr><td>-0.9000</td><td>0.9709</td><td>1.8466</td></tr> <tr><td>-0.5500</td><td>1.9417</td><td>0.5045</td></tr> <tr><td>-0.2000</td><td>3.3981</td><td>0.1904</td></tr> <tr><td>0.1500</td><td>9.7087</td><td>0.0761</td></tr> <tr><td>0.5000</td><td>18.4466</td><td>0.0428</td></tr> <tr><td>0.8500</td><td>44.6602</td><td>0.0095</td></tr> <tr><td>1.2000</td><td>84.4660</td><td>0.0095</td></tr> <tr><td>1.5500</td><td>96.1165</td><td>0.0048</td></tr> <tr><td>1.9000</td><td>99.0291</td><td>0.0048</td></tr> </tbody> </table>	UMBRAL	FRR	FAR	-1.6000	0.4854	12.8546	-1.2500	0.4854	6.5772	-0.9000	0.9709	1.8466	-0.5500	1.9417	0.5045	-0.2000	3.3981	0.1904	0.1500	9.7087	0.0761	0.5000	18.4466	0.0428	0.8500	44.6602	0.0095	1.2000	84.4660	0.0095	1.5500	96.1165	0.0048	1.9000	99.0291	0.0048	<table border="1"> <thead> <tr> <th>UMBRAL</th> <th>FRR</th> <th>FAR</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>-1.6000</td><td>0.4854</td><td>11.2126</td></tr> <tr><td>-1.4000</td><td>0.4854</td><td>7.6813</td></tr> <tr><td>-1.2000</td><td>0.9709</td><td>4.5498</td></tr> <tr><td>-1.0000</td><td>1.9417</td><td>2.2892</td></tr> <tr><td>-0.8000</td><td>2.9126</td><td>1.0375</td></tr> <tr><td>-0.6000</td><td>3.8835</td><td>0.4664</td></tr> <tr><td>-0.4000</td><td>5.8252</td><td>0.2427</td></tr> <tr><td>-0.2000</td><td>7.2816</td><td>0.1237</td></tr> <tr><td>0.0000</td><td>9.2233</td><td>0.0714</td></tr> <tr><td>0.2000</td><td>16.9903</td><td>0.0476</td></tr> <tr><td>0.4000</td><td>24.7573</td><td>0.0190</td></tr> <tr><td>0.6000</td><td>37.8641</td><td>0.0143</td></tr> </tbody> </table>	UMBRAL	FRR	FAR	-1.6000	0.4854	11.2126	-1.4000	0.4854	7.6813	-1.2000	0.9709	4.5498	-1.0000	1.9417	2.2892	-0.8000	2.9126	1.0375	-0.6000	3.8835	0.4664	-0.4000	5.8252	0.2427	-0.2000	7.2816	0.1237	0.0000	9.2233	0.0714	0.2000	16.9903	0.0476	0.4000	24.7573	0.0190	0.6000	37.8641	0.0143
UMBRAL	FRR	FAR																																																																											
-1.6000	0.4854	12.8546																																																																											
-1.2500	0.4854	6.5772																																																																											
-0.9000	0.9709	1.8466																																																																											
-0.5500	1.9417	0.5045																																																																											
-0.2000	3.3981	0.1904																																																																											
0.1500	9.7087	0.0761																																																																											
0.5000	18.4466	0.0428																																																																											
0.8500	44.6602	0.0095																																																																											
1.2000	84.4660	0.0095																																																																											
1.5500	96.1165	0.0048																																																																											
1.9000	99.0291	0.0048																																																																											
UMBRAL	FRR	FAR																																																																											
-1.6000	0.4854	11.2126																																																																											
-1.4000	0.4854	7.6813																																																																											
-1.2000	0.9709	4.5498																																																																											
-1.0000	1.9417	2.2892																																																																											
-0.8000	2.9126	1.0375																																																																											
-0.6000	3.8835	0.4664																																																																											
-0.4000	5.8252	0.2427																																																																											
-0.2000	7.2816	0.1237																																																																											
0.0000	9.2233	0.0714																																																																											
0.2000	16.9903	0.0476																																																																											
0.4000	24.7573	0.0190																																																																											
0.6000	37.8641	0.0143																																																																											
PRUEBA 6																																																																													
<p>EER (Exponencial) = 2.187885 EER (Gaussiana) = 1.941748</p>	<table border="1"> <thead> <tr> <th>UMBRAL</th> <th>FRR</th> <th>FAR</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>-1.3500</td><td>0.9709</td><td>7.7289</td></tr> <tr><td>-1.1000</td><td>0.9709</td><td>3.8740</td></tr> <tr><td>-0.8500</td><td>3.8835</td><td>1.5420</td></tr> <tr><td>-0.6000</td><td>3.8835</td><td>0.6948</td></tr> <tr><td>-0.3500</td><td>3.8835</td><td>0.3712</td></tr> <tr><td>-0.1000</td><td>9.7087</td><td>0.1808</td></tr> <tr><td>0.1500</td><td>15.5340</td><td>0.1237</td></tr> <tr><td>0.4000</td><td>27.1845</td><td>0.0666</td></tr> <tr><td>0.6500</td><td>41.7476</td><td>0.0381</td></tr> <tr><td>0.9000</td><td>56.3107</td><td>0.0286</td></tr> <tr><td>1.1500</td><td>81.5534</td><td>0.0190</td></tr> <tr><td>1.4000</td><td>96.1165</td><td>0.0095</td></tr> </tbody> </table>	UMBRAL	FRR	FAR	-1.3500	0.9709	7.7289	-1.1000	0.9709	3.8740	-0.8500	3.8835	1.5420	-0.6000	3.8835	0.6948	-0.3500	3.8835	0.3712	-0.1000	9.7087	0.1808	0.1500	15.5340	0.1237	0.4000	27.1845	0.0666	0.6500	41.7476	0.0381	0.9000	56.3107	0.0286	1.1500	81.5534	0.0190	1.4000	96.1165	0.0095	<table border="1"> <thead> <tr> <th>UMBRAL</th> <th>FRR</th> <th>FAR</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>-1.0500</td><td>0.9709</td><td>3.0459</td></tr> <tr><td>-0.8500</td><td>1.9417</td><td>1.4944</td></tr> <tr><td>-0.6500</td><td>4.8544</td><td>0.7805</td></tr> <tr><td>-0.4500</td><td>7.7670</td><td>0.4378</td></tr> <tr><td>-0.2500</td><td>12.6214</td><td>0.2665</td></tr> <tr><td>-0.0500</td><td>17.4757</td><td>0.1618</td></tr> <tr><td>0.1500</td><td>22.3301</td><td>0.1237</td></tr> <tr><td>0.3500</td><td>28.1553</td><td>0.0952</td></tr> <tr><td>0.5500</td><td>38.8350</td><td>0.0571</td></tr> <tr><td>0.7500</td><td>51.4563</td><td>0.0381</td></tr> <tr><td>0.9500</td><td>71.8447</td><td>0.0095</td></tr> </tbody> </table>	UMBRAL	FRR	FAR	-1.0500	0.9709	3.0459	-0.8500	1.9417	1.4944	-0.6500	4.8544	0.7805	-0.4500	7.7670	0.4378	-0.2500	12.6214	0.2665	-0.0500	17.4757	0.1618	0.1500	22.3301	0.1237	0.3500	28.1553	0.0952	0.5500	38.8350	0.0571	0.7500	51.4563	0.0381	0.9500	71.8447	0.0095
UMBRAL	FRR	FAR																																																																											
-1.3500	0.9709	7.7289																																																																											
-1.1000	0.9709	3.8740																																																																											
-0.8500	3.8835	1.5420																																																																											
-0.6000	3.8835	0.6948																																																																											
-0.3500	3.8835	0.3712																																																																											
-0.1000	9.7087	0.1808																																																																											
0.1500	15.5340	0.1237																																																																											
0.4000	27.1845	0.0666																																																																											
0.6500	41.7476	0.0381																																																																											
0.9000	56.3107	0.0286																																																																											
1.1500	81.5534	0.0190																																																																											
1.4000	96.1165	0.0095																																																																											
UMBRAL	FRR	FAR																																																																											
-1.0500	0.9709	3.0459																																																																											
-0.8500	1.9417	1.4944																																																																											
-0.6500	4.8544	0.7805																																																																											
-0.4500	7.7670	0.4378																																																																											
-0.2500	12.6214	0.2665																																																																											
-0.0500	17.4757	0.1618																																																																											
0.1500	22.3301	0.1237																																																																											
0.3500	28.1553	0.0952																																																																											
0.5500	38.8350	0.0571																																																																											
0.7500	51.4563	0.0381																																																																											
0.9500	71.8447	0.0095																																																																											
PRUEBA 7																																																																													
<p>EER (Exponencial) = 1.941748 EER (Gaussiana) = 4.776862</p>	<table border="1"> <thead> <tr> <th>UMBRAL</th> <th>FRR</th> <th>FAR</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>-2.1500</td><td>0.4854</td><td>24.9239</td></tr> <tr><td>-1.6500</td><td>0.9709</td><td>13.2734</td></tr> <tr><td>-1.1500</td><td>0.9709</td><td>4.7592</td></tr> <tr><td>-0.6500</td><td>2.4272</td><td>0.9042</td></tr> <tr><td>-0.1500</td><td>9.2233</td><td>0.1761</td></tr> <tr><td>0.3500</td><td>22.8155</td><td>0.0238</td></tr> <tr><td>0.8500</td><td>53.3981</td><td>0.0190</td></tr> <tr><td>1.3500</td><td>89.3204</td><td>0.0048</td></tr> <tr><td>1.8500</td><td>98.5437</td><td>0.0048</td></tr> <tr><td>2.3500</td><td>100.0000</td><td>0.0048</td></tr> <tr><td>2.8500</td><td>100.0000</td><td>0.0048</td></tr> </tbody> </table>	UMBRAL	FRR	FAR	-2.1500	0.4854	24.9239	-1.6500	0.9709	13.2734	-1.1500	0.9709	4.7592	-0.6500	2.4272	0.9042	-0.1500	9.2233	0.1761	0.3500	22.8155	0.0238	0.8500	53.3981	0.0190	1.3500	89.3204	0.0048	1.8500	98.5437	0.0048	2.3500	100.0000	0.0048	2.8500	100.0000	0.0048	<table border="1"> <thead> <tr> <th>UMBRAL</th> <th>FRR</th> <th>FAR</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>-5.0000</td><td>0.4854</td><td>81.1727</td></tr> <tr><td>-4.3000</td><td>0.4854</td><td>72.3444</td></tr> <tr><td>-3.6000</td><td>0.4854</td><td>59.9419</td></tr> <tr><td>-2.9000</td><td>0.9709</td><td>43.0754</td></tr> <tr><td>-2.2000</td><td>2.4272</td><td>24.8144</td></tr> <tr><td>-1.5000</td><td>3.8835</td><td>9.5993</td></tr> <tr><td>-0.8000</td><td>5.8252</td><td>1.7990</td></tr> <tr><td>-0.1000</td><td>17.9612</td><td>0.2808</td></tr> <tr><td>0.6000</td><td>50.4854</td><td>0.0238</td></tr> <tr><td>1.3000</td><td>89.3204</td><td>0.0143</td></tr> <tr><td>2.0000</td><td>99.0291</td><td>0.0048</td></tr> </tbody> </table>	UMBRAL	FRR	FAR	-5.0000	0.4854	81.1727	-4.3000	0.4854	72.3444	-3.6000	0.4854	59.9419	-2.9000	0.9709	43.0754	-2.2000	2.4272	24.8144	-1.5000	3.8835	9.5993	-0.8000	5.8252	1.7990	-0.1000	17.9612	0.2808	0.6000	50.4854	0.0238	1.3000	89.3204	0.0143	2.0000	99.0291	0.0048			
UMBRAL	FRR	FAR																																																																											
-2.1500	0.4854	24.9239																																																																											
-1.6500	0.9709	13.2734																																																																											
-1.1500	0.9709	4.7592																																																																											
-0.6500	2.4272	0.9042																																																																											
-0.1500	9.2233	0.1761																																																																											
0.3500	22.8155	0.0238																																																																											
0.8500	53.3981	0.0190																																																																											
1.3500	89.3204	0.0048																																																																											
1.8500	98.5437	0.0048																																																																											
2.3500	100.0000	0.0048																																																																											
2.8500	100.0000	0.0048																																																																											
UMBRAL	FRR	FAR																																																																											
-5.0000	0.4854	81.1727																																																																											
-4.3000	0.4854	72.3444																																																																											
-3.6000	0.4854	59.9419																																																																											
-2.9000	0.9709	43.0754																																																																											
-2.2000	2.4272	24.8144																																																																											
-1.5000	3.8835	9.5993																																																																											
-0.8000	5.8252	1.7990																																																																											
-0.1000	17.9612	0.2808																																																																											
0.6000	50.4854	0.0238																																																																											
1.3000	89.3204	0.0143																																																																											
2.0000	99.0291	0.0048																																																																											

CURVA ROC	Función Exponencial	Función Gaussiana																																																																											
PRUEBA 8																																																																													
 <p>EER (Exponencial) = 4.854369 EER (Gaussiana) = 6.324818</p>	<table border="1"> <thead> <tr> <th>UMBRAL</th> <th>FRR</th> <th>FAR</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>-2.2500</td><td>0.4854</td><td>24.1386</td></tr> <tr><td>-1.9500</td><td>0.9709</td><td>17.0712</td></tr> <tr><td>-1.6500</td><td>2.4272</td><td>10.7891</td></tr> <tr><td>-1.3500</td><td>3.8835</td><td>5.8157</td></tr> <tr><td>-1.0500</td><td>6.7961</td><td>2.6413</td></tr> <tr><td>-0.7500</td><td>11.1650</td><td>0.9328</td></tr> <tr><td>-0.4500</td><td>16.5049</td><td>0.3760</td></tr> <tr><td>-0.1500</td><td>21.8447</td><td>0.1428</td></tr> <tr><td>0.1500</td><td>36.4078</td><td>0.0714</td></tr> <tr><td>0.4500</td><td>49.0291</td><td>0.0143</td></tr> <tr><td>0.7500</td><td>67.9612</td><td>0.0048</td></tr> </tbody> </table>	UMBRAL	FRR	FAR	-2.2500	0.4854	24.1386	-1.9500	0.9709	17.0712	-1.6500	2.4272	10.7891	-1.3500	3.8835	5.8157	-1.0500	6.7961	2.6413	-0.7500	11.1650	0.9328	-0.4500	16.5049	0.3760	-0.1500	21.8447	0.1428	0.1500	36.4078	0.0714	0.4500	49.0291	0.0143	0.7500	67.9612	0.0048	<table border="1"> <thead> <tr> <th>UMBRAL</th> <th>FRR</th> <th>FAR</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>-2.5000</td><td>0.4854</td><td>27.7984</td></tr> <tr><td>-2.1500</td><td>1.4563</td><td>19.4318</td></tr> <tr><td>-1.8000</td><td>3.3981</td><td>12.0836</td></tr> <tr><td>-1.4500</td><td>6.3107</td><td>6.3392</td></tr> <tr><td>-1.1000</td><td>9.2233</td><td>2.7318</td></tr> <tr><td>-0.7500</td><td>18.9320</td><td>0.9090</td></tr> <tr><td>-0.4000</td><td>24.7573</td><td>0.2284</td></tr> <tr><td>-0.0500</td><td>35.9223</td><td>0.0857</td></tr> <tr><td>0.3000</td><td>50.0000</td><td>0.0190</td></tr> <tr><td>0.6500</td><td>71.8447</td><td>0.0095</td></tr> <tr><td>1.0000</td><td>88.3495</td><td>0.0048</td></tr> </tbody> </table>	UMBRAL	FRR	FAR	-2.5000	0.4854	27.7984	-2.1500	1.4563	19.4318	-1.8000	3.3981	12.0836	-1.4500	6.3107	6.3392	-1.1000	9.2233	2.7318	-0.7500	18.9320	0.9090	-0.4000	24.7573	0.2284	-0.0500	35.9223	0.0857	0.3000	50.0000	0.0190	0.6500	71.8447	0.0095	1.0000	88.3495	0.0048			
UMBRAL	FRR	FAR																																																																											
-2.2500	0.4854	24.1386																																																																											
-1.9500	0.9709	17.0712																																																																											
-1.6500	2.4272	10.7891																																																																											
-1.3500	3.8835	5.8157																																																																											
-1.0500	6.7961	2.6413																																																																											
-0.7500	11.1650	0.9328																																																																											
-0.4500	16.5049	0.3760																																																																											
-0.1500	21.8447	0.1428																																																																											
0.1500	36.4078	0.0714																																																																											
0.4500	49.0291	0.0143																																																																											
0.7500	67.9612	0.0048																																																																											
UMBRAL	FRR	FAR																																																																											
-2.5000	0.4854	27.7984																																																																											
-2.1500	1.4563	19.4318																																																																											
-1.8000	3.3981	12.0836																																																																											
-1.4500	6.3107	6.3392																																																																											
-1.1000	9.2233	2.7318																																																																											
-0.7500	18.9320	0.9090																																																																											
-0.4000	24.7573	0.2284																																																																											
-0.0500	35.9223	0.0857																																																																											
0.3000	50.0000	0.0190																																																																											
0.6500	71.8447	0.0095																																																																											
1.0000	88.3495	0.0048																																																																											
PRUEBA 9																																																																													
 <p>EER (Exponencial) = 3.711442 EER (Gaussiana) = 5.582524</p>	<table border="1"> <thead> <tr> <th>UMBRAL</th> <th>FRR</th> <th>FAR</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>-3.0500</td><td>0.9709</td><td>47.2016</td></tr> <tr><td>-2.6000</td><td>0.9709</td><td>36.4839</td></tr> <tr><td>-2.1500</td><td>1.9417</td><td>24.7287</td></tr> <tr><td>-1.7000</td><td>2.9126</td><td>14.4965</td></tr> <tr><td>-1.2500</td><td>2.9126</td><td>5.9871</td></tr> <tr><td>-0.8000</td><td>5.8252</td><td>1.6943</td></tr> <tr><td>-0.3500</td><td>11.6505</td><td>0.6092</td></tr> <tr><td>0.1000</td><td>18.4466</td><td>0.2760</td></tr> <tr><td>0.5500</td><td>38.8350</td><td>0.0952</td></tr> <tr><td>1.0000</td><td>79.6116</td><td>0.0571</td></tr> <tr><td>1.4500</td><td>94.1748</td><td>0.0286</td></tr> </tbody> </table>	UMBRAL	FRR	FAR	-3.0500	0.9709	47.2016	-2.6000	0.9709	36.4839	-2.1500	1.9417	24.7287	-1.7000	2.9126	14.4965	-1.2500	2.9126	5.9871	-0.8000	5.8252	1.6943	-0.3500	11.6505	0.6092	0.1000	18.4466	0.2760	0.5500	38.8350	0.0952	1.0000	79.6116	0.0571	1.4500	94.1748	0.0286	<table border="1"> <thead> <tr> <th>UMBRAL</th> <th>FRR</th> <th>FAR</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>-2.4500</td><td>1.9417</td><td>30.4493</td></tr> <tr><td>-2.1000</td><td>1.9417</td><td>21.3021</td></tr> <tr><td>-1.7500</td><td>3.8835</td><td>13.8492</td></tr> <tr><td>-1.4000</td><td>4.8544</td><td>7.4148</td></tr> <tr><td>-1.0500</td><td>5.8252</td><td>3.3981</td></tr> <tr><td>-0.7000</td><td>7.7670</td><td>1.2755</td></tr> <tr><td>-0.3500</td><td>12.6214</td><td>0.5235</td></tr> <tr><td>0.0000</td><td>17.4757</td><td>0.1999</td></tr> <tr><td>0.3500</td><td>33.9806</td><td>0.0952</td></tr> <tr><td>0.7000</td><td>55.3398</td><td>0.0476</td></tr> <tr><td>1.0500</td><td>83.4951</td><td>0.0095</td></tr> </tbody> </table>	UMBRAL	FRR	FAR	-2.4500	1.9417	30.4493	-2.1000	1.9417	21.3021	-1.7500	3.8835	13.8492	-1.4000	4.8544	7.4148	-1.0500	5.8252	3.3981	-0.7000	7.7670	1.2755	-0.3500	12.6214	0.5235	0.0000	17.4757	0.1999	0.3500	33.9806	0.0952	0.7000	55.3398	0.0476	1.0500	83.4951	0.0095			
UMBRAL	FRR	FAR																																																																											
-3.0500	0.9709	47.2016																																																																											
-2.6000	0.9709	36.4839																																																																											
-2.1500	1.9417	24.7287																																																																											
-1.7000	2.9126	14.4965																																																																											
-1.2500	2.9126	5.9871																																																																											
-0.8000	5.8252	1.6943																																																																											
-0.3500	11.6505	0.6092																																																																											
0.1000	18.4466	0.2760																																																																											
0.5500	38.8350	0.0952																																																																											
1.0000	79.6116	0.0571																																																																											
1.4500	94.1748	0.0286																																																																											
UMBRAL	FRR	FAR																																																																											
-2.4500	1.9417	30.4493																																																																											
-2.1000	1.9417	21.3021																																																																											
-1.7500	3.8835	13.8492																																																																											
-1.4000	4.8544	7.4148																																																																											
-1.0500	5.8252	3.3981																																																																											
-0.7000	7.7670	1.2755																																																																											
-0.3500	12.6214	0.5235																																																																											
0.0000	17.4757	0.1999																																																																											
0.3500	33.9806	0.0952																																																																											
0.7000	55.3398	0.0476																																																																											
1.0500	83.4951	0.0095																																																																											
PRUEBA 10																																																																													
 <p>EER (Exponencial) = 0.485437 EER (Gaussiana) = 0.970874</p>	<table border="1"> <thead> <tr> <th>UMBRAL</th> <th>FRR</th> <th>FAR</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>-0.9500</td><td>0.4854</td><td>1.1232</td></tr> <tr><td>-0.7500</td><td>0.4854</td><td>0.3712</td></tr> <tr><td>-0.5500</td><td>0.9709</td><td>0.1333</td></tr> <tr><td>-0.3500</td><td>0.9709</td><td>0.0714</td></tr> <tr><td>-0.1500</td><td>2.4272</td><td>0.0524</td></tr> <tr><td>0.0500</td><td>3.8835</td><td>0.0238</td></tr> <tr><td>0.2500</td><td>5.8252</td><td>0.0190</td></tr> <tr><td>0.4500</td><td>11.6505</td><td>0.0095</td></tr> <tr><td>0.6500</td><td>15.0485</td><td>0.0095</td></tr> <tr><td>0.8500</td><td>24.7573</td><td>0.0048</td></tr> <tr><td>1.0500</td><td>55.8252</td><td>0.0048</td></tr> </tbody> </table>	UMBRAL	FRR	FAR	-0.9500	0.4854	1.1232	-0.7500	0.4854	0.3712	-0.5500	0.9709	0.1333	-0.3500	0.9709	0.0714	-0.1500	2.4272	0.0524	0.0500	3.8835	0.0238	0.2500	5.8252	0.0190	0.4500	11.6505	0.0095	0.6500	15.0485	0.0095	0.8500	24.7573	0.0048	1.0500	55.8252	0.0048	<table border="1"> <thead> <tr> <th>UMBRAL</th> <th>FRR</th> <th>FAR</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>-1.4000</td><td>0.4854</td><td>7.6861</td></tr> <tr><td>-1.1000</td><td>0.4854</td><td>2.7460</td></tr> <tr><td>-0.8000</td><td>0.9709</td><td>0.4759</td></tr> <tr><td>-0.5000</td><td>0.9709</td><td>0.1237</td></tr> <tr><td>-0.2000</td><td>3.3981</td><td>0.0524</td></tr> <tr><td>0.1000</td><td>4.8544</td><td>0.0143</td></tr> <tr><td>0.4000</td><td>10.6796</td><td>0.0095</td></tr> <tr><td>0.7000</td><td>16.9903</td><td>0.0048</td></tr> <tr><td>1.0000</td><td>48.5437</td><td>0.0048</td></tr> <tr><td>1.3000</td><td>88.3495</td><td>0.0048</td></tr> <tr><td>1.6000</td><td>97.5728</td><td>0.0048</td></tr> </tbody> </table>	UMBRAL	FRR	FAR	-1.4000	0.4854	7.6861	-1.1000	0.4854	2.7460	-0.8000	0.9709	0.4759	-0.5000	0.9709	0.1237	-0.2000	3.3981	0.0524	0.1000	4.8544	0.0143	0.4000	10.6796	0.0095	0.7000	16.9903	0.0048	1.0000	48.5437	0.0048	1.3000	88.3495	0.0048	1.6000	97.5728	0.0048			
UMBRAL	FRR	FAR																																																																											
-0.9500	0.4854	1.1232																																																																											
-0.7500	0.4854	0.3712																																																																											
-0.5500	0.9709	0.1333																																																																											
-0.3500	0.9709	0.0714																																																																											
-0.1500	2.4272	0.0524																																																																											
0.0500	3.8835	0.0238																																																																											
0.2500	5.8252	0.0190																																																																											
0.4500	11.6505	0.0095																																																																											
0.6500	15.0485	0.0095																																																																											
0.8500	24.7573	0.0048																																																																											
1.0500	55.8252	0.0048																																																																											
UMBRAL	FRR	FAR																																																																											
-1.4000	0.4854	7.6861																																																																											
-1.1000	0.4854	2.7460																																																																											
-0.8000	0.9709	0.4759																																																																											
-0.5000	0.9709	0.1237																																																																											
-0.2000	3.3981	0.0524																																																																											
0.1000	4.8544	0.0143																																																																											
0.4000	10.6796	0.0095																																																																											
0.7000	16.9903	0.0048																																																																											
1.0000	48.5437	0.0048																																																																											
1.3000	88.3495	0.0048																																																																											
1.6000	97.5728	0.0048																																																																											
PRUEBA 11																																																																													
 <p>EER (Exponencial) = 0.485437 EER (Gaussiana) = 0.833612</p>	<table border="1"> <thead> <tr> <th>UMBRAL</th> <th>FRR</th> <th>FAR</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>-1.3000</td><td>0.4854</td><td>6.5010</td></tr> <tr><td>-1.1000</td><td>0.4854</td><td>3.3124</td></tr> <tr><td>-0.9000</td><td>0.4854</td><td>1.0518</td></tr> <tr><td>-0.7000</td><td>0.4854</td><td>0.3950</td></tr> <tr><td>-0.5000</td><td>0.9709</td><td>0.1856</td></tr> <tr><td>-0.3000</td><td>0.9709</td><td>0.0904</td></tr> <tr><td>-0.1000</td><td>1.9417</td><td>0.0524</td></tr> <tr><td>0.1000</td><td>2.9126</td><td>0.0333</td></tr> <tr><td>0.3000</td><td>6.3107</td><td>0.0238</td></tr> <tr><td>0.5000</td><td>11.1650</td><td>0.0190</td></tr> <tr><td>0.7000</td><td>17.4757</td><td>0.0095</td></tr> <tr><td>0.9000</td><td>39.3204</td><td>0.0095</td></tr> </tbody> </table>	UMBRAL	FRR	FAR	-1.3000	0.4854	6.5010	-1.1000	0.4854	3.3124	-0.9000	0.4854	1.0518	-0.7000	0.4854	0.3950	-0.5000	0.9709	0.1856	-0.3000	0.9709	0.0904	-0.1000	1.9417	0.0524	0.1000	2.9126	0.0333	0.3000	6.3107	0.0238	0.5000	11.1650	0.0190	0.7000	17.4757	0.0095	0.9000	39.3204	0.0095	<table border="1"> <thead> <tr> <th>UMBRAL</th> <th>FRR</th> <th>FAR</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>-1.0000</td><td>0.4854</td><td>1.8751</td></tr> <tr><td>-0.5500</td><td>1.4563</td><td>0.2903</td></tr> <tr><td>-0.1000</td><td>4.8544</td><td>0.0714</td></tr> <tr><td>0.3500</td><td>12.1359</td><td>0.0238</td></tr> <tr><td>0.8000</td><td>31.5534</td><td>0.0048</td></tr> <tr><td>1.2500</td><td>89.3204</td><td>0.0048</td></tr> <tr><td>1.7000</td><td>97.5728</td><td>0.0048</td></tr> <tr><td>2.1500</td><td>100.0000</td><td>0.0048</td></tr> <tr><td>2.6000</td><td>100.0000</td><td>0.0048</td></tr> <tr><td>3.0500</td><td>100.0000</td><td>0.0048</td></tr> <tr><td>3.5000</td><td>100.0000</td><td>0.0048</td></tr> </tbody> </table>	UMBRAL	FRR	FAR	-1.0000	0.4854	1.8751	-0.5500	1.4563	0.2903	-0.1000	4.8544	0.0714	0.3500	12.1359	0.0238	0.8000	31.5534	0.0048	1.2500	89.3204	0.0048	1.7000	97.5728	0.0048	2.1500	100.0000	0.0048	2.6000	100.0000	0.0048	3.0500	100.0000	0.0048	3.5000	100.0000	0.0048
UMBRAL	FRR	FAR																																																																											
-1.3000	0.4854	6.5010																																																																											
-1.1000	0.4854	3.3124																																																																											
-0.9000	0.4854	1.0518																																																																											
-0.7000	0.4854	0.3950																																																																											
-0.5000	0.9709	0.1856																																																																											
-0.3000	0.9709	0.0904																																																																											
-0.1000	1.9417	0.0524																																																																											
0.1000	2.9126	0.0333																																																																											
0.3000	6.3107	0.0238																																																																											
0.5000	11.1650	0.0190																																																																											
0.7000	17.4757	0.0095																																																																											
0.9000	39.3204	0.0095																																																																											
UMBRAL	FRR	FAR																																																																											
-1.0000	0.4854	1.8751																																																																											
-0.5500	1.4563	0.2903																																																																											
-0.1000	4.8544	0.0714																																																																											
0.3500	12.1359	0.0238																																																																											
0.8000	31.5534	0.0048																																																																											
1.2500	89.3204	0.0048																																																																											
1.7000	97.5728	0.0048																																																																											
2.1500	100.0000	0.0048																																																																											
2.6000	100.0000	0.0048																																																																											
3.0500	100.0000	0.0048																																																																											
3.5000	100.0000	0.0048																																																																											

Anexo C: Resultados experimentales completos

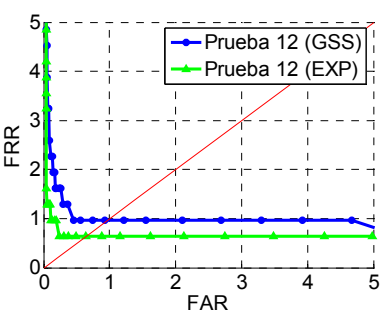
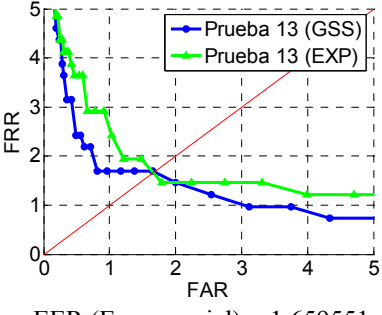
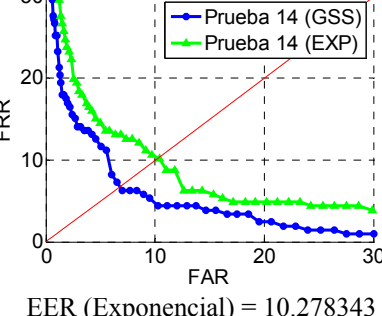
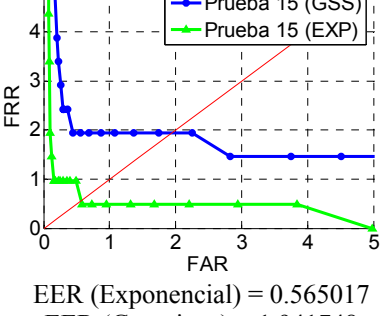
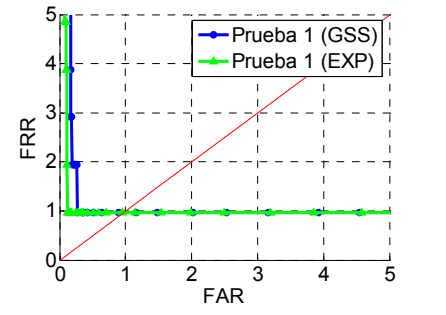
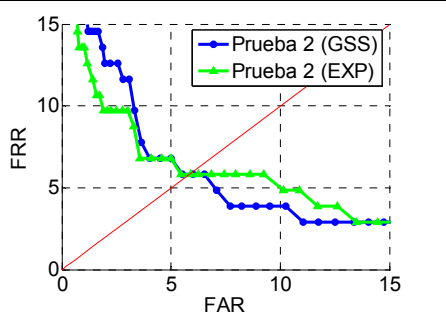
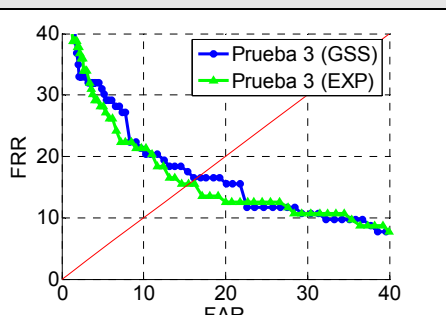
CURVA ROC	Función Exponencial	Función Gaussiana																																																																											
PRUEBA 12																																																																													
 <p>EER (Exponencial) = 0.647249 EER (Gaussiana) = 0.970874</p>	<table border="1"> <thead> <tr> <th>UMBRAL</th> <th>FRR</th> <th>FAR</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>-1.4000</td><td>0.3236</td><td>7.6274</td></tr> <tr><td>-1.0500</td><td>0.6472</td><td>2.1289</td></tr> <tr><td>-0.7000</td><td>0.6472</td><td>0.3014</td></tr> <tr><td>-0.3500</td><td>1.2945</td><td>0.0825</td></tr> <tr><td>0.0000</td><td>1.6181</td><td>0.0444</td></tr> <tr><td>0.3500</td><td>5.8252</td><td>0.0349</td></tr> <tr><td>0.7000</td><td>13.5922</td><td>0.0222</td></tr> <tr><td>1.0500</td><td>60.8414</td><td>0.0127</td></tr> <tr><td>1.4000</td><td>93.2039</td><td>0.0095</td></tr> <tr><td>1.7500</td><td>99.3528</td><td>0.0063</td></tr> <tr><td>2.1000</td><td>100.0000</td><td>0.0063</td></tr> </tbody> </table>	UMBRAL	FRR	FAR	-1.4000	0.3236	7.6274	-1.0500	0.6472	2.1289	-0.7000	0.6472	0.3014	-0.3500	1.2945	0.0825	0.0000	1.6181	0.0444	0.3500	5.8252	0.0349	0.7000	13.5922	0.0222	1.0500	60.8414	0.0127	1.4000	93.2039	0.0095	1.7500	99.3528	0.0063	2.1000	100.0000	0.0063	<table border="1"> <thead> <tr> <th>UMBRAL</th> <th>FRR</th> <th>FAR</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>-1.5000</td><td>0.6472</td><td>8.5665</td></tr> <tr><td>-1.0500</td><td>0.9709</td><td>2.1036</td></tr> <tr><td>-0.6000</td><td>1.6181</td><td>0.2602</td></tr> <tr><td>-0.1500</td><td>3.2362</td><td>0.0698</td></tr> <tr><td>0.3000</td><td>8.0906</td><td>0.0286</td></tr> <tr><td>0.7500</td><td>23.3010</td><td>0.0095</td></tr> <tr><td>1.2000</td><td>81.5534</td><td>0.0063</td></tr> <tr><td>1.6500</td><td>97.0874</td><td>0.0063</td></tr> <tr><td>2.1000</td><td>99.6764</td><td>0.0063</td></tr> <tr><td>2.5500</td><td>100.0000</td><td>0.0063</td></tr> <tr><td>3.0000</td><td>100.0000</td><td>0.0032</td></tr> </tbody> </table>	UMBRAL	FRR	FAR	-1.5000	0.6472	8.5665	-1.0500	0.9709	2.1036	-0.6000	1.6181	0.2602	-0.1500	3.2362	0.0698	0.3000	8.0906	0.0286	0.7500	23.3010	0.0095	1.2000	81.5534	0.0063	1.6500	97.0874	0.0063	2.1000	99.6764	0.0063	2.5500	100.0000	0.0063	3.0000	100.0000	0.0032			
UMBRAL	FRR	FAR																																																																											
-1.4000	0.3236	7.6274																																																																											
-1.0500	0.6472	2.1289																																																																											
-0.7000	0.6472	0.3014																																																																											
-0.3500	1.2945	0.0825																																																																											
0.0000	1.6181	0.0444																																																																											
0.3500	5.8252	0.0349																																																																											
0.7000	13.5922	0.0222																																																																											
1.0500	60.8414	0.0127																																																																											
1.4000	93.2039	0.0095																																																																											
1.7500	99.3528	0.0063																																																																											
2.1000	100.0000	0.0063																																																																											
UMBRAL	FRR	FAR																																																																											
-1.5000	0.6472	8.5665																																																																											
-1.0500	0.9709	2.1036																																																																											
-0.6000	1.6181	0.2602																																																																											
-0.1500	3.2362	0.0698																																																																											
0.3000	8.0906	0.0286																																																																											
0.7500	23.3010	0.0095																																																																											
1.2000	81.5534	0.0063																																																																											
1.6500	97.0874	0.0063																																																																											
2.1000	99.6764	0.0063																																																																											
2.5500	100.0000	0.0063																																																																											
3.0000	100.0000	0.0032																																																																											
PRUEBA 13																																																																													
 <p>EER (Exponencial) = 1.659551 EER (Gaussiana) = 1.682256</p>	<table border="1"> <thead> <tr> <th>UMBRAL</th> <th>FRR</th> <th>FAR</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>-1.7500</td><td>0.2427</td><td>14.2490</td></tr> <tr><td>-1.3500</td><td>0.9709</td><td>6.9960</td></tr> <tr><td>-0.9500</td><td>1.4563</td><td>1.7871</td></tr> <tr><td>-0.5500</td><td>3.6408</td><td>0.5402</td></tr> <tr><td>-0.1500</td><td>4.8544</td><td>0.2094</td></tr> <tr><td>0.2500</td><td>7.7670</td><td>0.0714</td></tr> <tr><td>0.6500</td><td>16.7476</td><td>0.0381</td></tr> <tr><td>1.0500</td><td>60.1942</td><td>0.0214</td></tr> <tr><td>1.4500</td><td>91.7476</td><td>0.0095</td></tr> <tr><td>1.8500</td><td>98.7864</td><td>0.0071</td></tr> <tr><td>2.2500</td><td>99.5146</td><td>0.0024</td></tr> </tbody> </table>	UMBRAL	FRR	FAR	-1.7500	0.2427	14.2490	-1.3500	0.9709	6.9960	-0.9500	1.4563	1.7871	-0.5500	3.6408	0.5402	-0.1500	4.8544	0.2094	0.2500	7.7670	0.0714	0.6500	16.7476	0.0381	1.0500	60.1942	0.0214	1.4500	91.7476	0.0095	1.8500	98.7864	0.0071	2.2500	99.5146	0.0024	<table border="1"> <thead> <tr> <th>UMBRAL</th> <th>FRR</th> <th>FAR</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>-1.5000</td><td>0.4854</td><td>8.7902</td></tr> <tr><td>-1.0500</td><td>1.2136</td><td>2.5438</td></tr> <tr><td>-0.6000</td><td>2.4272</td><td>0.5544</td></tr> <tr><td>-0.1500</td><td>5.0971</td><td>0.1571</td></tr> <tr><td>0.3000</td><td>9.9515</td><td>0.0476</td></tr> <tr><td>0.7500</td><td>25.4854</td><td>0.0167</td></tr> <tr><td>1.2000</td><td>78.8835</td><td>0.0071</td></tr> <tr><td>1.6500</td><td>96.1165</td><td>0.0071</td></tr> <tr><td>2.1000</td><td>98.5437</td><td>0.0071</td></tr> <tr><td>2.5500</td><td>99.7573</td><td>0.0048</td></tr> <tr><td>3.0000</td><td>100.0000</td><td>0.0024</td></tr> </tbody> </table>	UMBRAL	FRR	FAR	-1.5000	0.4854	8.7902	-1.0500	1.2136	2.5438	-0.6000	2.4272	0.5544	-0.1500	5.0971	0.1571	0.3000	9.9515	0.0476	0.7500	25.4854	0.0167	1.2000	78.8835	0.0071	1.6500	96.1165	0.0071	2.1000	98.5437	0.0071	2.5500	99.7573	0.0048	3.0000	100.0000	0.0024			
UMBRAL	FRR	FAR																																																																											
-1.7500	0.2427	14.2490																																																																											
-1.3500	0.9709	6.9960																																																																											
-0.9500	1.4563	1.7871																																																																											
-0.5500	3.6408	0.5402																																																																											
-0.1500	4.8544	0.2094																																																																											
0.2500	7.7670	0.0714																																																																											
0.6500	16.7476	0.0381																																																																											
1.0500	60.1942	0.0214																																																																											
1.4500	91.7476	0.0095																																																																											
1.8500	98.7864	0.0071																																																																											
2.2500	99.5146	0.0024																																																																											
UMBRAL	FRR	FAR																																																																											
-1.5000	0.4854	8.7902																																																																											
-1.0500	1.2136	2.5438																																																																											
-0.6000	2.4272	0.5544																																																																											
-0.1500	5.0971	0.1571																																																																											
0.3000	9.9515	0.0476																																																																											
0.7500	25.4854	0.0167																																																																											
1.2000	78.8835	0.0071																																																																											
1.6500	96.1165	0.0071																																																																											
2.1000	98.5437	0.0071																																																																											
2.5500	99.7573	0.0048																																																																											
3.0000	100.0000	0.0024																																																																											
PRUEBA 14																																																																													
 <p>EER (Exponencial) = 10.278343 EER (Gaussiana) = 6.755138</p>	<table border="1"> <thead> <tr> <th>UMBRAL</th> <th>FRR</th> <th>FAR</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>-10.0000</td><td>0.4854</td><td>98.4818</td></tr> <tr><td>-8.6000</td><td>0.4854</td><td>96.3497</td></tr> <tr><td>-7.2000</td><td>0.4854</td><td>92.3139</td></tr> <tr><td>-5.8000</td><td>0.4854</td><td>84.5326</td></tr> <tr><td>-4.4000</td><td>0.9709</td><td>69.5555</td></tr> <tr><td>-3.0000</td><td>1.4563</td><td>42.5424</td></tr> <tr><td>-1.6000</td><td>6.3107</td><td>12.6356</td></tr> <tr><td>-0.2000</td><td>27.6699</td><td>1.3516</td></tr> <tr><td>1.2000</td><td>79.6116</td><td>0.1142</td></tr> <tr><td>2.6000</td><td>99.0291</td><td>0.0190</td></tr> <tr><td>4.0000</td><td>100.0000</td><td>0.0048</td></tr> </tbody> </table>	UMBRAL	FRR	FAR	-10.0000	0.4854	98.4818	-8.6000	0.4854	96.3497	-7.2000	0.4854	92.3139	-5.8000	0.4854	84.5326	-4.4000	0.9709	69.5555	-3.0000	1.4563	42.5424	-1.6000	6.3107	12.6356	-0.2000	27.6699	1.3516	1.2000	79.6116	0.1142	2.6000	99.0291	0.0190	4.0000	100.0000	0.0048	<table border="1"> <thead> <tr> <th>UMBRAL</th> <th>FRR</th> <th>FAR</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>-6.0500</td><td>0.4854</td><td>88.9968</td></tr> <tr><td>-5.1500</td><td>0.4854</td><td>81.8294</td></tr> <tr><td>-4.2500</td><td>0.4854</td><td>70.2694</td></tr> <tr><td>-3.3500</td><td>0.4854</td><td>53.5313</td></tr> <tr><td>-2.4500</td><td>0.9709</td><td>31.2631</td></tr> <tr><td>-1.5500</td><td>4.3689</td><td>11.9884</td></tr> <tr><td>-0.6500</td><td>15.0485</td><td>2.6889</td></tr> <tr><td>0.2500</td><td>32.0388</td><td>0.4950</td></tr> <tr><td>1.1500</td><td>76.6990</td><td>0.0952</td></tr> <tr><td>2.0500</td><td>97.5728</td><td>0.0143</td></tr> <tr><td>2.9500</td><td>99.0291</td><td>0.0048</td></tr> </tbody> </table>	UMBRAL	FRR	FAR	-6.0500	0.4854	88.9968	-5.1500	0.4854	81.8294	-4.2500	0.4854	70.2694	-3.3500	0.4854	53.5313	-2.4500	0.9709	31.2631	-1.5500	4.3689	11.9884	-0.6500	15.0485	2.6889	0.2500	32.0388	0.4950	1.1500	76.6990	0.0952	2.0500	97.5728	0.0143	2.9500	99.0291	0.0048			
UMBRAL	FRR	FAR																																																																											
-10.0000	0.4854	98.4818																																																																											
-8.6000	0.4854	96.3497																																																																											
-7.2000	0.4854	92.3139																																																																											
-5.8000	0.4854	84.5326																																																																											
-4.4000	0.9709	69.5555																																																																											
-3.0000	1.4563	42.5424																																																																											
-1.6000	6.3107	12.6356																																																																											
-0.2000	27.6699	1.3516																																																																											
1.2000	79.6116	0.1142																																																																											
2.6000	99.0291	0.0190																																																																											
4.0000	100.0000	0.0048																																																																											
UMBRAL	FRR	FAR																																																																											
-6.0500	0.4854	88.9968																																																																											
-5.1500	0.4854	81.8294																																																																											
-4.2500	0.4854	70.2694																																																																											
-3.3500	0.4854	53.5313																																																																											
-2.4500	0.9709	31.2631																																																																											
-1.5500	4.3689	11.9884																																																																											
-0.6500	15.0485	2.6889																																																																											
0.2500	32.0388	0.4950																																																																											
1.1500	76.6990	0.0952																																																																											
2.0500	97.5728	0.0143																																																																											
2.9500	99.0291	0.0048																																																																											
PRUEBA 15																																																																													
 <p>EER (Exponencial) = 0.565017 EER (Gaussiana) = 1.941748</p>	<table border="1"> <thead> <tr> <th>UMBRAL</th> <th>FRR</th> <th>FAR</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>-1.0500</td><td>0.4854</td><td>3.8454</td></tr> <tr><td>-0.8000</td><td>0.4854</td><td>0.9518</td></tr> <tr><td>-0.5500</td><td>0.9709</td><td>0.3474</td></tr> <tr><td>-0.3000</td><td>0.9709</td><td>0.1713</td></tr> <tr><td>-0.0500</td><td>4.3689</td><td>0.0761</td></tr> <tr><td>0.2000</td><td>7.7670</td><td>0.0428</td></tr> <tr><td>0.4500</td><td>13.1068</td><td>0.0286</td></tr> <tr><td>0.7000</td><td>24.7573</td><td>0.0095</td></tr> <tr><td>0.9500</td><td>58.2524</td><td>0.0095</td></tr> <tr><td>1.2000</td><td>93.2039</td><td>0.0095</td></tr> <tr><td>1.4500</td><td>97.5728</td><td>0.0095</td></tr> <tr><td>1.7000</td><td>99.0291</td><td>0.0048</td></tr> </tbody> </table>	UMBRAL	FRR	FAR	-1.0500	0.4854	3.8454	-0.8000	0.4854	0.9518	-0.5500	0.9709	0.3474	-0.3000	0.9709	0.1713	-0.0500	4.3689	0.0761	0.2000	7.7670	0.0428	0.4500	13.1068	0.0286	0.7000	24.7573	0.0095	0.9500	58.2524	0.0095	1.2000	93.2039	0.0095	1.4500	97.5728	0.0095	1.7000	99.0291	0.0048	<table border="1"> <thead> <tr> <th>UMBRAL</th> <th>FRR</th> <th>FAR</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>-2.1500</td><td>0.4854</td><td>30.2779</td></tr> <tr><td>-1.7000</td><td>0.4854</td><td>17.9326</td></tr> <tr><td>-1.2500</td><td>0.9709</td><td>7.4624</td></tr> <tr><td>-0.8000</td><td>1.9417</td><td>1.0803</td></tr> <tr><td>-0.3500</td><td>3.3981</td><td>0.2189</td></tr> <tr><td>0.1000</td><td>6.3107</td><td>0.0524</td></tr> <tr><td>0.5500</td><td>18.4466</td><td>0.0238</td></tr> <tr><td>1.0000</td><td>75.2427</td><td>0.0095</td></tr> <tr><td>1.4500</td><td>99.0291</td><td>0.0048</td></tr> <tr><td>1.9000</td><td>100.0000</td><td>0.0048</td></tr> <tr><td>2.3500</td><td>100.0000</td><td>0.0048</td></tr> </tbody> </table>	UMBRAL	FRR	FAR	-2.1500	0.4854	30.2779	-1.7000	0.4854	17.9326	-1.2500	0.9709	7.4624	-0.8000	1.9417	1.0803	-0.3500	3.3981	0.2189	0.1000	6.3107	0.0524	0.5500	18.4466	0.0238	1.0000	75.2427	0.0095	1.4500	99.0291	0.0048	1.9000	100.0000	0.0048	2.3500	100.0000	0.0048
UMBRAL	FRR	FAR																																																																											
-1.0500	0.4854	3.8454																																																																											
-0.8000	0.4854	0.9518																																																																											
-0.5500	0.9709	0.3474																																																																											
-0.3000	0.9709	0.1713																																																																											
-0.0500	4.3689	0.0761																																																																											
0.2000	7.7670	0.0428																																																																											
0.4500	13.1068	0.0286																																																																											
0.7000	24.7573	0.0095																																																																											
0.9500	58.2524	0.0095																																																																											
1.2000	93.2039	0.0095																																																																											
1.4500	97.5728	0.0095																																																																											
1.7000	99.0291	0.0048																																																																											
UMBRAL	FRR	FAR																																																																											
-2.1500	0.4854	30.2779																																																																											
-1.7000	0.4854	17.9326																																																																											
-1.2500	0.9709	7.4624																																																																											
-0.8000	1.9417	1.0803																																																																											
-0.3500	3.3981	0.2189																																																																											
0.1000	6.3107	0.0524																																																																											
0.5500	18.4466	0.0238																																																																											
1.0000	75.2427	0.0095																																																																											
1.4500	99.0291	0.0048																																																																											
1.9000	100.0000	0.0048																																																																											
2.3500	100.0000	0.0048																																																																											

Tabla C. 5. Resultados Verificador 2.5D (rango), tamaño de imagen 400x400 píxeles y distintas funciones de ecualización: exponencial y gaussiana. Para cada prueba y función de ecualización, se presentan de izquierda a derecha: curva ROC y EER (%), datos numéricos en torno al EER: Umbral de aceptación, Tasa de Falso Rechazo (FRR) y Tasa de Falsa Aceptación (FAR).

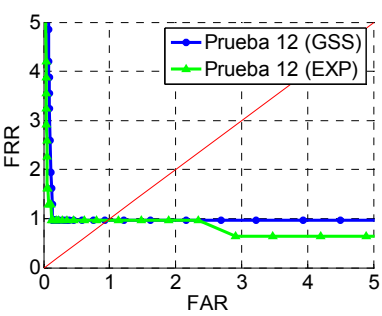
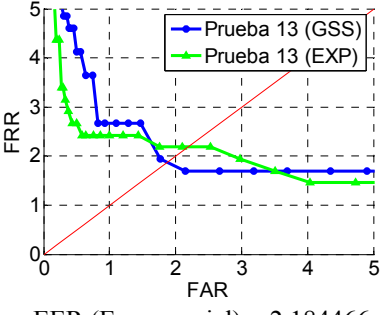
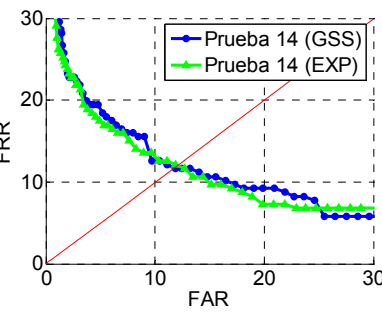
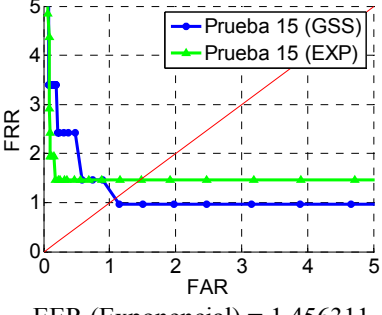
CURVA ROC	Función Exponencial	Función Gaussiana																																																																								
PRUEBA 1																																																																										
 <p>EER (Exponencial) = 0.970874 EER (Gaussiana) = 0.970874</p>	<table border="1"> <thead> <tr> <th>UMBRAL</th> <th>FRR</th> <th>FAR</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>-8.3000</td><td>0.9709</td><td>96.2117</td></tr> <tr><td>-7.2500</td><td>0.9709</td><td>93.5370</td></tr> <tr><td>-6.2000</td><td>0.9709</td><td>89.0444</td></tr> <tr><td>-5.1500</td><td>0.9709</td><td>80.9728</td></tr> <tr><td>-4.1000</td><td>0.9709</td><td>67.4948</td></tr> <tr><td>-3.0500</td><td>0.9709</td><td>45.6787</td></tr> <tr><td>-2.0000</td><td>0.9709</td><td>19.4365</td></tr> <tr><td>-0.9500</td><td>0.9709</td><td>1.5325</td></tr> <tr><td>0.1000</td><td>4.8544</td><td>0.0952</td></tr> <tr><td>1.1500</td><td>72.8155</td><td>0.0571</td></tr> <tr><td>2.2000</td><td>99.0291</td><td>0.0095</td></tr> </tbody> </table>	UMBRAL	FRR	FAR	-8.3000	0.9709	96.2117	-7.2500	0.9709	93.5370	-6.2000	0.9709	89.0444	-5.1500	0.9709	80.9728	-4.1000	0.9709	67.4948	-3.0500	0.9709	45.6787	-2.0000	0.9709	19.4365	-0.9500	0.9709	1.5325	0.1000	4.8544	0.0952	1.1500	72.8155	0.0571	2.2000	99.0291	0.0095	<table border="1"> <thead> <tr> <th>UMBRAL</th> <th>FRR</th> <th>FAR</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>-9.7000</td><td>0.9709</td><td>97.3158</td></tr> <tr><td>-8.4000</td><td>0.9709</td><td>95.3360</td></tr> <tr><td>-7.1000</td><td>0.9709</td><td>91.1765</td></tr> <tr><td>-5.8000</td><td>0.9709</td><td>83.2953</td></tr> <tr><td>-4.5000</td><td>0.9709</td><td>68.4561</td></tr> <tr><td>-3.2000</td><td>0.9709</td><td>45.6025</td></tr> <tr><td>-1.9000</td><td>0.9709</td><td>16.4002</td></tr> <tr><td>-0.6000</td><td>0.9709</td><td>0.3427</td></tr> <tr><td>0.7000</td><td>22.3301</td><td>0.0666</td></tr> <tr><td>2.0000</td><td>99.0291</td><td>0.0286</td></tr> <tr><td>3.3000</td><td>100.0000</td><td>0.0095</td></tr> </tbody> </table>	UMBRAL	FRR	FAR	-9.7000	0.9709	97.3158	-8.4000	0.9709	95.3360	-7.1000	0.9709	91.1765	-5.8000	0.9709	83.2953	-4.5000	0.9709	68.4561	-3.2000	0.9709	45.6025	-1.9000	0.9709	16.4002	-0.6000	0.9709	0.3427	0.7000	22.3301	0.0666	2.0000	99.0291	0.0286	3.3000	100.0000	0.0095
UMBRAL	FRR	FAR																																																																								
-8.3000	0.9709	96.2117																																																																								
-7.2500	0.9709	93.5370																																																																								
-6.2000	0.9709	89.0444																																																																								
-5.1500	0.9709	80.9728																																																																								
-4.1000	0.9709	67.4948																																																																								
-3.0500	0.9709	45.6787																																																																								
-2.0000	0.9709	19.4365																																																																								
-0.9500	0.9709	1.5325																																																																								
0.1000	4.8544	0.0952																																																																								
1.1500	72.8155	0.0571																																																																								
2.2000	99.0291	0.0095																																																																								
UMBRAL	FRR	FAR																																																																								
-9.7000	0.9709	97.3158																																																																								
-8.4000	0.9709	95.3360																																																																								
-7.1000	0.9709	91.1765																																																																								
-5.8000	0.9709	83.2953																																																																								
-4.5000	0.9709	68.4561																																																																								
-3.2000	0.9709	45.6025																																																																								
-1.9000	0.9709	16.4002																																																																								
-0.6000	0.9709	0.3427																																																																								
0.7000	22.3301	0.0666																																																																								
2.0000	99.0291	0.0286																																																																								
3.3000	100.0000	0.0095																																																																								
PRUEBA 2																																																																										
 <p>EER (Exponencial) = 5.825243 EER (Gaussiana) = 5.825243</p>	<table border="1"> <thead> <tr> <th>UMBRAL</th> <th>FRR</th> <th>FAR</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>-3.3500</td><td>0.9709</td><td>45.7738</td></tr> <tr><td>-2.8000</td><td>0.9709</td><td>33.6284</td></tr> <tr><td>-2.2500</td><td>0.9709</td><td>21.5401</td></tr> <tr><td>-1.7000</td><td>4.8544</td><td>10.8605</td></tr> <tr><td>-1.1500</td><td>6.7961</td><td>4.5593</td></tr> <tr><td>-0.6000</td><td>10.6796</td><td>1.5991</td></tr> <tr><td>-0.0500</td><td>22.3301</td><td>0.3903</td></tr> <tr><td>0.5000</td><td>33.9806</td><td>0.1142</td></tr> <tr><td>1.0500</td><td>65.0485</td><td>0.0286</td></tr> <tr><td>1.6000</td><td>89.3204</td><td>0.0095</td></tr> <tr><td>2.1500</td><td>99.0291</td><td>0.0095</td></tr> </tbody> </table>	UMBRAL	FRR	FAR	-3.3500	0.9709	45.7738	-2.8000	0.9709	33.6284	-2.2500	0.9709	21.5401	-1.7000	4.8544	10.8605	-1.1500	6.7961	4.5593	-0.6000	10.6796	1.5991	-0.0500	22.3301	0.3903	0.5000	33.9806	0.1142	1.0500	65.0485	0.0286	1.6000	89.3204	0.0095	2.1500	99.0291	0.0095	<table border="1"> <thead> <tr> <th>UMBRAL</th> <th>FRR</th> <th>FAR</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>-2.5000</td><td>0.9709</td><td>26.3849</td></tr> <tr><td>-2.1000</td><td>1.9417</td><td>18.4371</td></tr> <tr><td>-1.7000</td><td>2.9126</td><td>11.7552</td></tr> <tr><td>-1.3000</td><td>5.8252</td><td>6.5391</td></tr> <tr><td>-0.9000</td><td>11.6505</td><td>3.0649</td></tr> <tr><td>-0.5000</td><td>14.5631</td><td>1.3802</td></tr> <tr><td>-0.1000</td><td>20.3883</td><td>0.6568</td></tr> <tr><td>0.3000</td><td>27.1845</td><td>0.2760</td></tr> <tr><td>0.7000</td><td>38.8350</td><td>0.0952</td></tr> <tr><td>1.1000</td><td>64.0777</td><td>0.0286</td></tr> <tr><td>1.5000</td><td>85.4369</td><td>0.0095</td></tr> </tbody> </table>	UMBRAL	FRR	FAR	-2.5000	0.9709	26.3849	-2.1000	1.9417	18.4371	-1.7000	2.9126	11.7552	-1.3000	5.8252	6.5391	-0.9000	11.6505	3.0649	-0.5000	14.5631	1.3802	-0.1000	20.3883	0.6568	0.3000	27.1845	0.2760	0.7000	38.8350	0.0952	1.1000	64.0777	0.0286	1.5000	85.4369	0.0095
UMBRAL	FRR	FAR																																																																								
-3.3500	0.9709	45.7738																																																																								
-2.8000	0.9709	33.6284																																																																								
-2.2500	0.9709	21.5401																																																																								
-1.7000	4.8544	10.8605																																																																								
-1.1500	6.7961	4.5593																																																																								
-0.6000	10.6796	1.5991																																																																								
-0.0500	22.3301	0.3903																																																																								
0.5000	33.9806	0.1142																																																																								
1.0500	65.0485	0.0286																																																																								
1.6000	89.3204	0.0095																																																																								
2.1500	99.0291	0.0095																																																																								
UMBRAL	FRR	FAR																																																																								
-2.5000	0.9709	26.3849																																																																								
-2.1000	1.9417	18.4371																																																																								
-1.7000	2.9126	11.7552																																																																								
-1.3000	5.8252	6.5391																																																																								
-0.9000	11.6505	3.0649																																																																								
-0.5000	14.5631	1.3802																																																																								
-0.1000	20.3883	0.6568																																																																								
0.3000	27.1845	0.2760																																																																								
0.7000	38.8350	0.0952																																																																								
1.1000	64.0777	0.0286																																																																								
1.5000	85.4369	0.0095																																																																								
PRUEBA 3																																																																										
 <p>EER (Exponencial) = 15.533980 EER (Gaussiana) = 16.504854</p>	<table border="1"> <thead> <tr> <th>UMBRAL</th> <th>FRR</th> <th>FAR</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>-7.6500</td><td>0.9709</td><td>86.4839</td></tr> <tr><td>-6.5000</td><td>0.9709</td><td>79.6021</td></tr> <tr><td>-5.3500</td><td>0.9709</td><td>68.7702</td></tr> <tr><td>-4.2000</td><td>4.8544</td><td>52.9031</td></tr> <tr><td>-3.0500</td><td>10.6796</td><td>31.4677</td></tr> <tr><td>-1.9000</td><td>20.3883</td><td>11.0128</td></tr> <tr><td>-0.7500</td><td>36.8932</td><td>2.2273</td></tr> <tr><td>0.4000</td><td>68.9320</td><td>0.4283</td></tr> <tr><td>1.5500</td><td>96.1165</td><td>0.0857</td></tr> <tr><td>2.7000</td><td>99.0291</td><td>0.0476</td></tr> <tr><td>3.8500</td><td>100.0000</td><td>0.0095</td></tr> </tbody> </table>	UMBRAL	FRR	FAR	-7.6500	0.9709	86.4839	-6.5000	0.9709	79.6021	-5.3500	0.9709	68.7702	-4.2000	4.8544	52.9031	-3.0500	10.6796	31.4677	-1.9000	20.3883	11.0128	-0.7500	36.8932	2.2273	0.4000	68.9320	0.4283	1.5500	96.1165	0.0857	2.7000	99.0291	0.0476	3.8500	100.0000	0.0095	<table border="1"> <thead> <tr> <th>UMBRAL</th> <th>FRR</th> <th>FAR</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>-5.5000</td><td>0.9709</td><td>69.1986</td></tr> <tr><td>-4.5500</td><td>1.9417</td><td>57.5861</td></tr> <tr><td>-3.6000</td><td>7.7670</td><td>41.5287</td></tr> <tr><td>-2.6500</td><td>11.6505</td><td>23.5294</td></tr> <tr><td>-1.7000</td><td>22.3301</td><td>9.0044</td></tr> <tr><td>-0.7500</td><td>33.0097</td><td>2.3891</td></tr> <tr><td>0.2000</td><td>52.4272</td><td>0.5616</td></tr> <tr><td>1.1500</td><td>88.3495</td><td>0.1808</td></tr> <tr><td>2.1000</td><td>97.0874</td><td>0.0571</td></tr> <tr><td>3.0500</td><td>99.0291</td><td>0.0381</td></tr> <tr><td>4.0000</td><td>100.0000</td><td>0.0190</td></tr> </tbody> </table>	UMBRAL	FRR	FAR	-5.5000	0.9709	69.1986	-4.5500	1.9417	57.5861	-3.6000	7.7670	41.5287	-2.6500	11.6505	23.5294	-1.7000	22.3301	9.0044	-0.7500	33.0097	2.3891	0.2000	52.4272	0.5616	1.1500	88.3495	0.1808	2.1000	97.0874	0.0571	3.0500	99.0291	0.0381	4.0000	100.0000	0.0190
UMBRAL	FRR	FAR																																																																								
-7.6500	0.9709	86.4839																																																																								
-6.5000	0.9709	79.6021																																																																								
-5.3500	0.9709	68.7702																																																																								
-4.2000	4.8544	52.9031																																																																								
-3.0500	10.6796	31.4677																																																																								
-1.9000	20.3883	11.0128																																																																								
-0.7500	36.8932	2.2273																																																																								
0.4000	68.9320	0.4283																																																																								
1.5500	96.1165	0.0857																																																																								
2.7000	99.0291	0.0476																																																																								
3.8500	100.0000	0.0095																																																																								
UMBRAL	FRR	FAR																																																																								
-5.5000	0.9709	69.1986																																																																								
-4.5500	1.9417	57.5861																																																																								
-3.6000	7.7670	41.5287																																																																								
-2.6500	11.6505	23.5294																																																																								
-1.7000	22.3301	9.0044																																																																								
-0.7500	33.0097	2.3891																																																																								
0.2000	52.4272	0.5616																																																																								
1.1500	88.3495	0.1808																																																																								
2.1000	97.0874	0.0571																																																																								
3.0500	99.0291	0.0381																																																																								
4.0000	100.0000	0.0190																																																																								

Anexo C: Resultados experimentales completos

CURVA ROC	Función Exponencial	Función Gaussiana																																																																																	
PRUEBA 4																																																																																			
<p>EER (Exponencial) = 0.582524 EER (Gaussiana) = 0.485437</p>	<table border="1"> <thead> <tr> <th>UMBRAL</th> <th>FRR</th> <th>FAR</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>-0.8500</td><td>0.4854</td><td>0.6235</td></tr> <tr><td>-0.6500</td><td>0.9709</td><td>0.1761</td></tr> <tr><td>-0.4500</td><td>1.4563</td><td>0.0524</td></tr> <tr><td>-0.2500</td><td>2.4272</td><td>0.0238</td></tr> <tr><td>-0.0500</td><td>3.3981</td><td>0.0143</td></tr> <tr><td>0.1500</td><td>4.3689</td><td>0.0048</td></tr> <tr><td>0.3500</td><td>6.3107</td><td>0.0048</td></tr> <tr><td>0.5500</td><td>11.6505</td><td>0.0048</td></tr> <tr><td>0.7500</td><td>25.2427</td><td>0.0048</td></tr> <tr><td>0.9500</td><td>47.0874</td><td>0.0048</td></tr> <tr><td>1.1500</td><td>71.8447</td><td>0.0048</td></tr> <tr><td>1.3500</td><td>91.7476</td><td>0.0048</td></tr> </tbody> </table>	UMBRAL	FRR	FAR	-0.8500	0.4854	0.6235	-0.6500	0.9709	0.1761	-0.4500	1.4563	0.0524	-0.2500	2.4272	0.0238	-0.0500	3.3981	0.0143	0.1500	4.3689	0.0048	0.3500	6.3107	0.0048	0.5500	11.6505	0.0048	0.7500	25.2427	0.0048	0.9500	47.0874	0.0048	1.1500	71.8447	0.0048	1.3500	91.7476	0.0048	<table border="1"> <thead> <tr> <th>UMBRAL</th> <th>FRR</th> <th>FAR</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>-0.8000</td><td>0.4854</td><td>0.5045</td></tr> <tr><td>-0.6500</td><td>0.4854</td><td>0.2427</td></tr> <tr><td>-0.5000</td><td>0.9709</td><td>0.1380</td></tr> <tr><td>-0.3500</td><td>1.9417</td><td>0.0904</td></tr> <tr><td>-0.2000</td><td>2.9126</td><td>0.0619</td></tr> <tr><td>-0.0500</td><td>4.8544</td><td>0.0381</td></tr> <tr><td>0.1000</td><td>5.3398</td><td>0.0381</td></tr> <tr><td>0.2500</td><td>6.7961</td><td>0.0333</td></tr> <tr><td>0.4000</td><td>8.2524</td><td>0.0286</td></tr> <tr><td>0.5500</td><td>11.1650</td><td>0.0190</td></tr> <tr><td>0.7000</td><td>18.9320</td><td>0.0095</td></tr> <tr><td>0.8500</td><td>32.0388</td><td>0.0048</td></tr> <tr><td>1.0000</td><td>50.0000</td><td>0.0048</td></tr> </tbody> </table>	UMBRAL	FRR	FAR	-0.8000	0.4854	0.5045	-0.6500	0.4854	0.2427	-0.5000	0.9709	0.1380	-0.3500	1.9417	0.0904	-0.2000	2.9126	0.0619	-0.0500	4.8544	0.0381	0.1000	5.3398	0.0381	0.2500	6.7961	0.0333	0.4000	8.2524	0.0286	0.5500	11.1650	0.0190	0.7000	18.9320	0.0095	0.8500	32.0388	0.0048	1.0000	50.0000	0.0048
UMBRAL	FRR	FAR																																																																																	
-0.8500	0.4854	0.6235																																																																																	
-0.6500	0.9709	0.1761																																																																																	
-0.4500	1.4563	0.0524																																																																																	
-0.2500	2.4272	0.0238																																																																																	
-0.0500	3.3981	0.0143																																																																																	
0.1500	4.3689	0.0048																																																																																	
0.3500	6.3107	0.0048																																																																																	
0.5500	11.6505	0.0048																																																																																	
0.7500	25.2427	0.0048																																																																																	
0.9500	47.0874	0.0048																																																																																	
1.1500	71.8447	0.0048																																																																																	
1.3500	91.7476	0.0048																																																																																	
UMBRAL	FRR	FAR																																																																																	
-0.8000	0.4854	0.5045																																																																																	
-0.6500	0.4854	0.2427																																																																																	
-0.5000	0.9709	0.1380																																																																																	
-0.3500	1.9417	0.0904																																																																																	
-0.2000	2.9126	0.0619																																																																																	
-0.0500	4.8544	0.0381																																																																																	
0.1000	5.3398	0.0381																																																																																	
0.2500	6.7961	0.0333																																																																																	
0.4000	8.2524	0.0286																																																																																	
0.5500	11.1650	0.0190																																																																																	
0.7000	18.9320	0.0095																																																																																	
0.8500	32.0388	0.0048																																																																																	
1.0000	50.0000	0.0048																																																																																	
PRUEBA 5																																																																																			
<p>EER (Exponencial) = 2.380837 EER (Gaussiana) = 2.427185</p>	<table border="1"> <thead> <tr> <th>UMBRAL</th> <th>FRR</th> <th>FAR</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>-2.5500</td><td>0.4854</td><td>29.2642</td></tr> <tr><td>-2.2500</td><td>0.4854</td><td>22.3396</td></tr> <tr><td>-1.9500</td><td>0.9709</td><td>15.4293</td></tr> <tr><td>-1.6500</td><td>0.9709</td><td>9.7992</td></tr> <tr><td>-1.3500</td><td>1.9417</td><td>5.1304</td></tr> <tr><td>-1.0500</td><td>2.4272</td><td>1.9655</td></tr> <tr><td>-0.7500</td><td>3.8835</td><td>0.6663</td></tr> <tr><td>-0.4500</td><td>7.2816</td><td>0.1761</td></tr> <tr><td>-0.1500</td><td>8.2524</td><td>0.0809</td></tr> <tr><td>0.1500</td><td>14.5631</td><td>0.0286</td></tr> <tr><td>0.4500</td><td>24.2718</td><td>0.0095</td></tr> </tbody> </table>	UMBRAL	FRR	FAR	-2.5500	0.4854	29.2642	-2.2500	0.4854	22.3396	-1.9500	0.9709	15.4293	-1.6500	0.9709	9.7992	-1.3500	1.9417	5.1304	-1.0500	2.4272	1.9655	-0.7500	3.8835	0.6663	-0.4500	7.2816	0.1761	-0.1500	8.2524	0.0809	0.1500	14.5631	0.0286	0.4500	24.2718	0.0095	<table border="1"> <thead> <tr> <th>UMBRAL</th> <th>FRR</th> <th>FAR</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>-4.3500</td><td>0.4854</td><td>64.2538</td></tr> <tr><td>-3.8000</td><td>0.4854</td><td>55.2256</td></tr> <tr><td>-3.2500</td><td>0.4854</td><td>44.8125</td></tr> <tr><td>-2.7000</td><td>0.4854</td><td>32.9526</td></tr> <tr><td>-2.1500</td><td>0.9709</td><td>20.3693</td></tr> <tr><td>-1.6000</td><td>1.9417</td><td>9.7754</td></tr> <tr><td>-1.0500</td><td>2.4272</td><td>2.4986</td></tr> <tr><td>-0.5000</td><td>2.9126</td><td>0.3141</td></tr> <tr><td>0.0500</td><td>10.1942</td><td>0.0952</td></tr> <tr><td>0.6000</td><td>26.2136</td><td>0.0190</td></tr> <tr><td>1.1500</td><td>82.0388</td><td>0.0048</td></tr> </tbody> </table>	UMBRAL	FRR	FAR	-4.3500	0.4854	64.2538	-3.8000	0.4854	55.2256	-3.2500	0.4854	44.8125	-2.7000	0.4854	32.9526	-2.1500	0.9709	20.3693	-1.6000	1.9417	9.7754	-1.0500	2.4272	2.4986	-0.5000	2.9126	0.3141	0.0500	10.1942	0.0952	0.6000	26.2136	0.0190	1.1500	82.0388	0.0048									
UMBRAL	FRR	FAR																																																																																	
-2.5500	0.4854	29.2642																																																																																	
-2.2500	0.4854	22.3396																																																																																	
-1.9500	0.9709	15.4293																																																																																	
-1.6500	0.9709	9.7992																																																																																	
-1.3500	1.9417	5.1304																																																																																	
-1.0500	2.4272	1.9655																																																																																	
-0.7500	3.8835	0.6663																																																																																	
-0.4500	7.2816	0.1761																																																																																	
-0.1500	8.2524	0.0809																																																																																	
0.1500	14.5631	0.0286																																																																																	
0.4500	24.2718	0.0095																																																																																	
UMBRAL	FRR	FAR																																																																																	
-4.3500	0.4854	64.2538																																																																																	
-3.8000	0.4854	55.2256																																																																																	
-3.2500	0.4854	44.8125																																																																																	
-2.7000	0.4854	32.9526																																																																																	
-2.1500	0.9709	20.3693																																																																																	
-1.6000	1.9417	9.7754																																																																																	
-1.0500	2.4272	2.4986																																																																																	
-0.5000	2.9126	0.3141																																																																																	
0.0500	10.1942	0.0952																																																																																	
0.6000	26.2136	0.0190																																																																																	
1.1500	82.0388	0.0048																																																																																	
PRUEBA 6																																																																																			
<p>EER (Exponencial) = 3.634857 EER (Gaussiana) = 1.488673</p>	<table border="1"> <thead> <tr> <th>UMBRAL</th> <th>FRR</th> <th>FAR</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>-1.4500</td><td>0.9709</td><td>6.7009</td></tr> <tr><td>-1.2000</td><td>3.8835</td><td>3.4837</td></tr> <tr><td>-0.9500</td><td>7.7670</td><td>1.5801</td></tr> <tr><td>-0.7000</td><td>8.7379</td><td>0.6568</td></tr> <tr><td>-0.4500</td><td>12.6214</td><td>0.3712</td></tr> <tr><td>-0.2000</td><td>16.5049</td><td>0.1999</td></tr> <tr><td>0.0500</td><td>19.4175</td><td>0.1142</td></tr> <tr><td>0.3000</td><td>28.1553</td><td>0.0666</td></tr> <tr><td>0.5500</td><td>38.8350</td><td>0.0286</td></tr> <tr><td>0.8000</td><td>56.3107</td><td>0.0190</td></tr> <tr><td>1.0500</td><td>73.7864</td><td>0.0095</td></tr> <tr><td>1.3000</td><td>91.2621</td><td>0.0095</td></tr> </tbody> </table>	UMBRAL	FRR	FAR	-1.4500	0.9709	6.7009	-1.2000	3.8835	3.4837	-0.9500	7.7670	1.5801	-0.7000	8.7379	0.6568	-0.4500	12.6214	0.3712	-0.2000	16.5049	0.1999	0.0500	19.4175	0.1142	0.3000	28.1553	0.0666	0.5500	38.8350	0.0286	0.8000	56.3107	0.0190	1.0500	73.7864	0.0095	1.3000	91.2621	0.0095	<table border="1"> <thead> <tr> <th>UMBRAL</th> <th>FRR</th> <th>FAR</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>-1.6000</td><td>0.9709</td><td>9.3185</td></tr> <tr><td>-1.3500</td><td>0.9709</td><td>5.5873</td></tr> <tr><td>-1.1000</td><td>0.9709</td><td>2.8270</td></tr> <tr><td>-0.8500</td><td>2.9126</td><td>1.1517</td></tr> <tr><td>-0.6000</td><td>4.8544</td><td>0.5616</td></tr> <tr><td>-0.3500</td><td>7.7670</td><td>0.3046</td></tr> <tr><td>-0.1000</td><td>11.6505</td><td>0.1713</td></tr> <tr><td>0.1500</td><td>20.3883</td><td>0.1047</td></tr> <tr><td>0.4000</td><td>26.2136</td><td>0.0761</td></tr> <tr><td>0.6500</td><td>41.7476</td><td>0.0190</td></tr> <tr><td>0.9000</td><td>64.0777</td><td>0.0095</td></tr> </tbody> </table>	UMBRAL	FRR	FAR	-1.6000	0.9709	9.3185	-1.3500	0.9709	5.5873	-1.1000	0.9709	2.8270	-0.8500	2.9126	1.1517	-0.6000	4.8544	0.5616	-0.3500	7.7670	0.3046	-0.1000	11.6505	0.1713	0.1500	20.3883	0.1047	0.4000	26.2136	0.0761	0.6500	41.7476	0.0190	0.9000	64.0777	0.0095						
UMBRAL	FRR	FAR																																																																																	
-1.4500	0.9709	6.7009																																																																																	
-1.2000	3.8835	3.4837																																																																																	
-0.9500	7.7670	1.5801																																																																																	
-0.7000	8.7379	0.6568																																																																																	
-0.4500	12.6214	0.3712																																																																																	
-0.2000	16.5049	0.1999																																																																																	
0.0500	19.4175	0.1142																																																																																	
0.3000	28.1553	0.0666																																																																																	
0.5500	38.8350	0.0286																																																																																	
0.8000	56.3107	0.0190																																																																																	
1.0500	73.7864	0.0095																																																																																	
1.3000	91.2621	0.0095																																																																																	
UMBRAL	FRR	FAR																																																																																	
-1.6000	0.9709	9.3185																																																																																	
-1.3500	0.9709	5.5873																																																																																	
-1.1000	0.9709	2.8270																																																																																	
-0.8500	2.9126	1.1517																																																																																	
-0.6000	4.8544	0.5616																																																																																	
-0.3500	7.7670	0.3046																																																																																	
-0.1000	11.6505	0.1713																																																																																	
0.1500	20.3883	0.1047																																																																																	
0.4000	26.2136	0.0761																																																																																	
0.6500	41.7476	0.0190																																																																																	
0.9000	64.0777	0.0095																																																																																	
PRUEBA 7																																																																																			
<p>EER (Exponencial) = 2.365542 EER (Gaussiana) = 3.883495</p>	<table border="1"> <thead> <tr> <th>UMBRAL</th> <th>FRR</th> <th>FAR</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>-2.1000</td><td>0.4854</td><td>19.2033</td></tr> <tr><td>-1.6500</td><td>1.4563</td><td>10.0847</td></tr> <tr><td>-1.2000</td><td>1.4563</td><td>3.6313</td></tr> <tr><td>-0.7500</td><td>4.3689</td><td>0.6806</td></tr> <tr><td>-0.3000</td><td>9.7087</td><td>0.1380</td></tr> <tr><td>0.1500</td><td>18.4466</td><td>0.0381</td></tr> <tr><td>0.6000</td><td>37.8641</td><td>0.0095</td></tr> <tr><td>1.0500</td><td>79.6116</td><td>0.0048</td></tr> <tr><td>1.5000</td><td>95.6311</td><td>0.0048</td></tr> <tr><td>1.9500</td><td>99.0291</td><td>0.0048</td></tr> <tr><td>2.4000</td><td>100.0000</td><td>0.0048</td></tr> </tbody> </table>	UMBRAL	FRR	FAR	-2.1000	0.4854	19.2033	-1.6500	1.4563	10.0847	-1.2000	1.4563	3.6313	-0.7500	4.3689	0.6806	-0.3000	9.7087	0.1380	0.1500	18.4466	0.0381	0.6000	37.8641	0.0095	1.0500	79.6116	0.0048	1.5000	95.6311	0.0048	1.9500	99.0291	0.0048	2.4000	100.0000	0.0048	<table border="1"> <thead> <tr> <th>UMBRAL</th> <th>FRR</th> <th>FAR</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>-10.0000</td><td>0.4854</td><td>97.7061</td></tr> <tr><td>-8.5500</td><td>0.4854</td><td>95.3884</td></tr> <tr><td>-7.1000</td><td>0.4854</td><td>90.7481</td></tr> <tr><td>-5.6500</td><td>0.4854</td><td>80.4160</td></tr> <tr><td>-4.2000</td><td>0.9709</td><td>61.2222</td></tr> <tr><td>-2.7500</td><td>0.9709</td><td>33.1810</td></tr> <tr><td>-1.3000</td><td>3.3981</td><td>4.6735</td></tr> <tr><td>0.1500</td><td>20.8738</td><td>0.0524</td></tr> <tr><td>1.6000</td><td>96.1165</td><td>0.0048</td></tr> <tr><td>3.0500</td><td>100.0000</td><td>0.0048</td></tr> <tr><td>4.5000</td><td>100.0000</td><td>0.0048</td></tr> </tbody> </table>	UMBRAL	FRR	FAR	-10.0000	0.4854	97.7061	-8.5500	0.4854	95.3884	-7.1000	0.4854	90.7481	-5.6500	0.4854	80.4160	-4.2000	0.9709	61.2222	-2.7500	0.9709	33.1810	-1.3000	3.3981	4.6735	0.1500	20.8738	0.0524	1.6000	96.1165	0.0048	3.0500	100.0000	0.0048	4.5000	100.0000	0.0048									
UMBRAL	FRR	FAR																																																																																	
-2.1000	0.4854	19.2033																																																																																	
-1.6500	1.4563	10.0847																																																																																	
-1.2000	1.4563	3.6313																																																																																	
-0.7500	4.3689	0.6806																																																																																	
-0.3000	9.7087	0.1380																																																																																	
0.1500	18.4466	0.0381																																																																																	
0.6000	37.8641	0.0095																																																																																	
1.0500	79.6116	0.0048																																																																																	
1.5000	95.6311	0.0048																																																																																	
1.9500	99.0291	0.0048																																																																																	
2.4000	100.0000	0.0048																																																																																	
UMBRAL	FRR	FAR																																																																																	
-10.0000	0.4854	97.7061																																																																																	
-8.5500	0.4854	95.3884																																																																																	
-7.1000	0.4854	90.7481																																																																																	
-5.6500	0.4854	80.4160																																																																																	
-4.2000	0.9709	61.2222																																																																																	
-2.7500	0.9709	33.1810																																																																																	
-1.3000	3.3981	4.6735																																																																																	
0.1500	20.8738	0.0524																																																																																	
1.6000	96.1165	0.0048																																																																																	
3.0500	100.0000	0.0048																																																																																	
4.5000	100.0000	0.0048																																																																																	

CURVA ROC	Función Exponencial	Función Gaussiana																																																																								
PRUEBA 8																																																																										
<p>EER (Exponencial) = 5.221269 EER (Gaussiana) = 7.485772</p>	<table border="1"> <thead> <tr> <th>UMBRAL</th> <th>FRR</th> <th>FAR</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>-2.5000</td><td>0.4854</td><td>24.1243</td></tr> <tr><td>-2.2000</td><td>0.9709</td><td>17.7518</td></tr> <tr><td>-1.9000</td><td>2.9126</td><td>11.8266</td></tr> <tr><td>-1.6000</td><td>3.8835</td><td>7.1150</td></tr> <tr><td>-1.3000</td><td>6.3107</td><td>3.5504</td></tr> <tr><td>-1.0000</td><td>10.1942</td><td>1.4944</td></tr> <tr><td>-0.7000</td><td>17.4757</td><td>0.6092</td></tr> <tr><td>-0.4000</td><td>23.7864</td><td>0.2332</td></tr> <tr><td>-0.1000</td><td>37.3786</td><td>0.0619</td></tr> <tr><td>0.2000</td><td>50.4854</td><td>0.0190</td></tr> <tr><td>0.5000</td><td>65.5340</td><td>0.0048</td></tr> </tbody> </table>	UMBRAL	FRR	FAR	-2.5000	0.4854	24.1243	-2.2000	0.9709	17.7518	-1.9000	2.9126	11.8266	-1.6000	3.8835	7.1150	-1.3000	6.3107	3.5504	-1.0000	10.1942	1.4944	-0.7000	17.4757	0.6092	-0.4000	23.7864	0.2332	-0.1000	37.3786	0.0619	0.2000	50.4854	0.0190	0.5000	65.5340	0.0048	<table border="1"> <thead> <tr> <th>UMBRAL</th> <th>FRR</th> <th>FAR</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>-4.3500</td><td>0.4854</td><td>59.7706</td></tr> <tr><td>-3.8500</td><td>1.9417</td><td>51.3706</td></tr> <tr><td>-3.3500</td><td>2.9126</td><td>41.8951</td></tr> <tr><td>-2.8500</td><td>3.3981</td><td>31.2107</td></tr> <tr><td>-2.3500</td><td>4.3689</td><td>20.4217</td></tr> <tr><td>-1.8500</td><td>5.8252</td><td>10.6273</td></tr> <tr><td>-1.3500</td><td>12.1359</td><td>4.0310</td></tr> <tr><td>-0.8500</td><td>19.4175</td><td>0.9471</td></tr> <tr><td>-0.3500</td><td>29.1262</td><td>0.1808</td></tr> <tr><td>0.1500</td><td>46.1165</td><td>0.0524</td></tr> <tr><td>0.6500</td><td>66.9903</td><td>0.0143</td></tr> </tbody> </table>	UMBRAL	FRR	FAR	-4.3500	0.4854	59.7706	-3.8500	1.9417	51.3706	-3.3500	2.9126	41.8951	-2.8500	3.3981	31.2107	-2.3500	4.3689	20.4217	-1.8500	5.8252	10.6273	-1.3500	12.1359	4.0310	-0.8500	19.4175	0.9471	-0.3500	29.1262	0.1808	0.1500	46.1165	0.0524	0.6500	66.9903	0.0143
UMBRAL	FRR	FAR																																																																								
-2.5000	0.4854	24.1243																																																																								
-2.2000	0.9709	17.7518																																																																								
-1.9000	2.9126	11.8266																																																																								
-1.6000	3.8835	7.1150																																																																								
-1.3000	6.3107	3.5504																																																																								
-1.0000	10.1942	1.4944																																																																								
-0.7000	17.4757	0.6092																																																																								
-0.4000	23.7864	0.2332																																																																								
-0.1000	37.3786	0.0619																																																																								
0.2000	50.4854	0.0190																																																																								
0.5000	65.5340	0.0048																																																																								
UMBRAL	FRR	FAR																																																																								
-4.3500	0.4854	59.7706																																																																								
-3.8500	1.9417	51.3706																																																																								
-3.3500	2.9126	41.8951																																																																								
-2.8500	3.3981	31.2107																																																																								
-2.3500	4.3689	20.4217																																																																								
-1.8500	5.8252	10.6273																																																																								
-1.3500	12.1359	4.0310																																																																								
-0.8500	19.4175	0.9471																																																																								
-0.3500	29.1262	0.1808																																																																								
0.1500	46.1165	0.0524																																																																								
0.6500	66.9903	0.0143																																																																								
PRUEBA 9																																																																										
<p>EER (Exponencial) = 3.322405 EER (Gaussiana) = 2.912621</p>	<table border="1"> <thead> <tr> <th>UMBRAL</th> <th>FRR</th> <th>FAR</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>-4.6000</td><td>0.9709</td><td>70.2361</td></tr> <tr><td>-4.0500</td><td>0.9709</td><td>61.2412</td></tr> <tr><td>-3.5000</td><td>0.9709</td><td>50.1047</td></tr> <tr><td>-2.9500</td><td>1.9417</td><td>38.1877</td></tr> <tr><td>-2.4000</td><td>1.9417</td><td>25.1380</td></tr> <tr><td>-1.8500</td><td>2.9126</td><td>13.1163</td></tr> <tr><td>-1.3000</td><td>2.9126</td><td>4.6735</td></tr> <tr><td>-0.7500</td><td>8.7379</td><td>0.8662</td></tr> <tr><td>-0.2000</td><td>17.4757</td><td>0.2094</td></tr> <tr><td>0.3500</td><td>39.8058</td><td>0.0952</td></tr> <tr><td>0.9000</td><td>79.6116</td><td>0.0190</td></tr> </tbody> </table>	UMBRAL	FRR	FAR	-4.6000	0.9709	70.2361	-4.0500	0.9709	61.2412	-3.5000	0.9709	50.1047	-2.9500	1.9417	38.1877	-2.4000	1.9417	25.1380	-1.8500	2.9126	13.1163	-1.3000	2.9126	4.6735	-0.7500	8.7379	0.8662	-0.2000	17.4757	0.2094	0.3500	39.8058	0.0952	0.9000	79.6116	0.0190	<table border="1"> <thead> <tr> <th>UMBRAL</th> <th>FRR</th> <th>FAR</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>-4.6000</td><td>0.9709</td><td>66.2954</td></tr> <tr><td>-4.0000</td><td>0.9709</td><td>56.5677</td></tr> <tr><td>-3.4000</td><td>0.9709</td><td>45.8690</td></tr> <tr><td>-2.8000</td><td>1.9417</td><td>33.0859</td></tr> <tr><td>-2.2000</td><td>2.9126</td><td>19.5031</td></tr> <tr><td>-1.6000</td><td>2.9126</td><td>8.4713</td></tr> <tr><td>-1.0000</td><td>2.9126</td><td>2.0465</td></tr> <tr><td>-0.4000</td><td>13.5922</td><td>0.3236</td></tr> <tr><td>0.2000</td><td>28.1553</td><td>0.0666</td></tr> <tr><td>0.8000</td><td>68.9320</td><td>0.0095</td></tr> <tr><td>1.4000</td><td>94.1748</td><td>0.0095</td></tr> </tbody> </table>	UMBRAL	FRR	FAR	-4.6000	0.9709	66.2954	-4.0000	0.9709	56.5677	-3.4000	0.9709	45.8690	-2.8000	1.9417	33.0859	-2.2000	2.9126	19.5031	-1.6000	2.9126	8.4713	-1.0000	2.9126	2.0465	-0.4000	13.5922	0.3236	0.2000	28.1553	0.0666	0.8000	68.9320	0.0095	1.4000	94.1748	0.0095
UMBRAL	FRR	FAR																																																																								
-4.6000	0.9709	70.2361																																																																								
-4.0500	0.9709	61.2412																																																																								
-3.5000	0.9709	50.1047																																																																								
-2.9500	1.9417	38.1877																																																																								
-2.4000	1.9417	25.1380																																																																								
-1.8500	2.9126	13.1163																																																																								
-1.3000	2.9126	4.6735																																																																								
-0.7500	8.7379	0.8662																																																																								
-0.2000	17.4757	0.2094																																																																								
0.3500	39.8058	0.0952																																																																								
0.9000	79.6116	0.0190																																																																								
UMBRAL	FRR	FAR																																																																								
-4.6000	0.9709	66.2954																																																																								
-4.0000	0.9709	56.5677																																																																								
-3.4000	0.9709	45.8690																																																																								
-2.8000	1.9417	33.0859																																																																								
-2.2000	2.9126	19.5031																																																																								
-1.6000	2.9126	8.4713																																																																								
-1.0000	2.9126	2.0465																																																																								
-0.4000	13.5922	0.3236																																																																								
0.2000	28.1553	0.0666																																																																								
0.8000	68.9320	0.0095																																																																								
1.4000	94.1748	0.0095																																																																								
PRUEBA 10																																																																										
<p>EER (Exponencial) = 1.456311 EER (Gaussiana) = 0.970874</p>	<table border="1"> <thead> <tr> <th>UMBRAL</th> <th>FRR</th> <th>FAR</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>-8.1000</td><td>0.4854</td><td>95.1361</td></tr> <tr><td>-7.1000</td><td>0.4854</td><td>91.9046</td></tr> <tr><td>-6.1000</td><td>0.4854</td><td>86.8789</td></tr> <tr><td>-5.1000</td><td>0.4854</td><td>78.8074</td></tr> <tr><td>-4.1000</td><td>0.4854</td><td>65.1009</td></tr> <tr><td>-3.1000</td><td>0.4854</td><td>44.4603</td></tr> <tr><td>-2.1000</td><td>0.9709</td><td>20.3360</td></tr> <tr><td>-1.1000</td><td>1.4563</td><td>2.3368</td></tr> <tr><td>-0.1000</td><td>1.9417</td><td>0.0524</td></tr> <tr><td>0.9000</td><td>31.0680</td><td>0.0238</td></tr> <tr><td>1.9000</td><td>98.5437</td><td>0.0048</td></tr> </tbody> </table>	UMBRAL	FRR	FAR	-8.1000	0.4854	95.1361	-7.1000	0.4854	91.9046	-6.1000	0.4854	86.8789	-5.1000	0.4854	78.8074	-4.1000	0.4854	65.1009	-3.1000	0.4854	44.4603	-2.1000	0.9709	20.3360	-1.1000	1.4563	2.3368	-0.1000	1.9417	0.0524	0.9000	31.0680	0.0238	1.9000	98.5437	0.0048	<table border="1"> <thead> <tr> <th>UMBRAL</th> <th>FRR</th> <th>FAR</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>-10.0000</td><td>0.4854</td><td>98.2391</td></tr> <tr><td>-8.8500</td><td>0.4854</td><td>96.6971</td></tr> <tr><td>-7.7000</td><td>0.4854</td><td>93.7845</td></tr> <tr><td>-6.5500</td><td>0.4854</td><td>88.3781</td></tr> <tr><td>-5.4000</td><td>0.4854</td><td>78.8502</td></tr> <tr><td>-4.2500</td><td>0.4854</td><td>63.4019</td></tr> <tr><td>-3.1000</td><td>0.4854</td><td>41.3526</td></tr> <tr><td>-1.9500</td><td>0.9709</td><td>16.7999</td></tr> <tr><td>-0.8000</td><td>1.4563</td><td>0.3903</td></tr> <tr><td>0.3500</td><td>6.3107</td><td>0.0524</td></tr> <tr><td>1.5000</td><td>96.1165</td><td>0.0143</td></tr> </tbody> </table>	UMBRAL	FRR	FAR	-10.0000	0.4854	98.2391	-8.8500	0.4854	96.6971	-7.7000	0.4854	93.7845	-6.5500	0.4854	88.3781	-5.4000	0.4854	78.8502	-4.2500	0.4854	63.4019	-3.1000	0.4854	41.3526	-1.9500	0.9709	16.7999	-0.8000	1.4563	0.3903	0.3500	6.3107	0.0524	1.5000	96.1165	0.0143
UMBRAL	FRR	FAR																																																																								
-8.1000	0.4854	95.1361																																																																								
-7.1000	0.4854	91.9046																																																																								
-6.1000	0.4854	86.8789																																																																								
-5.1000	0.4854	78.8074																																																																								
-4.1000	0.4854	65.1009																																																																								
-3.1000	0.4854	44.4603																																																																								
-2.1000	0.9709	20.3360																																																																								
-1.1000	1.4563	2.3368																																																																								
-0.1000	1.9417	0.0524																																																																								
0.9000	31.0680	0.0238																																																																								
1.9000	98.5437	0.0048																																																																								
UMBRAL	FRR	FAR																																																																								
-10.0000	0.4854	98.2391																																																																								
-8.8500	0.4854	96.6971																																																																								
-7.7000	0.4854	93.7845																																																																								
-6.5500	0.4854	88.3781																																																																								
-5.4000	0.4854	78.8502																																																																								
-4.2500	0.4854	63.4019																																																																								
-3.1000	0.4854	41.3526																																																																								
-1.9500	0.9709	16.7999																																																																								
-0.8000	1.4563	0.3903																																																																								
0.3500	6.3107	0.0524																																																																								
1.5000	96.1165	0.0143																																																																								
PRUEBA 11																																																																										
<p>EER (Exponencial) = 1.456311 EER (Gaussiana) = 1.456311</p>	<table border="1"> <thead> <tr> <th>UMBRAL</th> <th>FRR</th> <th>FAR</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>-10.0000</td><td>0.4854</td><td>97.7441</td></tr> <tr><td>-8.5000</td><td>0.4854</td><td>95.7691</td></tr> <tr><td>-7.0000</td><td>0.4854</td><td>91.4382</td></tr> <tr><td>-5.5000</td><td>0.4854</td><td>81.9341</td></tr> <tr><td>-4.0000</td><td>0.4854</td><td>61.8456</td></tr> <tr><td>-2.5000</td><td>0.4854</td><td>27.6080</td></tr> <tr><td>-1.0000</td><td>1.4563</td><td>1.4230</td></tr> <tr><td>0.5000</td><td>14.5631</td><td>0.0381</td></tr> <tr><td>2.0000</td><td>99.0291</td><td>0.0048</td></tr> <tr><td>3.5000</td><td>100.0000</td><td>0.0048</td></tr> <tr><td>5.0000</td><td>100.0000</td><td>0.0048</td></tr> </tbody> </table>	UMBRAL	FRR	FAR	-10.0000	0.4854	97.7441	-8.5000	0.4854	95.7691	-7.0000	0.4854	91.4382	-5.5000	0.4854	81.9341	-4.0000	0.4854	61.8456	-2.5000	0.4854	27.6080	-1.0000	1.4563	1.4230	0.5000	14.5631	0.0381	2.0000	99.0291	0.0048	3.5000	100.0000	0.0048	5.0000	100.0000	0.0048	<table border="1"> <thead> <tr> <th>UMBRAL</th> <th>FRR</th> <th>FAR</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>-9.4500</td><td>0.4854</td><td>96.7400</td></tr> <tr><td>-8.2000</td><td>0.4854</td><td>94.0272</td></tr> <tr><td>-6.9500</td><td>0.4854</td><td>89.3251</td></tr> <tr><td>-5.7000</td><td>0.4854</td><td>80.0257</td></tr> <tr><td>-4.4500</td><td>0.4854</td><td>64.9724</td></tr> <tr><td>-3.2000</td><td>0.4854</td><td>42.3853</td></tr> <tr><td>-1.9500</td><td>1.4563</td><td>15.0914</td></tr> <tr><td>-0.7000</td><td>1.4563</td><td>0.3855</td></tr> <tr><td>0.5500</td><td>15.0485</td><td>0.0571</td></tr> <tr><td>1.8000</td><td>97.5728</td><td>0.0048</td></tr> <tr><td>3.0500</td><td>100.0000</td><td>0.0048</td></tr> </tbody> </table>	UMBRAL	FRR	FAR	-9.4500	0.4854	96.7400	-8.2000	0.4854	94.0272	-6.9500	0.4854	89.3251	-5.7000	0.4854	80.0257	-4.4500	0.4854	64.9724	-3.2000	0.4854	42.3853	-1.9500	1.4563	15.0914	-0.7000	1.4563	0.3855	0.5500	15.0485	0.0571	1.8000	97.5728	0.0048	3.0500	100.0000	0.0048
UMBRAL	FRR	FAR																																																																								
-10.0000	0.4854	97.7441																																																																								
-8.5000	0.4854	95.7691																																																																								
-7.0000	0.4854	91.4382																																																																								
-5.5000	0.4854	81.9341																																																																								
-4.0000	0.4854	61.8456																																																																								
-2.5000	0.4854	27.6080																																																																								
-1.0000	1.4563	1.4230																																																																								
0.5000	14.5631	0.0381																																																																								
2.0000	99.0291	0.0048																																																																								
3.5000	100.0000	0.0048																																																																								
5.0000	100.0000	0.0048																																																																								
UMBRAL	FRR	FAR																																																																								
-9.4500	0.4854	96.7400																																																																								
-8.2000	0.4854	94.0272																																																																								
-6.9500	0.4854	89.3251																																																																								
-5.7000	0.4854	80.0257																																																																								
-4.4500	0.4854	64.9724																																																																								
-3.2000	0.4854	42.3853																																																																								
-1.9500	1.4563	15.0914																																																																								
-0.7000	1.4563	0.3855																																																																								
0.5500	15.0485	0.0571																																																																								
1.8000	97.5728	0.0048																																																																								
3.0500	100.0000	0.0048																																																																								

Anexo C: Resultados experimentales completos

CURVA ROC	Función Exponencial	Función Gaussiana																																																																								
PRUEBA 12																																																																										
 <p>EER (Exponencial) = 0.970874 EER (Gaussiana) = 0.970874</p>	<table border="1"> <thead> <tr> <th>UMBRAL</th> <th>FRR</th> <th>FAR</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>-10.0000</td><td>0.3236</td><td>97.8838</td></tr> <tr><td>-8.8000</td><td>0.3236</td><td>96.4782</td></tr> <tr><td>-7.6000</td><td>0.3236</td><td>93.5085</td></tr> <tr><td>-6.4000</td><td>0.3236</td><td>88.1560</td></tr> <tr><td>-5.2000</td><td>0.3236</td><td>78.8724</td></tr> <tr><td>-4.0000</td><td>0.3236</td><td>61.6251</td></tr> <tr><td>-2.8000</td><td>0.3236</td><td>35.6082</td></tr> <tr><td>-1.6000</td><td>0.3236</td><td>9.0076</td></tr> <tr><td>-0.4000</td><td>1.2945</td><td>0.0793</td></tr> <tr><td>0.8000</td><td>19.7411</td><td>0.0222</td></tr> <tr><td>2.0000</td><td>99.0291</td><td>0.0032</td></tr> </tbody> </table>	UMBRAL	FRR	FAR	-10.0000	0.3236	97.8838	-8.8000	0.3236	96.4782	-7.6000	0.3236	93.5085	-6.4000	0.3236	88.1560	-5.2000	0.3236	78.8724	-4.0000	0.3236	61.6251	-2.8000	0.3236	35.6082	-1.6000	0.3236	9.0076	-0.4000	1.2945	0.0793	0.8000	19.7411	0.0222	2.0000	99.0291	0.0032	<table border="1"> <thead> <tr> <th>UMBRAL</th> <th>FRR</th> <th>FAR</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>-10.0000</td><td>0.3236</td><td>97.2079</td></tr> <tr><td>-8.8000</td><td>0.3236</td><td>95.2694</td></tr> <tr><td>-7.6000</td><td>0.3236</td><td>91.8967</td></tr> <tr><td>-6.4000</td><td>0.3236</td><td>85.7447</td></tr> <tr><td>-5.2000</td><td>0.3236</td><td>74.9064</td></tr> <tr><td>-4.0000</td><td>0.3236</td><td>58.0684</td></tr> <tr><td>-2.8000</td><td>0.6472</td><td>33.6252</td></tr> <tr><td>-1.6000</td><td>0.9709</td><td>8.6554</td></tr> <tr><td>-0.4000</td><td>0.9709</td><td>0.1523</td></tr> <tr><td>0.8000</td><td>24.2718</td><td>0.0412</td></tr> <tr><td>2.0000</td><td>98.0583</td><td>0.0063</td></tr> </tbody> </table>	UMBRAL	FRR	FAR	-10.0000	0.3236	97.2079	-8.8000	0.3236	95.2694	-7.6000	0.3236	91.8967	-6.4000	0.3236	85.7447	-5.2000	0.3236	74.9064	-4.0000	0.3236	58.0684	-2.8000	0.6472	33.6252	-1.6000	0.9709	8.6554	-0.4000	0.9709	0.1523	0.8000	24.2718	0.0412	2.0000	98.0583	0.0063
UMBRAL	FRR	FAR																																																																								
-10.0000	0.3236	97.8838																																																																								
-8.8000	0.3236	96.4782																																																																								
-7.6000	0.3236	93.5085																																																																								
-6.4000	0.3236	88.1560																																																																								
-5.2000	0.3236	78.8724																																																																								
-4.0000	0.3236	61.6251																																																																								
-2.8000	0.3236	35.6082																																																																								
-1.6000	0.3236	9.0076																																																																								
-0.4000	1.2945	0.0793																																																																								
0.8000	19.7411	0.0222																																																																								
2.0000	99.0291	0.0032																																																																								
UMBRAL	FRR	FAR																																																																								
-10.0000	0.3236	97.2079																																																																								
-8.8000	0.3236	95.2694																																																																								
-7.6000	0.3236	91.8967																																																																								
-6.4000	0.3236	85.7447																																																																								
-5.2000	0.3236	74.9064																																																																								
-4.0000	0.3236	58.0684																																																																								
-2.8000	0.6472	33.6252																																																																								
-1.6000	0.9709	8.6554																																																																								
-0.4000	0.9709	0.1523																																																																								
0.8000	24.2718	0.0412																																																																								
2.0000	98.0583	0.0063																																																																								
PRUEBA 13																																																																										
 <p>EER (Exponencial) = 2.184466 EER (Gaussiana) = 1.873194</p>	<table border="1"> <thead> <tr> <th>UMBRAL</th> <th>FRR</th> <th>FAR</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>-10.0000</td><td>0.2427</td><td>97.7037</td></tr> <tr><td>-8.8000</td><td>0.2427</td><td>96.1236</td></tr> <tr><td>-7.6000</td><td>0.2427</td><td>92.9992</td></tr> <tr><td>-6.4000</td><td>0.2427</td><td>87.4929</td></tr> <tr><td>-5.2000</td><td>0.2427</td><td>77.9102</td></tr> <tr><td>-4.0000</td><td>0.2427</td><td>60.7486</td></tr> <tr><td>-2.8000</td><td>0.2427</td><td>35.2322</td></tr> <tr><td>-1.6000</td><td>0.7282</td><td>9.2138</td></tr> <tr><td>-0.4000</td><td>3.3981</td><td>0.2927</td></tr> <tr><td>0.8000</td><td>25.0000</td><td>0.0262</td></tr> <tr><td>2.0000</td><td>98.7864</td><td>0.0024</td></tr> </tbody> </table>	UMBRAL	FRR	FAR	-10.0000	0.2427	97.7037	-8.8000	0.2427	96.1236	-7.6000	0.2427	92.9992	-6.4000	0.2427	87.4929	-5.2000	0.2427	77.9102	-4.0000	0.2427	60.7486	-2.8000	0.2427	35.2322	-1.6000	0.7282	9.2138	-0.4000	3.3981	0.2927	0.8000	25.0000	0.0262	2.0000	98.7864	0.0024	<table border="1"> <thead> <tr> <th>UMBRAL</th> <th>FRR</th> <th>FAR</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>-10.0000</td><td>0.2427</td><td>96.8732</td></tr> <tr><td>-8.8000</td><td>0.2427</td><td>94.7673</td></tr> <tr><td>-7.6000</td><td>0.2427</td><td>91.1931</td></tr> <tr><td>-6.4000</td><td>0.2427</td><td>84.7206</td></tr> <tr><td>-5.2000</td><td>0.2427</td><td>73.5984</td></tr> <tr><td>-4.0000</td><td>0.2427</td><td>56.7914</td></tr> <tr><td>-2.8000</td><td>0.4854</td><td>32.8669</td></tr> <tr><td>-1.6000</td><td>1.6990</td><td>8.8973</td></tr> <tr><td>-0.4000</td><td>4.6117</td><td>0.3831</td></tr> <tr><td>0.8000</td><td>28.6408</td><td>0.0476</td></tr> <tr><td>2.0000</td><td>97.8155</td><td>0.0048</td></tr> </tbody> </table>	UMBRAL	FRR	FAR	-10.0000	0.2427	96.8732	-8.8000	0.2427	94.7673	-7.6000	0.2427	91.1931	-6.4000	0.2427	84.7206	-5.2000	0.2427	73.5984	-4.0000	0.2427	56.7914	-2.8000	0.4854	32.8669	-1.6000	1.6990	8.8973	-0.4000	4.6117	0.3831	0.8000	28.6408	0.0476	2.0000	97.8155	0.0048
UMBRAL	FRR	FAR																																																																								
-10.0000	0.2427	97.7037																																																																								
-8.8000	0.2427	96.1236																																																																								
-7.6000	0.2427	92.9992																																																																								
-6.4000	0.2427	87.4929																																																																								
-5.2000	0.2427	77.9102																																																																								
-4.0000	0.2427	60.7486																																																																								
-2.8000	0.2427	35.2322																																																																								
-1.6000	0.7282	9.2138																																																																								
-0.4000	3.3981	0.2927																																																																								
0.8000	25.0000	0.0262																																																																								
2.0000	98.7864	0.0024																																																																								
UMBRAL	FRR	FAR																																																																								
-10.0000	0.2427	96.8732																																																																								
-8.8000	0.2427	94.7673																																																																								
-7.6000	0.2427	91.1931																																																																								
-6.4000	0.2427	84.7206																																																																								
-5.2000	0.2427	73.5984																																																																								
-4.0000	0.2427	56.7914																																																																								
-2.8000	0.4854	32.8669																																																																								
-1.6000	1.6990	8.8973																																																																								
-0.4000	4.6117	0.3831																																																																								
0.8000	28.6408	0.0476																																																																								
2.0000	97.8155	0.0048																																																																								
PRUEBA 14																																																																										
 <p>EER (Exponencial) = 12.045447 EER (Gaussiana) = 11.723022</p>	<table border="1"> <thead> <tr> <th>UMBRAL</th> <th>FRR</th> <th>FAR</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>-7.6500</td><td>0.4854</td><td>88.9444</td></tr> <tr><td>-6.5000</td><td>0.4854</td><td>82.7765</td></tr> <tr><td>-5.3500</td><td>0.4854</td><td>72.6728</td></tr> <tr><td>-4.2000</td><td>2.4272</td><td>56.9341</td></tr> <tr><td>-3.0500</td><td>5.8252</td><td>35.3465</td></tr> <tr><td>-1.9000</td><td>11.6505</td><td>12.7308</td></tr> <tr><td>-0.7500</td><td>23.3010</td><td>2.1559</td></tr> <tr><td>0.4000</td><td>49.5146</td><td>0.2808</td></tr> <tr><td>1.5500</td><td>92.2330</td><td>0.0476</td></tr> <tr><td>2.7000</td><td>99.5146</td><td>0.0238</td></tr> <tr><td>3.8500</td><td>100.0000</td><td>0.0048</td></tr> </tbody> </table>	UMBRAL	FRR	FAR	-7.6500	0.4854	88.9444	-6.5000	0.4854	82.7765	-5.3500	0.4854	72.6728	-4.2000	2.4272	56.9341	-3.0500	5.8252	35.3465	-1.9000	11.6505	12.7308	-0.7500	23.3010	2.1559	0.4000	49.5146	0.2808	1.5500	92.2330	0.0476	2.7000	99.5146	0.0238	3.8500	100.0000	0.0048	<table border="1"> <thead> <tr> <th>UMBRAL</th> <th>FRR</th> <th>FAR</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>-5.5000</td><td>0.4854</td><td>71.9256</td></tr> <tr><td>-4.5500</td><td>0.9709</td><td>60.0371</td></tr> <tr><td>-3.6000</td><td>3.8835</td><td>44.5745</td></tr> <tr><td>-2.6500</td><td>5.8252</td><td>26.4658</td></tr> <tr><td>-1.7000</td><td>12.6214</td><td>10.3798</td></tr> <tr><td>-0.7500</td><td>22.8155</td><td>2.3034</td></tr> <tr><td>0.2000</td><td>39.3204</td><td>0.4569</td></tr> <tr><td>1.1500</td><td>78.6408</td><td>0.0999</td></tr> <tr><td>2.1000</td><td>96.6019</td><td>0.0286</td></tr> <tr><td>3.0500</td><td>99.5146</td><td>0.0190</td></tr> <tr><td>4.0000</td><td>100.0000</td><td>0.0095</td></tr> </tbody> </table>	UMBRAL	FRR	FAR	-5.5000	0.4854	71.9256	-4.5500	0.9709	60.0371	-3.6000	3.8835	44.5745	-2.6500	5.8252	26.4658	-1.7000	12.6214	10.3798	-0.7500	22.8155	2.3034	0.2000	39.3204	0.4569	1.1500	78.6408	0.0999	2.1000	96.6019	0.0286	3.0500	99.5146	0.0190	4.0000	100.0000	0.0095
UMBRAL	FRR	FAR																																																																								
-7.6500	0.4854	88.9444																																																																								
-6.5000	0.4854	82.7765																																																																								
-5.3500	0.4854	72.6728																																																																								
-4.2000	2.4272	56.9341																																																																								
-3.0500	5.8252	35.3465																																																																								
-1.9000	11.6505	12.7308																																																																								
-0.7500	23.3010	2.1559																																																																								
0.4000	49.5146	0.2808																																																																								
1.5500	92.2330	0.0476																																																																								
2.7000	99.5146	0.0238																																																																								
3.8500	100.0000	0.0048																																																																								
UMBRAL	FRR	FAR																																																																								
-5.5000	0.4854	71.9256																																																																								
-4.5500	0.9709	60.0371																																																																								
-3.6000	3.8835	44.5745																																																																								
-2.6500	5.8252	26.4658																																																																								
-1.7000	12.6214	10.3798																																																																								
-0.7500	22.8155	2.3034																																																																								
0.2000	39.3204	0.4569																																																																								
1.1500	78.6408	0.0999																																																																								
2.1000	96.6019	0.0286																																																																								
3.0500	99.5146	0.0190																																																																								
4.0000	100.0000	0.0095																																																																								
PRUEBA 15																																																																										
 <p>EER (Exponencial) = 1.456311 EER (Gaussiana) = 1.088368</p>	<table border="1"> <thead> <tr> <th>UMBRAL</th> <th>FRR</th> <th>FAR</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>-7.6000</td><td>0.4854</td><td>95.4264</td></tr> <tr><td>-6.6000</td><td>0.4854</td><td>91.9046</td></tr> <tr><td>-5.6000</td><td>0.4854</td><td>85.9318</td></tr> <tr><td>-4.6000</td><td>0.4854</td><td>76.4658</td></tr> <tr><td>-3.6000</td><td>0.4854</td><td>61.0651</td></tr> <tr><td>-2.6000</td><td>0.4854</td><td>37.9022</td></tr> <tr><td>-1.6000</td><td>0.4854</td><td>12.8403</td></tr> <tr><td>-0.6000</td><td>1.4563</td><td>0.3569</td></tr> <tr><td>0.4000</td><td>12.1359</td><td>0.0381</td></tr> <tr><td>1.4000</td><td>95.1456</td><td>0.0095</td></tr> </tbody> </table>	UMBRAL	FRR	FAR	-7.6000	0.4854	95.4264	-6.6000	0.4854	91.9046	-5.6000	0.4854	85.9318	-4.6000	0.4854	76.4658	-3.6000	0.4854	61.0651	-2.6000	0.4854	37.9022	-1.6000	0.4854	12.8403	-0.6000	1.4563	0.3569	0.4000	12.1359	0.0381	1.4000	95.1456	0.0095	<table border="1"> <thead> <tr> <th>UMBRAL</th> <th>FRR</th> <th>FAR</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>-8.2000</td><td>0.4854</td><td>95.7405</td></tr> <tr><td>-7.1000</td><td>0.4854</td><td>92.7946</td></tr> <tr><td>-6.0000</td><td>0.4854</td><td>86.6029</td></tr> <tr><td>-4.9000</td><td>0.4854</td><td>76.2564</td></tr> <tr><td>-3.8000</td><td>0.4854</td><td>59.5422</td></tr> <tr><td>-2.7000</td><td>0.4854</td><td>37.7213</td></tr> <tr><td>-1.6000</td><td>0.4854</td><td>12.4691</td></tr> <tr><td>-0.5000</td><td>2.4272</td><td>0.2380</td></tr> <tr><td>0.6000</td><td>18.9320</td><td>0.0333</td></tr> <tr><td>1.7000</td><td>98.0583</td><td>0.0095</td></tr> <tr><td>2.8000</td><td>100.0000</td><td>0.0048</td></tr> </tbody> </table>	UMBRAL	FRR	FAR	-8.2000	0.4854	95.7405	-7.1000	0.4854	92.7946	-6.0000	0.4854	86.6029	-4.9000	0.4854	76.2564	-3.8000	0.4854	59.5422	-2.7000	0.4854	37.7213	-1.6000	0.4854	12.4691	-0.5000	2.4272	0.2380	0.6000	18.9320	0.0333	1.7000	98.0583	0.0095	2.8000	100.0000	0.0048			
UMBRAL	FRR	FAR																																																																								
-7.6000	0.4854	95.4264																																																																								
-6.6000	0.4854	91.9046																																																																								
-5.6000	0.4854	85.9318																																																																								
-4.6000	0.4854	76.4658																																																																								
-3.6000	0.4854	61.0651																																																																								
-2.6000	0.4854	37.9022																																																																								
-1.6000	0.4854	12.8403																																																																								
-0.6000	1.4563	0.3569																																																																								
0.4000	12.1359	0.0381																																																																								
1.4000	95.1456	0.0095																																																																								
UMBRAL	FRR	FAR																																																																								
-8.2000	0.4854	95.7405																																																																								
-7.1000	0.4854	92.7946																																																																								
-6.0000	0.4854	86.6029																																																																								
-4.9000	0.4854	76.2564																																																																								
-3.8000	0.4854	59.5422																																																																								
-2.7000	0.4854	37.7213																																																																								
-1.6000	0.4854	12.4691																																																																								
-0.5000	2.4272	0.2380																																																																								
0.6000	18.9320	0.0333																																																																								
1.7000	98.0583	0.0095																																																																								
2.8000	100.0000	0.0048																																																																								

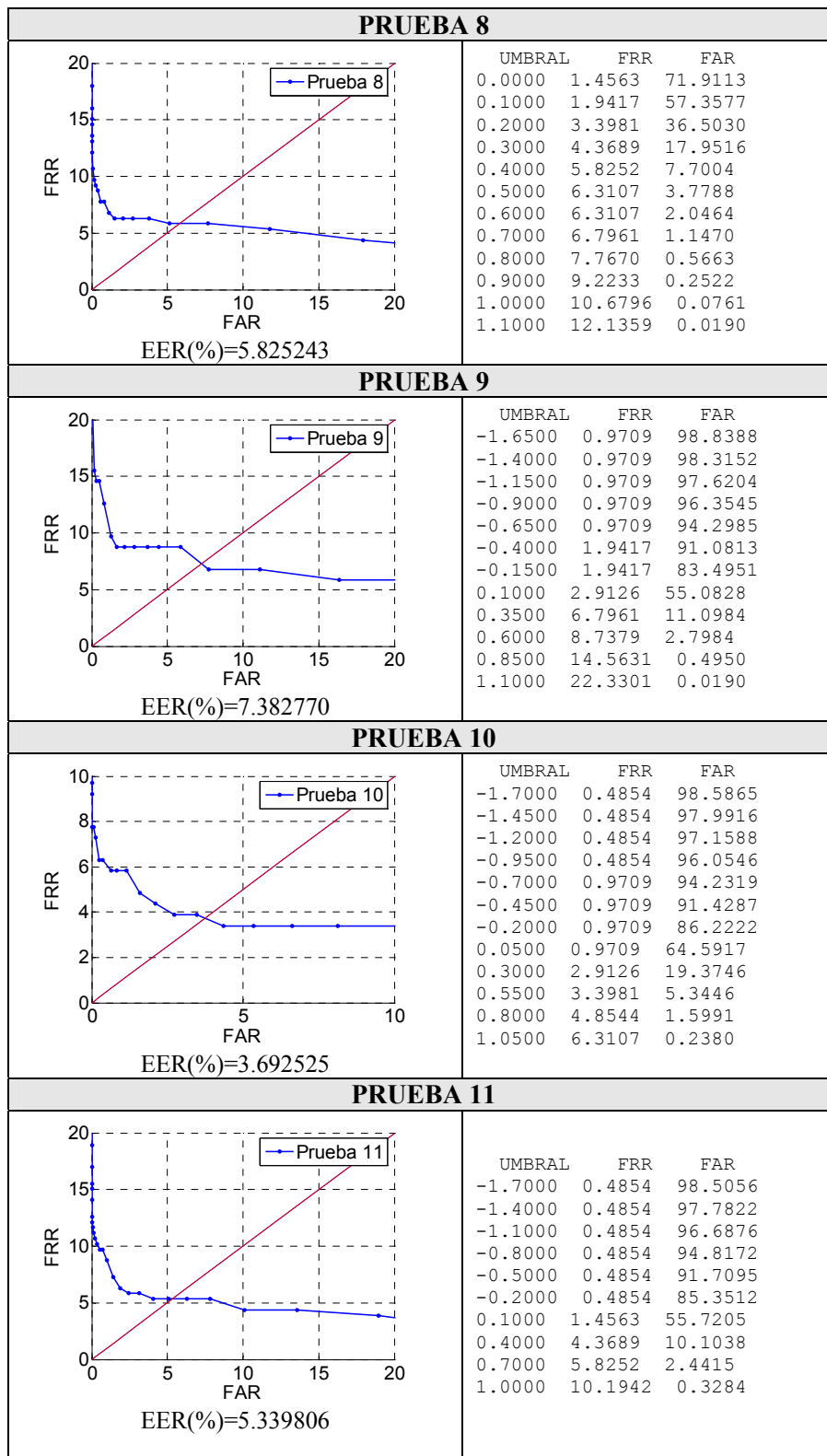
C.3.- Verificador 3D.

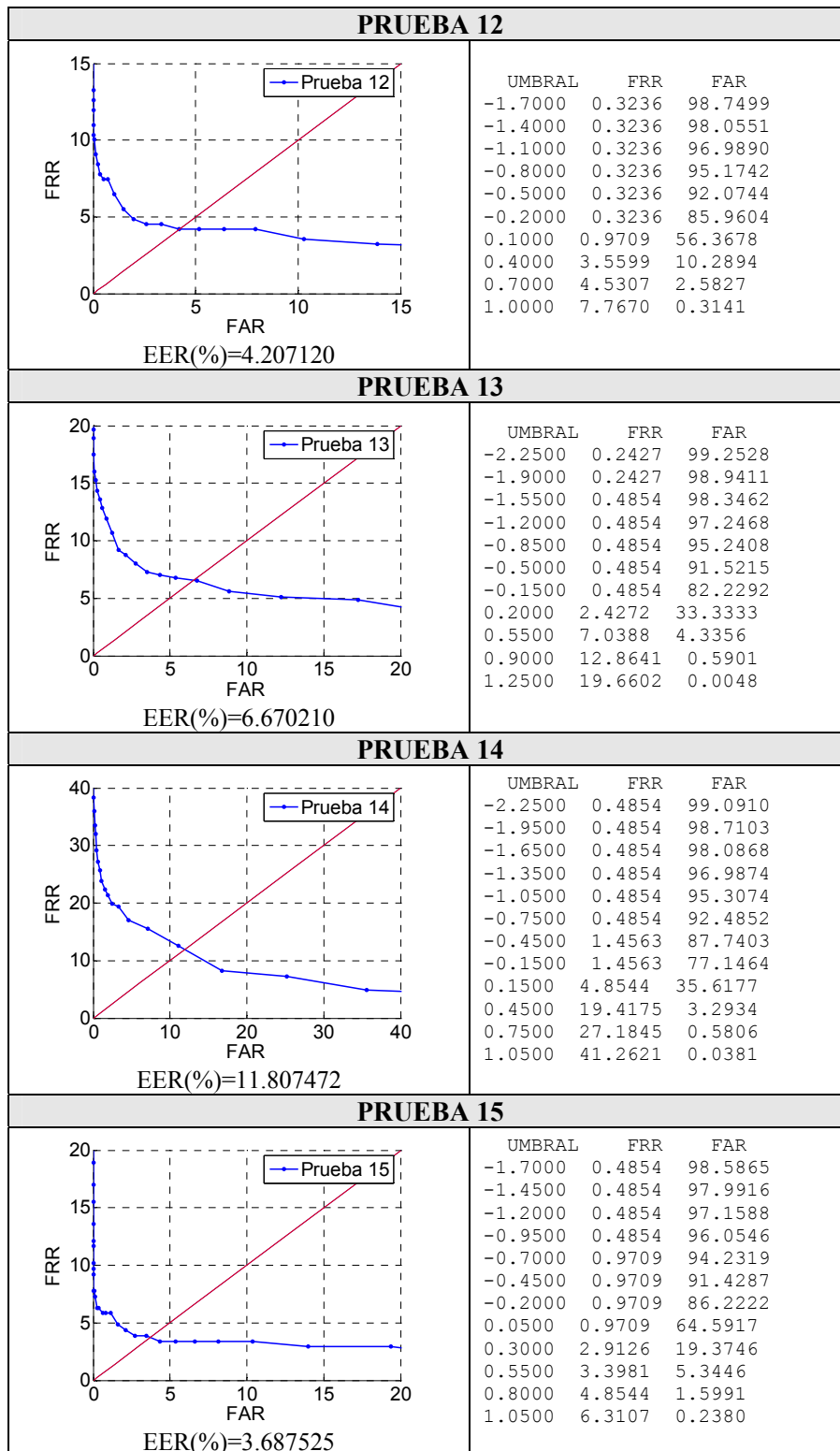
En este apartado mostraremos las curvas ROC correspondientes al verificador 3D. En la Tabla C. 6 se muestran los resultados correspondientes a las quince pruebas realizadas.

Tabla C. 6. Resultados Verificador 3D(mallado). Para cada prueba se presentan de izquierda a derecha: curva ROC y EER (%), datos numéricos en torno al EER: Umbral de aceptación, Tasa de Falso Rechazo (FRR) y Tasa de Falsa Aceptación (FAR).

CURVA ROC	Datos numéricos																																							
PRUEBA 1																																								
<p style="text-align: center;">EER(%)=4.854369</p>	<table border="1"> <thead> <tr> <th>UMBRAL</th> <th>FRR</th> <th>FAR</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>-1.7000</td><td>0.9709</td><td>98.6484</td></tr> <tr><td>-1.4500</td><td>0.9709</td><td>98.0773</td></tr> <tr><td>-1.2000</td><td>0.9709</td><td>97.2873</td></tr> <tr><td>-0.9500</td><td>0.9709</td><td>96.1831</td></tr> <tr><td>-0.7000</td><td>0.9709</td><td>94.4413</td></tr> <tr><td>-0.4500</td><td>0.9709</td><td>91.6429</td></tr> <tr><td>-0.2000</td><td>0.9709</td><td>86.5220</td></tr> <tr><td>0.0500</td><td>0.9709</td><td>65.1628</td></tr> <tr><td>0.3000</td><td>4.8544</td><td>19.8077</td></tr> <tr><td>0.5500</td><td>4.8544</td><td>5.3969</td></tr> <tr><td>0.8000</td><td>7.7670</td><td>1.5896</td></tr> <tr><td>1.0500</td><td>9.7087</td><td>0.2475</td></tr> </tbody> </table>	UMBRAL	FRR	FAR	-1.7000	0.9709	98.6484	-1.4500	0.9709	98.0773	-1.2000	0.9709	97.2873	-0.9500	0.9709	96.1831	-0.7000	0.9709	94.4413	-0.4500	0.9709	91.6429	-0.2000	0.9709	86.5220	0.0500	0.9709	65.1628	0.3000	4.8544	19.8077	0.5500	4.8544	5.3969	0.8000	7.7670	1.5896	1.0500	9.7087	0.2475
UMBRAL	FRR	FAR																																						
-1.7000	0.9709	98.6484																																						
-1.4500	0.9709	98.0773																																						
-1.2000	0.9709	97.2873																																						
-0.9500	0.9709	96.1831																																						
-0.7000	0.9709	94.4413																																						
-0.4500	0.9709	91.6429																																						
-0.2000	0.9709	86.5220																																						
0.0500	0.9709	65.1628																																						
0.3000	4.8544	19.8077																																						
0.5500	4.8544	5.3969																																						
0.8000	7.7670	1.5896																																						
1.0500	9.7087	0.2475																																						
PRUEBA 2																																								
<p style="text-align: center;">EER(%)=10.291612</p>	<table border="1"> <thead> <tr> <th>UMBRAL</th> <th>FRR</th> <th>FAR</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>-2.2500</td><td>0.9709</td><td>99.2290</td></tr> <tr><td>-1.9500</td><td>0.9709</td><td>98.8959</td></tr> <tr><td>-1.6500</td><td>0.9709</td><td>98.3343</td></tr> <tr><td>-1.3500</td><td>0.9709</td><td>97.3634</td></tr> <tr><td>-1.0500</td><td>0.9709</td><td>95.8595</td></tr> <tr><td>-0.7500</td><td>0.9709</td><td>93.2800</td></tr> <tr><td>-0.4500</td><td>0.9709</td><td>89.0634</td></tr> <tr><td>-0.1500</td><td>0.9709</td><td>78.5361</td></tr> <tr><td>0.1500</td><td>3.8835</td><td>36.6933</td></tr> <tr><td>0.4500</td><td>13.5922</td><td>3.1982</td></tr> <tr><td>0.7500</td><td>22.3301</td><td>0.5711</td></tr> <tr><td>1.0500</td><td>35.9223</td><td>0.0571</td></tr> </tbody> </table>	UMBRAL	FRR	FAR	-2.2500	0.9709	99.2290	-1.9500	0.9709	98.8959	-1.6500	0.9709	98.3343	-1.3500	0.9709	97.3634	-1.0500	0.9709	95.8595	-0.7500	0.9709	93.2800	-0.4500	0.9709	89.0634	-0.1500	0.9709	78.5361	0.1500	3.8835	36.6933	0.4500	13.5922	3.1982	0.7500	22.3301	0.5711	1.0500	35.9223	0.0571
UMBRAL	FRR	FAR																																						
-2.2500	0.9709	99.2290																																						
-1.9500	0.9709	98.8959																																						
-1.6500	0.9709	98.3343																																						
-1.3500	0.9709	97.3634																																						
-1.0500	0.9709	95.8595																																						
-0.7500	0.9709	93.2800																																						
-0.4500	0.9709	89.0634																																						
-0.1500	0.9709	78.5361																																						
0.1500	3.8835	36.6933																																						
0.4500	13.5922	3.1982																																						
0.7500	22.3301	0.5711																																						
1.0500	35.9223	0.0571																																						
PRUEBA 3																																								
<p style="text-align: center;">EER(%)=12.581833</p>	<table border="1"> <thead> <tr> <th>UMBRAL</th> <th>FRR</th> <th>FAR</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>-0.6500</td><td>0.9709</td><td>90.2532</td></tr> <tr><td>-0.5000</td><td>1.9417</td><td>87.3406</td></tr> <tr><td>-0.3500</td><td>1.9417</td><td>84.0377</td></tr> <tr><td>-0.2000</td><td>1.9417</td><td>78.8692</td></tr> <tr><td>-0.0500</td><td>2.9126</td><td>65.9813</td></tr> <tr><td>0.1000</td><td>4.8544</td><td>44.4508</td></tr> <tr><td>0.2500</td><td>8.7379</td><td>16.1432</td></tr> <tr><td>0.4000</td><td>22.3301</td><td>4.6545</td></tr> <tr><td>0.5500</td><td>27.1845</td><td>2.0560</td></tr> <tr><td>0.7000</td><td>30.0971</td><td>0.9233</td></tr> <tr><td>0.8500</td><td>35.9223</td><td>0.3331</td></tr> <tr><td>1.0000</td><td>42.7184</td><td>0.0666</td></tr> </tbody> </table>	UMBRAL	FRR	FAR	-0.6500	0.9709	90.2532	-0.5000	1.9417	87.3406	-0.3500	1.9417	84.0377	-0.2000	1.9417	78.8692	-0.0500	2.9126	65.9813	0.1000	4.8544	44.4508	0.2500	8.7379	16.1432	0.4000	22.3301	4.6545	0.5500	27.1845	2.0560	0.7000	30.0971	0.9233	0.8500	35.9223	0.3331	1.0000	42.7184	0.0666
UMBRAL	FRR	FAR																																						
-0.6500	0.9709	90.2532																																						
-0.5000	1.9417	87.3406																																						
-0.3500	1.9417	84.0377																																						
-0.2000	1.9417	78.8692																																						
-0.0500	2.9126	65.9813																																						
0.1000	4.8544	44.4508																																						
0.2500	8.7379	16.1432																																						
0.4000	22.3301	4.6545																																						
0.5500	27.1845	2.0560																																						
0.7000	30.0971	0.9233																																						
0.8500	35.9223	0.3331																																						
1.0000	42.7184	0.0666																																						

PRUEBA 4																																											
<p>EER(%)=3.374058</p>	<table border="1"> <thead> <tr> <th>UMBRAL</th> <th>FRR</th> <th>FAR</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>0.0500</td><td>0.4854</td><td>64.9724</td></tr> <tr><td>0.1500</td><td>0.9709</td><td>47.4872</td></tr> <tr><td>0.2500</td><td>1.9417</td><td>26.7895</td></tr> <tr><td>0.3500</td><td>1.9417</td><td>14.1300</td></tr> <tr><td>0.4500</td><td>2.4272</td><td>8.0573</td></tr> <tr><td>0.5500</td><td>2.9126</td><td>5.4207</td></tr> <tr><td>0.6500</td><td>3.3981</td><td>3.5075</td></tr> <tr><td>0.7500</td><td>3.3981</td><td>2.0893</td></tr> <tr><td>0.8500</td><td>3.3981</td><td>1.0327</td></tr> <tr><td>0.9500</td><td>3.8835</td><td>0.4807</td></tr> <tr><td>1.0500</td><td>4.3689</td><td>0.1904</td></tr> <tr><td>1.1500</td><td>5.8252</td><td>0.0571</td></tr> <tr><td>1.2500</td><td>6.3107</td><td>0.0095</td></tr> </tbody> </table>	UMBRAL	FRR	FAR	0.0500	0.4854	64.9724	0.1500	0.9709	47.4872	0.2500	1.9417	26.7895	0.3500	1.9417	14.1300	0.4500	2.4272	8.0573	0.5500	2.9126	5.4207	0.6500	3.3981	3.5075	0.7500	3.3981	2.0893	0.8500	3.3981	1.0327	0.9500	3.8835	0.4807	1.0500	4.3689	0.1904	1.1500	5.8252	0.0571	1.2500	6.3107	0.0095
UMBRAL	FRR	FAR																																									
0.0500	0.4854	64.9724																																									
0.1500	0.9709	47.4872																																									
0.2500	1.9417	26.7895																																									
0.3500	1.9417	14.1300																																									
0.4500	2.4272	8.0573																																									
0.5500	2.9126	5.4207																																									
0.6500	3.3981	3.5075																																									
0.7500	3.3981	2.0893																																									
0.8500	3.3981	1.0327																																									
0.9500	3.8835	0.4807																																									
1.0500	4.3689	0.1904																																									
1.1500	5.8252	0.0571																																									
1.2500	6.3107	0.0095																																									
PRUEBA 5																																											
<p>EER(%)=4.368932</p>	<table border="1"> <thead> <tr> <th>UMBRAL</th> <th>FRR</th> <th>FAR</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>-0.0500</td><td>0.4854</td><td>73.9435</td></tr> <tr><td>0.0500</td><td>1.4563</td><td>61.5648</td></tr> <tr><td>0.1500</td><td>1.4563</td><td>44.2699</td></tr> <tr><td>0.2500</td><td>1.4563</td><td>24.6764</td></tr> <tr><td>0.3500</td><td>3.3981</td><td>12.4833</td></tr> <tr><td>0.4500</td><td>4.3689</td><td>6.8913</td></tr> <tr><td>0.5500</td><td>4.3689</td><td>4.4784</td></tr> <tr><td>0.6500</td><td>4.3689</td><td>2.6794</td></tr> <tr><td>0.7500</td><td>4.8544</td><td>1.5039</td></tr> <tr><td>0.8500</td><td>6.3107</td><td>0.7853</td></tr> <tr><td>0.9500</td><td>7.7670</td><td>0.3427</td></tr> <tr><td>1.0500</td><td>10.6796</td><td>0.1285</td></tr> </tbody> </table>	UMBRAL	FRR	FAR	-0.0500	0.4854	73.9435	0.0500	1.4563	61.5648	0.1500	1.4563	44.2699	0.2500	1.4563	24.6764	0.3500	3.3981	12.4833	0.4500	4.3689	6.8913	0.5500	4.3689	4.4784	0.6500	4.3689	2.6794	0.7500	4.8544	1.5039	0.8500	6.3107	0.7853	0.9500	7.7670	0.3427	1.0500	10.6796	0.1285			
UMBRAL	FRR	FAR																																									
-0.0500	0.4854	73.9435																																									
0.0500	1.4563	61.5648																																									
0.1500	1.4563	44.2699																																									
0.2500	1.4563	24.6764																																									
0.3500	3.3981	12.4833																																									
0.4500	4.3689	6.8913																																									
0.5500	4.3689	4.4784																																									
0.6500	4.3689	2.6794																																									
0.7500	4.8544	1.5039																																									
0.8500	6.3107	0.7853																																									
0.9500	7.7670	0.3427																																									
1.0500	10.6796	0.1285																																									
PRUEBA 6																																											
<p>EER(%)=7.366990</p>	<table border="1"> <thead> <tr> <th>UMBRAL</th> <th>FRR</th> <th>FAR</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>-1.6500</td><td>0.9709</td><td>98.3343</td></tr> <tr><td>-1.4000</td><td>0.9709</td><td>97.8774</td></tr> <tr><td>-1.1500</td><td>0.9709</td><td>97.2302</td></tr> <tr><td>-0.9000</td><td>0.9709</td><td>95.8310</td></tr> <tr><td>-0.6500</td><td>0.9709</td><td>93.8797</td></tr> <tr><td>-0.4000</td><td>0.9709</td><td>91.0337</td></tr> <tr><td>-0.1500</td><td>0.9709</td><td>83.1239</td></tr> <tr><td>0.1000</td><td>2.9126</td><td>54.0739</td></tr> <tr><td>0.3500</td><td>6.7961</td><td>11.9646</td></tr> <tr><td>0.6000</td><td>11.6505</td><td>3.1601</td></tr> <tr><td>0.8500</td><td>14.5631</td><td>0.7329</td></tr> <tr><td>1.1000</td><td>16.5049</td><td>0.0476</td></tr> </tbody> </table>	UMBRAL	FRR	FAR	-1.6500	0.9709	98.3343	-1.4000	0.9709	97.8774	-1.1500	0.9709	97.2302	-0.9000	0.9709	95.8310	-0.6500	0.9709	93.8797	-0.4000	0.9709	91.0337	-0.1500	0.9709	83.1239	0.1000	2.9126	54.0739	0.3500	6.7961	11.9646	0.6000	11.6505	3.1601	0.8500	14.5631	0.7329	1.1000	16.5049	0.0476			
UMBRAL	FRR	FAR																																									
-1.6500	0.9709	98.3343																																									
-1.4000	0.9709	97.8774																																									
-1.1500	0.9709	97.2302																																									
-0.9000	0.9709	95.8310																																									
-0.6500	0.9709	93.8797																																									
-0.4000	0.9709	91.0337																																									
-0.1500	0.9709	83.1239																																									
0.1000	2.9126	54.0739																																									
0.3500	6.7961	11.9646																																									
0.6000	11.6505	3.1601																																									
0.8500	14.5631	0.7329																																									
1.1000	16.5049	0.0476																																									
PRUEBA 7																																											
<p>EER(%)=5.2499956</p>	<table border="1"> <thead> <tr> <th>UMBRAL</th> <th>FRR</th> <th>FAR</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>-2.3500</td><td>0.4854</td><td>98.5009</td></tr> <tr><td>-2.0000</td><td>0.4854</td><td>98.0773</td></tr> <tr><td>-1.6500</td><td>0.4854</td><td>97.4967</td></tr> <tr><td>-1.3000</td><td>0.4854</td><td>96.5877</td></tr> <tr><td>-0.9500</td><td>0.9709</td><td>95.2361</td></tr> <tr><td>-0.6000</td><td>0.9709</td><td>92.4329</td></tr> <tr><td>-0.2500</td><td>0.9709</td><td>87.0122</td></tr> <tr><td>0.1000</td><td>1.9417</td><td>55.1637</td></tr> <tr><td>0.4500</td><td>4.8544</td><td>8.2096</td></tr> <tr><td>0.8000</td><td>5.8252</td><td>1.4944</td></tr> <tr><td>1.1500</td><td>11.6505</td><td>0.0428</td></tr> </tbody> </table>	UMBRAL	FRR	FAR	-2.3500	0.4854	98.5009	-2.0000	0.4854	98.0773	-1.6500	0.4854	97.4967	-1.3000	0.4854	96.5877	-0.9500	0.9709	95.2361	-0.6000	0.9709	92.4329	-0.2500	0.9709	87.0122	0.1000	1.9417	55.1637	0.4500	4.8544	8.2096	0.8000	5.8252	1.4944	1.1500	11.6505	0.0428						
UMBRAL	FRR	FAR																																									
-2.3500	0.4854	98.5009																																									
-2.0000	0.4854	98.0773																																									
-1.6500	0.4854	97.4967																																									
-1.3000	0.4854	96.5877																																									
-0.9500	0.9709	95.2361																																									
-0.6000	0.9709	92.4329																																									
-0.2500	0.9709	87.0122																																									
0.1000	1.9417	55.1637																																									
0.4500	4.8544	8.2096																																									
0.8000	5.8252	1.4944																																									
1.1500	11.6505	0.0428																																									





C.4.- Fusión de Verificadores.

Finalmente, se presentarán los resultados experimentales obtenidos en las pruebas realizadas con los sistemas fusionados: 2D+2.5D y 2.5D+3D. Mostraremos las curvas de eficiencia obtenidas (EER(%) vs. λ (peso del parámetro de fusión), para cada uno de los sistemas fusionados (con diferentes condiciones de creación de las imágenes), con las dos normalizaciones de datos consideradas (estandarización Z-score, y normalización máximo-mínimo), y en el caso de las quince pruebas realizadas.

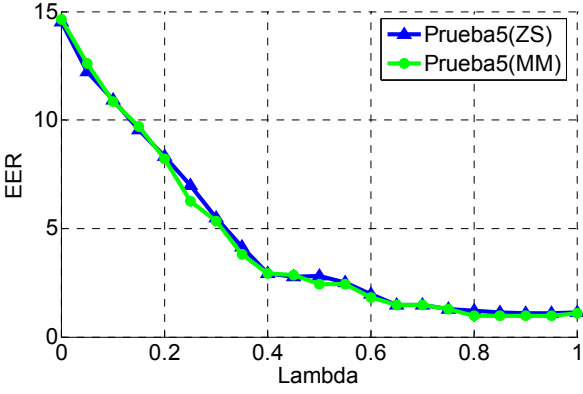
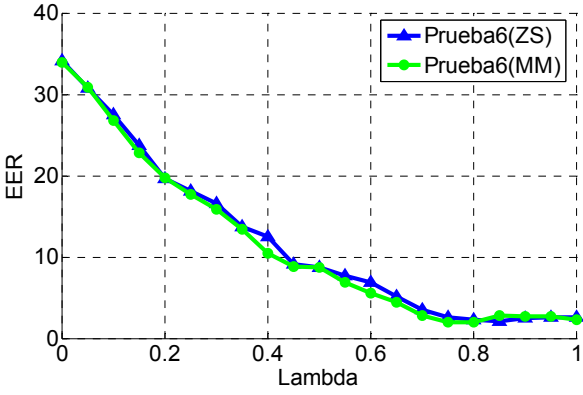
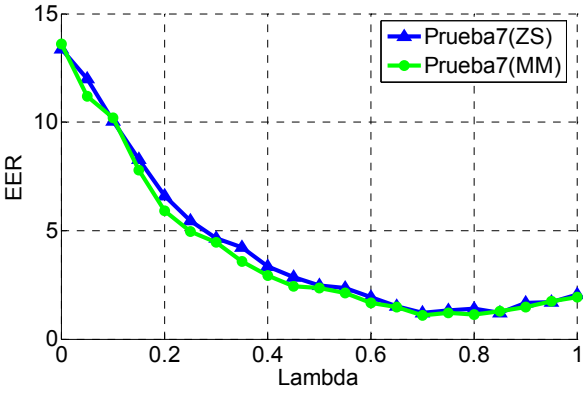
En todos los casos, las imágenes consideradas tienen un tamaño de 200x200 píxeles, y en el caso de las imágenes de rango, la función de creación utilizada ha sido de tipo exponencial. En las siguientes tablas se muestran las curvas de eficiencia obtenidas para las quince pruebas realizadas. En cada gráfica se muestran las curvas correspondientes a la normalización de datos máximo-mínimo, y a la estandarización Z-score. En la Tabla C. 7 se presentan los resultados del sistema 2D+2.5D, y en la Tabla C. 8 los del sistema 2.5D+3D.

Tabla C. 7. Resultados Verificador 2D+2.5D(color + rango), siendo el tamaño de imagen considerado 200x200 píxeles, y la función de creación de las imágenes de rango de tipo exponencial. Para cada prueba se presentan de izquierda a derecha: curvas de eficiencia (EER (%) vs. λ) correspondientes a la normalización máximo-mínimo (verde) y estandarización z-score (azul); y datos numéricos correspondientes.

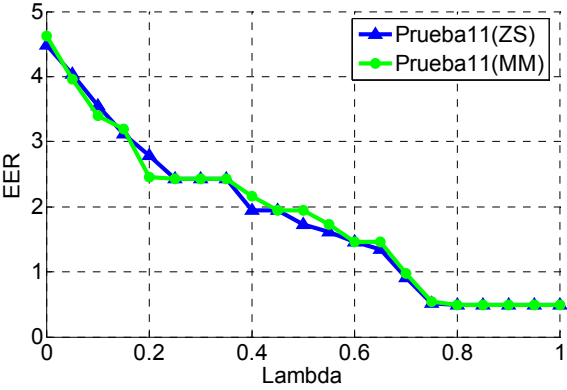
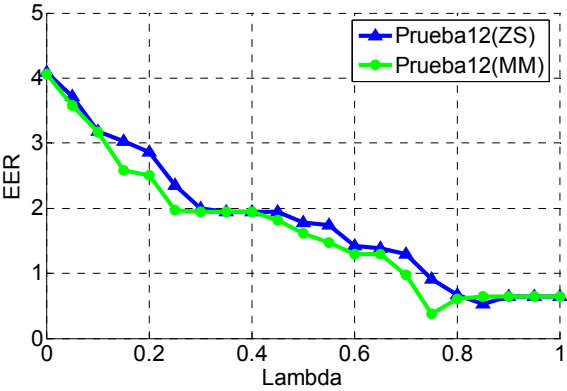
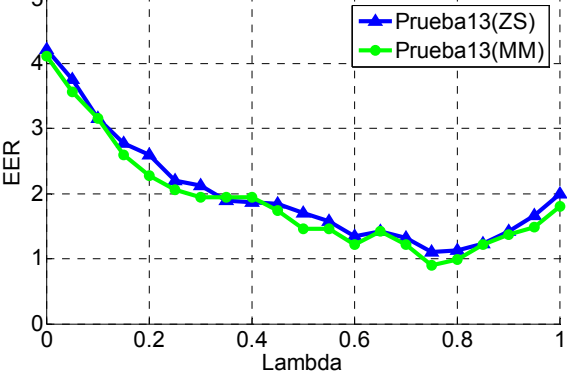
CURVA EFICIENCIA	Estandarización Z-score	Normalizacion Máx-mín
PRUEBA 1		
	EER (%) λ 2.912621 0 2.912621 .10 1.941748 .20 1.941748 .25 1.941748 .30 1.790723 .35 0.970874 .40 0.970874 .45 0.970874 .50 0.970874 .55 0.970874 .60 0.970874 .65 0.970874 .70 0.970874 .75 0.882612 .80 0.280831 .85 0.109910 .90 0.085665 .95 0.093354 1.00	EER (%) λ 2.912621 0 2.129750 .10 1.941748 .20 1.941748 .25 1.209613 .30 0.970874 .35 0.970874 .40 0.970874 .45 0.970874 .50 0.970874 .55 0.970874 .60 0.970874 .65 0.970874 .70 0.780433 .75 0.259919 .80 0.192501 .85 0.092464 .90 0.094260 .95 0.093354 1.00

Anexo C: Resultados experimentales completos

CURVA EFICIENCIA	Estandarización Z-score	Normalización Máx-mín
PRUEBA 2		
	EER (%) λ	EER (%) λ
	5.152229 0	4.680634 0
	3.690585 .05	3.700023 .05
	2.892335 .15	3.049574 .15
	2.341865 .20	2.004385 .20
	1.968130 .25	1.902210 .25
	1.958297 .30	1.995297 .30
	1.941748 .35	1.538636 .35
	1.721826 .40	1.252043 .40
	1.507797 .45	1.561996 .45
	1.240918 .50	1.560844 .50
	1.467733 .55	1.818359 .55
	1.711098 .60	2.158185 .60
	2.015991 .65	2.290487 .65
	2.293823 .70	2.461052 .70
	2.912621 .75	3.102497 .75
	2.912621 .80	2.977927 .80
2.912621 .85	3.498928 .85	
3.692419 .90	3.888440 .90	
3.883495 .95	3.911038 .95	
4.661137 1.00	5.100299 1.00	
PRUEBA 3		
	EER (%) λ	EER (%) λ
	12.465082 0	12.058798 0
	10.728442 .05	10.352626 .05
	8.068194 .15	8.440020 .15
	7.766990 .20	7.282142 .20
	7.693889 .25	6.791906 .25
	6.375178 .30	7.365624 .30
	6.775805 .35	7.603180 .35
	7.766990 .40	7.924554 .40
	7.743310 .45	8.331248 .45
	7.893888 .50	9.077107 .50
	8.899005 .55	8.909562 .55
	8.815476 .60	9.766578 .60
	9.283456 .65	10.080614 .65
	10.356536 .70	11.222706 .70
	10.810810 .75	10.992226 .75
	11.121551 .80	11.578001 .80
11.458333 .85	11.275282 .85	
11.650485 .90	12.245437 .90	
12.264421 .95	12.189991 .95	
12.914957 1.00	13.611719 1.00	
PRUEBA 4		
	EER (%) λ	EER (%) λ
	8.692689 0	8.602515 0
	8.003525 .05	7.891379 .05
	6.796116 .15	6.898673 .15
	5.903470 .20	6.043817 .20
	5.223193 .25	5.804348 .25
	4.660194 .30	4.886510 .30
	4.368932 .35	4.375077 .35
	4.368932 .40	4.368932 .40
	4.025436 .45	4.258554 .45
	3.398058 .50	3.501706 .50
	2.835496 .55	3.121610 .55
	2.445677 .60	2.565637 .60
	1.653041 .65	2.285390 .65
	0.970874 .70	1.128006 .70
	0.970874 .75	1.052283 .75
	0.957060 .80	1.088000 .80
0.612765 .85	0.940534 .85	
0.970874 .90	0.803931 .90	
0.970874 .95	0.860869 .95	
0.970874 1.00	0.970874 1.00	

CURVA EFICIENCIA	Estandarización Z-score	Normalización Máx-mín																																																																																				
PRUEBA 5																																																																																						
	<table border="1"> <thead> <tr> <th>EER (%)</th> <th>λ</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>14.622548</td><td>0</td></tr> <tr><td>10.861101</td><td>.10</td></tr> <tr><td>9.708738</td><td>.15</td></tr> <tr><td>8.204313</td><td>.20</td></tr> <tr><td>6.246730</td><td>.25</td></tr> <tr><td>5.335352</td><td>.30</td></tr> <tr><td>3.822118</td><td>.35</td></tr> <tr><td>2.912621</td><td>.40</td></tr> <tr><td>2.843475</td><td>.45</td></tr> <tr><td>2.427185</td><td>.50</td></tr> <tr><td>2.427185</td><td>.55</td></tr> <tr><td>1.809528</td><td>.60</td></tr> <tr><td>1.456311</td><td>.65</td></tr> <tr><td>1.456311</td><td>.70</td></tr> <tr><td>1.279414</td><td>.75</td></tr> <tr><td>0.970874</td><td>.80</td></tr> <tr><td>0.970874</td><td>.85</td></tr> <tr><td>0.970874</td><td>.90</td></tr> <tr><td>0.970874</td><td>.95</td></tr> <tr><td>1.097667</td><td>1.00</td></tr> </tbody> </table>	EER (%)	λ	14.622548	0	10.861101	.10	9.708738	.15	8.204313	.20	6.246730	.25	5.335352	.30	3.822118	.35	2.912621	.40	2.843475	.45	2.427185	.50	2.427185	.55	1.809528	.60	1.456311	.65	1.456311	.70	1.279414	.75	0.970874	.80	0.970874	.85	0.970874	.90	0.970874	.95	1.097667	1.00	<table border="1"> <thead> <tr> <th>EER (%)</th> <th>λ</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>14.517125</td><td>0</td></tr> <tr><td>10.910633</td><td>.10</td></tr> <tr><td>9.546791</td><td>.15</td></tr> <tr><td>8.341105</td><td>.20</td></tr> <tr><td>6.978734</td><td>.25</td></tr> <tr><td>5.500270</td><td>.30</td></tr> <tr><td>4.136583</td><td>.35</td></tr> <tr><td>2.912621</td><td>.40</td></tr> <tr><td>2.790947</td><td>.45</td></tr> <tr><td>2.798158</td><td>.50</td></tr> <tr><td>2.487864</td><td>.55</td></tr> <tr><td>1.966965</td><td>.60</td></tr> <tr><td>1.456311</td><td>.65</td></tr> <tr><td>1.456311</td><td>.70</td></tr> <tr><td>1.282575</td><td>.75</td></tr> <tr><td>1.212975</td><td>.80</td></tr> <tr><td>1.128641</td><td>.85</td></tr> <tr><td>1.076023</td><td>.90</td></tr> <tr><td>1.079655</td><td>.95</td></tr> <tr><td>1.116505</td><td>1.00</td></tr> </tbody> </table>	EER (%)	λ	14.517125	0	10.910633	.10	9.546791	.15	8.341105	.20	6.978734	.25	5.500270	.30	4.136583	.35	2.912621	.40	2.790947	.45	2.798158	.50	2.487864	.55	1.966965	.60	1.456311	.65	1.456311	.70	1.282575	.75	1.212975	.80	1.128641	.85	1.076023	.90	1.079655	.95	1.116505	1.00
EER (%)	λ																																																																																					
14.622548	0																																																																																					
10.861101	.10																																																																																					
9.708738	.15																																																																																					
8.204313	.20																																																																																					
6.246730	.25																																																																																					
5.335352	.30																																																																																					
3.822118	.35																																																																																					
2.912621	.40																																																																																					
2.843475	.45																																																																																					
2.427185	.50																																																																																					
2.427185	.55																																																																																					
1.809528	.60																																																																																					
1.456311	.65																																																																																					
1.456311	.70																																																																																					
1.279414	.75																																																																																					
0.970874	.80																																																																																					
0.970874	.85																																																																																					
0.970874	.90																																																																																					
0.970874	.95																																																																																					
1.097667	1.00																																																																																					
EER (%)	λ																																																																																					
14.517125	0																																																																																					
10.910633	.10																																																																																					
9.546791	.15																																																																																					
8.341105	.20																																																																																					
6.978734	.25																																																																																					
5.500270	.30																																																																																					
4.136583	.35																																																																																					
2.912621	.40																																																																																					
2.790947	.45																																																																																					
2.798158	.50																																																																																					
2.487864	.55																																																																																					
1.966965	.60																																																																																					
1.456311	.65																																																																																					
1.456311	.70																																																																																					
1.282575	.75																																																																																					
1.212975	.80																																																																																					
1.128641	.85																																																																																					
1.076023	.90																																																																																					
1.079655	.95																																																																																					
1.116505	1.00																																																																																					
PRUEBA 6																																																																																						
	<table border="1"> <thead> <tr> <th>EER (%)</th> <th>λ</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>33.900463</td><td>0</td></tr> <tr><td>26.821419</td><td>.10</td></tr> <tr><td>22.782183</td><td>.15</td></tr> <tr><td>19.712566</td><td>.20</td></tr> <tr><td>17.668434</td><td>.25</td></tr> <tr><td>15.887432</td><td>.30</td></tr> <tr><td>13.391894</td><td>.35</td></tr> <tr><td>10.468195</td><td>.40</td></tr> <tr><td>8.785809</td><td>.45</td></tr> <tr><td>8.737864</td><td>.50</td></tr> <tr><td>6.866627</td><td>.55</td></tr> <tr><td>5.532191</td><td>.60</td></tr> <tr><td>4.399343</td><td>.65</td></tr> <tr><td>2.755568</td><td>.70</td></tr> <tr><td>1.941748</td><td>.75</td></tr> <tr><td>2.024493</td><td>.80</td></tr> <tr><td>2.791980</td><td>.85</td></tr> <tr><td>2.732504</td><td>.90</td></tr> <tr><td>2.698936</td><td>.95</td></tr> <tr><td>2.277422</td><td>1.00</td></tr> </tbody> </table>	EER (%)	λ	33.900463	0	26.821419	.10	22.782183	.15	19.712566	.20	17.668434	.25	15.887432	.30	13.391894	.35	10.468195	.40	8.785809	.45	8.737864	.50	6.866627	.55	5.532191	.60	4.399343	.65	2.755568	.70	1.941748	.75	2.024493	.80	2.791980	.85	2.732504	.90	2.698936	.95	2.277422	1.00	<table border="1"> <thead> <tr> <th>EER (%)</th> <th>λ</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>34.142876</td><td>0</td></tr> <tr><td>27.522161</td><td>.10</td></tr> <tr><td>23.741182</td><td>.15</td></tr> <tr><td>19.685436</td><td>.20</td></tr> <tr><td>18.080835</td><td>.25</td></tr> <tr><td>16.538443</td><td>.30</td></tr> <tr><td>13.746143</td><td>.35</td></tr> <tr><td>12.530938</td><td>.40</td></tr> <tr><td>9.183418</td><td>.45</td></tr> <tr><td>8.737864</td><td>.50</td></tr> <tr><td>7.665004</td><td>.55</td></tr> <tr><td>6.861879</td><td>.60</td></tr> <tr><td>5.146540</td><td>.65</td></tr> <tr><td>3.566413</td><td>.70</td></tr> <tr><td>2.632022</td><td>.75</td></tr> <tr><td>2.338085</td><td>.80</td></tr> <tr><td>2.087491</td><td>.85</td></tr> <tr><td>2.460663</td><td>.90</td></tr> <tr><td>2.557678</td><td>.95</td></tr> <tr><td>2.592804</td><td>1.00</td></tr> </tbody> </table>	EER (%)	λ	34.142876	0	27.522161	.10	23.741182	.15	19.685436	.20	18.080835	.25	16.538443	.30	13.746143	.35	12.530938	.40	9.183418	.45	8.737864	.50	7.665004	.55	6.861879	.60	5.146540	.65	3.566413	.70	2.632022	.75	2.338085	.80	2.087491	.85	2.460663	.90	2.557678	.95	2.592804	1.00
EER (%)	λ																																																																																					
33.900463	0																																																																																					
26.821419	.10																																																																																					
22.782183	.15																																																																																					
19.712566	.20																																																																																					
17.668434	.25																																																																																					
15.887432	.30																																																																																					
13.391894	.35																																																																																					
10.468195	.40																																																																																					
8.785809	.45																																																																																					
8.737864	.50																																																																																					
6.866627	.55																																																																																					
5.532191	.60																																																																																					
4.399343	.65																																																																																					
2.755568	.70																																																																																					
1.941748	.75																																																																																					
2.024493	.80																																																																																					
2.791980	.85																																																																																					
2.732504	.90																																																																																					
2.698936	.95																																																																																					
2.277422	1.00																																																																																					
EER (%)	λ																																																																																					
34.142876	0																																																																																					
27.522161	.10																																																																																					
23.741182	.15																																																																																					
19.685436	.20																																																																																					
18.080835	.25																																																																																					
16.538443	.30																																																																																					
13.746143	.35																																																																																					
12.530938	.40																																																																																					
9.183418	.45																																																																																					
8.737864	.50																																																																																					
7.665004	.55																																																																																					
6.861879	.60																																																																																					
5.146540	.65																																																																																					
3.566413	.70																																																																																					
2.632022	.75																																																																																					
2.338085	.80																																																																																					
2.087491	.85																																																																																					
2.460663	.90																																																																																					
2.557678	.95																																																																																					
2.592804	1.00																																																																																					
PRUEBA 7																																																																																						
	<table border="1"> <thead> <tr> <th>EER (%)</th> <th>λ</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>13.587915</td><td>0</td></tr> <tr><td>10.208086</td><td>.10</td></tr> <tr><td>7.781620</td><td>.15</td></tr> <tr><td>5.898835</td><td>.20</td></tr> <tr><td>4.936567</td><td>.25</td></tr> <tr><td>4.448048</td><td>.30</td></tr> <tr><td>3.564039</td><td>.35</td></tr> <tr><td>2.912621</td><td>.40</td></tr> <tr><td>2.427185</td><td>.45</td></tr> <tr><td>2.342478</td><td>.50</td></tr> <tr><td>2.131142</td><td>.55</td></tr> <tr><td>1.654293</td><td>.60</td></tr> <tr><td>1.456311</td><td>.65</td></tr> <tr><td>1.098092</td><td>.70</td></tr> <tr><td>1.202615</td><td>.75</td></tr> <tr><td>1.113488</td><td>.80</td></tr> <tr><td>1.280008</td><td>.85</td></tr> <tr><td>1.461394</td><td>.90</td></tr> <tr><td>1.731991</td><td>.95</td></tr> <tr><td>1.941748</td><td>1.00</td></tr> </tbody> </table>	EER (%)	λ	13.587915	0	10.208086	.10	7.781620	.15	5.898835	.20	4.936567	.25	4.448048	.30	3.564039	.35	2.912621	.40	2.427185	.45	2.342478	.50	2.131142	.55	1.654293	.60	1.456311	.65	1.098092	.70	1.202615	.75	1.113488	.80	1.280008	.85	1.461394	.90	1.731991	.95	1.941748	1.00	<table border="1"> <thead> <tr> <th>EER (%)</th> <th>λ</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>13.376746</td><td>0</td></tr> <tr><td>10.062052</td><td>.10</td></tr> <tr><td>8.295644</td><td>.15</td></tr> <tr><td>6.612370</td><td>.20</td></tr> <tr><td>5.438192</td><td>.25</td></tr> <tr><td>4.660859</td><td>.30</td></tr> <tr><td>4.231140</td><td>.35</td></tr> <tr><td>3.344795</td><td>.40</td></tr> <tr><td>2.835272</td><td>.45</td></tr> <tr><td>2.483924</td><td>.50</td></tr> <tr><td>2.354291</td><td>.55</td></tr> <tr><td>1.940953</td><td>.60</td></tr> <tr><td>1.514595</td><td>.65</td></tr> <tr><td>1.198200</td><td>.70</td></tr> <tr><td>1.327691</td><td>.75</td></tr> <tr><td>1.385196</td><td>.80</td></tr> <tr><td>1.221453</td><td>.85</td></tr> <tr><td>1.668152</td><td>.90</td></tr> <tr><td>1.713843</td><td>.95</td></tr> <tr><td>2.046134</td><td>1.00</td></tr> </tbody> </table>	EER (%)	λ	13.376746	0	10.062052	.10	8.295644	.15	6.612370	.20	5.438192	.25	4.660859	.30	4.231140	.35	3.344795	.40	2.835272	.45	2.483924	.50	2.354291	.55	1.940953	.60	1.514595	.65	1.198200	.70	1.327691	.75	1.385196	.80	1.221453	.85	1.668152	.90	1.713843	.95	2.046134	1.00
EER (%)	λ																																																																																					
13.587915	0																																																																																					
10.208086	.10																																																																																					
7.781620	.15																																																																																					
5.898835	.20																																																																																					
4.936567	.25																																																																																					
4.448048	.30																																																																																					
3.564039	.35																																																																																					
2.912621	.40																																																																																					
2.427185	.45																																																																																					
2.342478	.50																																																																																					
2.131142	.55																																																																																					
1.654293	.60																																																																																					
1.456311	.65																																																																																					
1.098092	.70																																																																																					
1.202615	.75																																																																																					
1.113488	.80																																																																																					
1.280008	.85																																																																																					
1.461394	.90																																																																																					
1.731991	.95																																																																																					
1.941748	1.00																																																																																					
EER (%)	λ																																																																																					
13.376746	0																																																																																					
10.062052	.10																																																																																					
8.295644	.15																																																																																					
6.612370	.20																																																																																					
5.438192	.25																																																																																					
4.660859	.30																																																																																					
4.231140	.35																																																																																					
3.344795	.40																																																																																					
2.835272	.45																																																																																					
2.483924	.50																																																																																					
2.354291	.55																																																																																					
1.940953	.60																																																																																					
1.514595	.65																																																																																					
1.198200	.70																																																																																					
1.327691	.75																																																																																					
1.385196	.80																																																																																					
1.221453	.85																																																																																					
1.668152	.90																																																																																					
1.713843	.95																																																																																					
2.046134	1.00																																																																																					

CURVA EFICIENCIA	Estandarización Z-score	Normalización Máx-mín
PRUEBA 8		
	EER (%) λ	EER (%) λ
	27.357483 0	27.389427 0
	23.381819 .10	22.120893 .10
	20.819918 .15	20.288971 .15
	19.332415 .20	18.638292 .20
	17.556198 .25	16.269526 .25
	15.571021 .30	14.150545 .30
	13.623064 .35	12.088017 .35
	11.328911 .40	10.139343 .40
	9.315765 .45	8.567500 .45
	8.397668 .50	7.342698 .50
	7.560722 .55	6.498973 .55
	6.358759 .60	5.776290 .60
	5.330548 .65	5.567217 .65
	5.379935 .70	4.950809 .70
	4.798996 .75	4.827579 .75
4.475917 .80	4.121200 .80	
3.832841 .85	3.883495 .85	
4.246191 .90	4.422492 .90	
4.468984 .95	4.764055 .95	
4.725902 1.00	5.017759 1.00	
PRUEBA 9		
	EER (%) λ	EER (%) λ
	41.151146 0	40.825047 0
	38.799126 .05	39.440331 .05
	36.591896 .10	36.706661 .10
	35.247787 .15	35.644939 .15
	32.090931 .20	33.520081 .20
	28.527372 .25	30.803551 .25
	26.236986 .30	27.938940 .30
	24.648685 .35	26.152502 .35
	20.631767 .40	22.730574 .40
	16.557177 .45	20.008917 .45
	13.205274 .50	15.850648 .50
	12.174710 .55	13.162099 .55
	10.333944 .60	11.628072 .60
	8.450939 .65	9.443398 .65
	7.403761 .70	7.985975 .70
5.787102 .75	6.633875 .75	
4.854369 .80	5.457465 .80	
3.883495 .85	4.115905 .85	
3.883495 .90	3.686181 .90	
3.883495 .95	3.778012 .95	
3.883495 1.00	3.543131 1.00	
PRUEBA 10		
	EER (%) λ	EER (%) λ
	1.941748 0	1.941748 0
	1.941748 .10	1.941748 .10
	1.941748 .15	1.734418 .15
	1.456311 .20	1.534938 .20
	1.106632 .25	0.970874 .25
	0.970874 .30	0.897192 .30
	0.629270 .35	0.815489 .35
	0.485437 .40	0.485437 .40
	0.485437 .45	0.485437 .45
	0.485437 .50	0.485437 .50
	0.485437 .55	0.485437 .55
	0.485437 .60	0.485437 .60
	0.485437 .65	0.485437 .65
	0.485437 .70	0.485437 .70
	0.262398 .75	0.256203 .75
0.064725 .80	0.208044 .80	
0.148100 .85	0.196799 .85	
0.253121 .90	0.421818 .90	
0.485437 .95	0.417222 .95	
0.485437 1.00	0.485437 1.00	

CURVA EFICIENCIA	Estandarización Z-score	Normalización Máx-mín																																																																																				
PRUEBA 11																																																																																						
	<table border="1"> <thead> <tr> <th>EER (%)</th> <th>λ</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>4.626933</td><td>0</td></tr> <tr><td>3.398058</td><td>.10</td></tr> <tr><td>3.191265</td><td>.15</td></tr> <tr><td>2.461275</td><td>.20</td></tr> <tr><td>2.427185</td><td>.25</td></tr> <tr><td>2.427185</td><td>.30</td></tr> <tr><td>2.427185</td><td>.35</td></tr> <tr><td>2.160042</td><td>.40</td></tr> <tr><td>1.941748</td><td>.45</td></tr> <tr><td>1.941748</td><td>.50</td></tr> <tr><td>1.732279</td><td>.55</td></tr> <tr><td>1.456311</td><td>.60</td></tr> <tr><td>1.456311</td><td>.65</td></tr> <tr><td>0.970874</td><td>.70</td></tr> <tr><td>0.540392</td><td>.75</td></tr> <tr><td>0.485437</td><td>.80</td></tr> <tr><td>0.485437</td><td>.85</td></tr> <tr><td>0.485437</td><td>.90</td></tr> <tr><td>0.485437</td><td>.95</td></tr> <tr><td>0.485437</td><td>1.00</td></tr> </tbody> </table>	EER (%)	λ	4.626933	0	3.398058	.10	3.191265	.15	2.461275	.20	2.427185	.25	2.427185	.30	2.427185	.35	2.160042	.40	1.941748	.45	1.941748	.50	1.732279	.55	1.456311	.60	1.456311	.65	0.970874	.70	0.540392	.75	0.485437	.80	0.485437	.85	0.485437	.90	0.485437	.95	0.485437	1.00	<table border="1"> <thead> <tr> <th>EER (%)</th> <th>λ</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>4.486933</td><td>0</td></tr> <tr><td>3.548506</td><td>.10</td></tr> <tr><td>3.123939</td><td>.15</td></tr> <tr><td>2.783714</td><td>.20</td></tr> <tr><td>2.427185</td><td>.25</td></tr> <tr><td>2.427185</td><td>.30</td></tr> <tr><td>2.427185</td><td>.35</td></tr> <tr><td>1.941748</td><td>.40</td></tr> <tr><td>1.941748</td><td>.45</td></tr> <tr><td>1.726095</td><td>.50</td></tr> <tr><td>1.607407</td><td>.55</td></tr> <tr><td>1.456311</td><td>.60</td></tr> <tr><td>1.345153</td><td>.65</td></tr> <tr><td>0.916520</td><td>.70</td></tr> <tr><td>0.510589</td><td>.75</td></tr> <tr><td>0.485437</td><td>.80</td></tr> <tr><td>0.485437</td><td>.85</td></tr> <tr><td>0.485437</td><td>.90</td></tr> <tr><td>0.485437</td><td>.95</td></tr> <tr><td>0.485437</td><td>1.00</td></tr> </tbody> </table>	EER (%)	λ	4.486933	0	3.548506	.10	3.123939	.15	2.783714	.20	2.427185	.25	2.427185	.30	2.427185	.35	1.941748	.40	1.941748	.45	1.726095	.50	1.607407	.55	1.456311	.60	1.345153	.65	0.916520	.70	0.510589	.75	0.485437	.80	0.485437	.85	0.485437	.90	0.485437	.95	0.485437	1.00
EER (%)	λ																																																																																					
4.626933	0																																																																																					
3.398058	.10																																																																																					
3.191265	.15																																																																																					
2.461275	.20																																																																																					
2.427185	.25																																																																																					
2.427185	.30																																																																																					
2.427185	.35																																																																																					
2.160042	.40																																																																																					
1.941748	.45																																																																																					
1.941748	.50																																																																																					
1.732279	.55																																																																																					
1.456311	.60																																																																																					
1.456311	.65																																																																																					
0.970874	.70																																																																																					
0.540392	.75																																																																																					
0.485437	.80																																																																																					
0.485437	.85																																																																																					
0.485437	.90																																																																																					
0.485437	.95																																																																																					
0.485437	1.00																																																																																					
EER (%)	λ																																																																																					
4.486933	0																																																																																					
3.548506	.10																																																																																					
3.123939	.15																																																																																					
2.783714	.20																																																																																					
2.427185	.25																																																																																					
2.427185	.30																																																																																					
2.427185	.35																																																																																					
1.941748	.40																																																																																					
1.941748	.45																																																																																					
1.726095	.50																																																																																					
1.607407	.55																																																																																					
1.456311	.60																																																																																					
1.345153	.65																																																																																					
0.916520	.70																																																																																					
0.510589	.75																																																																																					
0.485437	.80																																																																																					
0.485437	.85																																																																																					
0.485437	.90																																																																																					
0.485437	.95																																																																																					
0.485437	1.00																																																																																					
PRUEBA 12																																																																																						
	<table border="1"> <thead> <tr> <th>EER (%)</th> <th>λ</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>4.059059</td><td>0</td></tr> <tr><td>3.171045</td><td>.10</td></tr> <tr><td>2.588997</td><td>.15</td></tr> <tr><td>2.506975</td><td>.20</td></tr> <tr><td>1.964551</td><td>.25</td></tr> <tr><td>1.941748</td><td>.30</td></tr> <tr><td>1.941748</td><td>.35</td></tr> <tr><td>1.941748</td><td>.40</td></tr> <tr><td>1.818498</td><td>.45</td></tr> <tr><td>1.618123</td><td>.50</td></tr> <tr><td>1.469330</td><td>.55</td></tr> <tr><td>1.294498</td><td>.60</td></tr> <tr><td>1.294498</td><td>.65</td></tr> <tr><td>0.970874</td><td>.70</td></tr> <tr><td>0.381372</td><td>.75</td></tr> <tr><td>0.611291</td><td>.80</td></tr> <tr><td>0.647249</td><td>.85</td></tr> <tr><td>0.647249</td><td>.90</td></tr> <tr><td>0.647249</td><td>.95</td></tr> <tr><td>0.647249</td><td>1.00</td></tr> </tbody> </table>	EER (%)	λ	4.059059	0	3.171045	.10	2.588997	.15	2.506975	.20	1.964551	.25	1.941748	.30	1.941748	.35	1.941748	.40	1.818498	.45	1.618123	.50	1.469330	.55	1.294498	.60	1.294498	.65	0.970874	.70	0.381372	.75	0.611291	.80	0.647249	.85	0.647249	.90	0.647249	.95	0.647249	1.00	<table border="1"> <thead> <tr> <th>EER (%)</th> <th>λ</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>4.082131</td><td>0</td></tr> <tr><td>3.183507</td><td>.10</td></tr> <tr><td>3.024575</td><td>.15</td></tr> <tr><td>2.857151</td><td>.20</td></tr> <tr><td>2.358762</td><td>.25</td></tr> <tr><td>1.998404</td><td>.30</td></tr> <tr><td>1.941748</td><td>.35</td></tr> <tr><td>1.941748</td><td>.40</td></tr> <tr><td>1.941748</td><td>.45</td></tr> <tr><td>1.781894</td><td>.50</td></tr> <tr><td>1.741888</td><td>.55</td></tr> <tr><td>1.423644</td><td>.60</td></tr> <tr><td>1.384300</td><td>.65</td></tr> <tr><td>1.294498</td><td>.70</td></tr> <tr><td>0.909339</td><td>.75</td></tr> <tr><td>0.673915</td><td>.80</td></tr> <tr><td>0.535134</td><td>.85</td></tr> <tr><td>0.647249</td><td>.90</td></tr> <tr><td>0.647249</td><td>.95</td></tr> <tr><td>0.647249</td><td>1.00</td></tr> </tbody> </table>	EER (%)	λ	4.082131	0	3.183507	.10	3.024575	.15	2.857151	.20	2.358762	.25	1.998404	.30	1.941748	.35	1.941748	.40	1.941748	.45	1.781894	.50	1.741888	.55	1.423644	.60	1.384300	.65	1.294498	.70	0.909339	.75	0.673915	.80	0.535134	.85	0.647249	.90	0.647249	.95	0.647249	1.00
EER (%)	λ																																																																																					
4.059059	0																																																																																					
3.171045	.10																																																																																					
2.588997	.15																																																																																					
2.506975	.20																																																																																					
1.964551	.25																																																																																					
1.941748	.30																																																																																					
1.941748	.35																																																																																					
1.941748	.40																																																																																					
1.818498	.45																																																																																					
1.618123	.50																																																																																					
1.469330	.55																																																																																					
1.294498	.60																																																																																					
1.294498	.65																																																																																					
0.970874	.70																																																																																					
0.381372	.75																																																																																					
0.611291	.80																																																																																					
0.647249	.85																																																																																					
0.647249	.90																																																																																					
0.647249	.95																																																																																					
0.647249	1.00																																																																																					
EER (%)	λ																																																																																					
4.082131	0																																																																																					
3.183507	.10																																																																																					
3.024575	.15																																																																																					
2.857151	.20																																																																																					
2.358762	.25																																																																																					
1.998404	.30																																																																																					
1.941748	.35																																																																																					
1.941748	.40																																																																																					
1.941748	.45																																																																																					
1.781894	.50																																																																																					
1.741888	.55																																																																																					
1.423644	.60																																																																																					
1.384300	.65																																																																																					
1.294498	.70																																																																																					
0.909339	.75																																																																																					
0.673915	.80																																																																																					
0.535134	.85																																																																																					
0.647249	.90																																																																																					
0.647249	.95																																																																																					
0.647249	1.00																																																																																					
PRUEBA 13																																																																																						
	<table border="1"> <thead> <tr> <th>EER (%)</th> <th>λ</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>4.113317</td><td>0</td></tr> <tr><td>3.155340</td><td>.10</td></tr> <tr><td>2.592261</td><td>.15</td></tr> <tr><td>2.280809</td><td>.20</td></tr> <tr><td>2.060116</td><td>.25</td></tr> <tr><td>1.941748</td><td>.30</td></tr> <tr><td>1.941748</td><td>.35</td></tr> <tr><td>1.941748</td><td>.40</td></tr> <tr><td>1.735719</td><td>.45</td></tr> <tr><td>1.456311</td><td>.50</td></tr> <tr><td>1.455334</td><td>.55</td></tr> <tr><td>1.213592</td><td>.60</td></tr> <tr><td>1.417476</td><td>.65</td></tr> <tr><td>1.213592</td><td>.70</td></tr> <tr><td>0.897981</td><td>.75</td></tr> <tr><td>0.990061</td><td>.80</td></tr> <tr><td>1.213592</td><td>.85</td></tr> <tr><td>1.373920</td><td>.90</td></tr> <tr><td>1.490751</td><td>.95</td></tr> <tr><td>1.805546</td><td>1.00</td></tr> </tbody> </table>	EER (%)	λ	4.113317	0	3.155340	.10	2.592261	.15	2.280809	.20	2.060116	.25	1.941748	.30	1.941748	.35	1.941748	.40	1.735719	.45	1.456311	.50	1.455334	.55	1.213592	.60	1.417476	.65	1.213592	.70	0.897981	.75	0.990061	.80	1.213592	.85	1.373920	.90	1.490751	.95	1.805546	1.00	<table border="1"> <thead> <tr> <th>EER (%)</th> <th>λ</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>4.215600</td><td>0</td></tr> <tr><td>3.161463</td><td>.10</td></tr> <tr><td>2.774143</td><td>.15</td></tr> <tr><td>2.589304</td><td>.20</td></tr> <tr><td>2.204939</td><td>.25</td></tr> <tr><td>2.122148</td><td>.30</td></tr> <tr><td>1.893274</td><td>.35</td></tr> <tr><td>1.864125</td><td>.40</td></tr> <tr><td>1.838592</td><td>.45</td></tr> <tr><td>1.705734</td><td>.50</td></tr> <tr><td>1.573873</td><td>.55</td></tr> <tr><td>1.341677</td><td>.60</td></tr> <tr><td>1.416734</td><td>.65</td></tr> <tr><td>1.316434</td><td>.70</td></tr> <tr><td>1.108032</td><td>.75</td></tr> <tr><td>1.128350</td><td>.80</td></tr> <tr><td>1.230022</td><td>.85</td></tr> <tr><td>1.420376</td><td>.90</td></tr> <tr><td>1.669635</td><td>.95</td></tr> <tr><td>1.995582</td><td>1.00</td></tr> </tbody> </table>	EER (%)	λ	4.215600	0	3.161463	.10	2.774143	.15	2.589304	.20	2.204939	.25	2.122148	.30	1.893274	.35	1.864125	.40	1.838592	.45	1.705734	.50	1.573873	.55	1.341677	.60	1.416734	.65	1.316434	.70	1.108032	.75	1.128350	.80	1.230022	.85	1.420376	.90	1.669635	.95	1.995582	1.00
EER (%)	λ																																																																																					
4.113317	0																																																																																					
3.155340	.10																																																																																					
2.592261	.15																																																																																					
2.280809	.20																																																																																					
2.060116	.25																																																																																					
1.941748	.30																																																																																					
1.941748	.35																																																																																					
1.941748	.40																																																																																					
1.735719	.45																																																																																					
1.456311	.50																																																																																					
1.455334	.55																																																																																					
1.213592	.60																																																																																					
1.417476	.65																																																																																					
1.213592	.70																																																																																					
0.897981	.75																																																																																					
0.990061	.80																																																																																					
1.213592	.85																																																																																					
1.373920	.90																																																																																					
1.490751	.95																																																																																					
1.805546	1.00																																																																																					
EER (%)	λ																																																																																					
4.215600	0																																																																																					
3.161463	.10																																																																																					
2.774143	.15																																																																																					
2.589304	.20																																																																																					
2.204939	.25																																																																																					
2.122148	.30																																																																																					
1.893274	.35																																																																																					
1.864125	.40																																																																																					
1.838592	.45																																																																																					
1.705734	.50																																																																																					
1.573873	.55																																																																																					
1.341677	.60																																																																																					
1.416734	.65																																																																																					
1.316434	.70																																																																																					
1.108032	.75																																																																																					
1.128350	.80																																																																																					
1.230022	.85																																																																																					
1.420376	.90																																																																																					
1.669635	.95																																																																																					
1.995582	1.00																																																																																					

Anexo C: Resultados experimentales completos

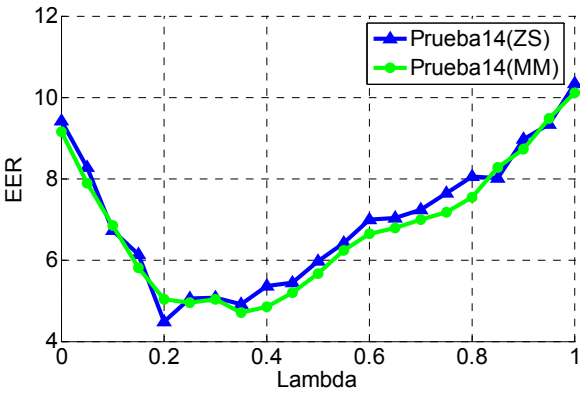
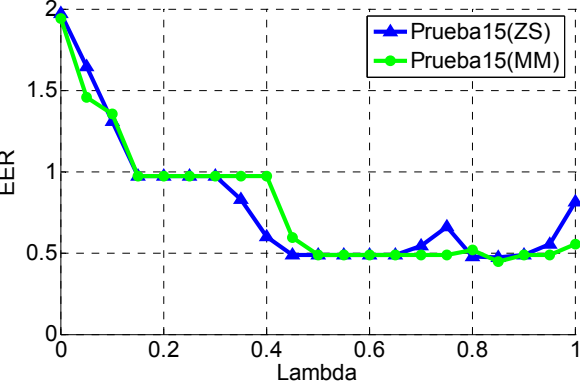
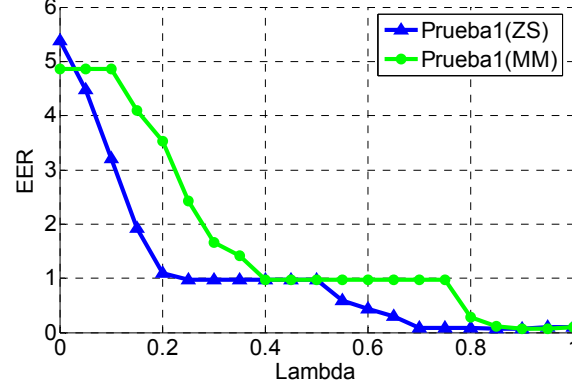
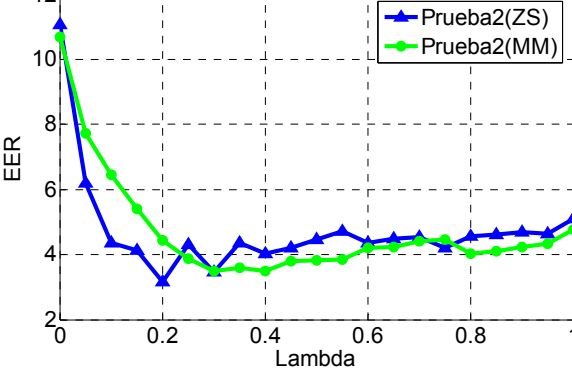
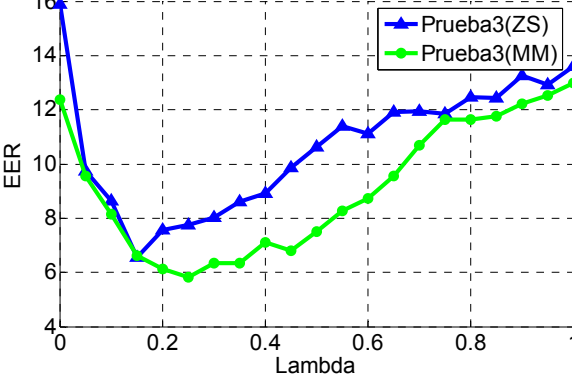
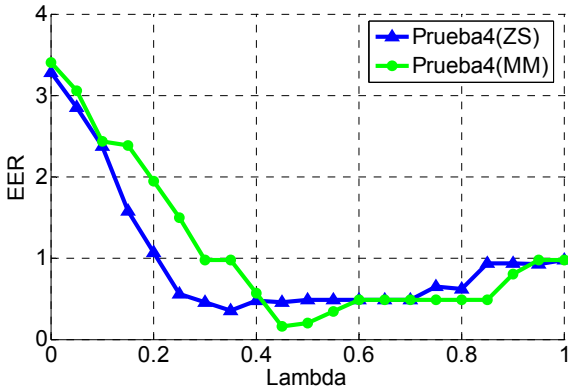
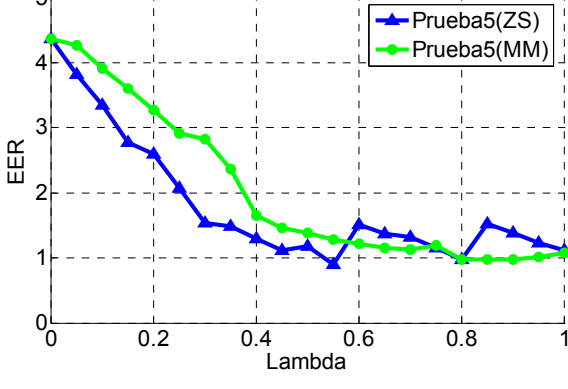
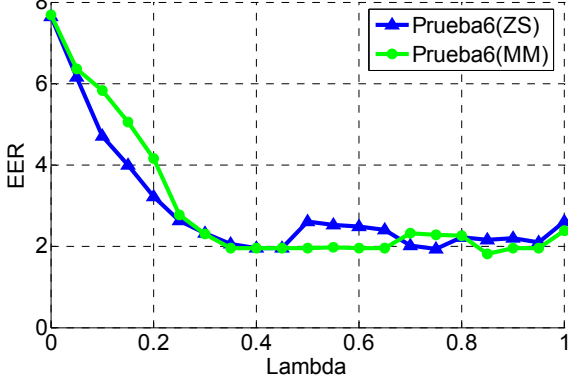
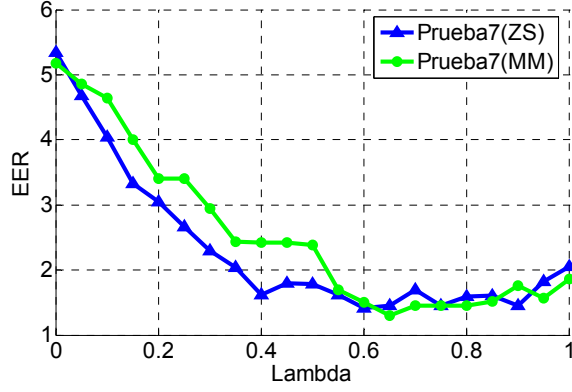
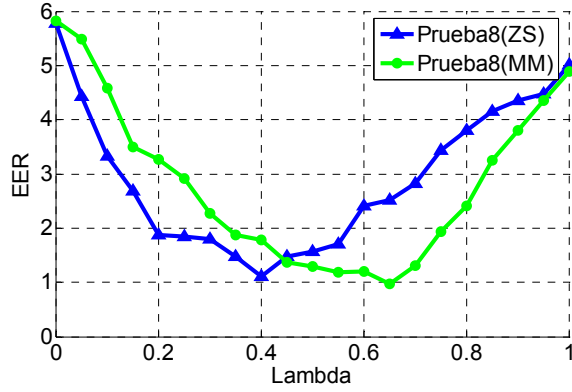
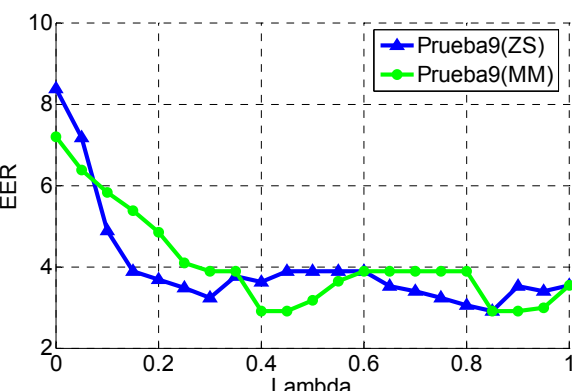
CURVA EFICIENCIA	Estandarización Z-score	Normalizacion Máx-mín																																																																																								
PRUEBA 14																																																																																										
	<table border="1"> <thead> <tr> <th>EER (%)</th> <th>λ</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>9.147248</td><td>0</td></tr> <tr><td>7.890538</td><td>.05</td></tr> <tr><td>6.840065</td><td>.10</td></tr> <tr><td>5.803506</td><td>.15</td></tr> <tr><td>5.026621</td><td>.20</td></tr> <tr><td>4.939820</td><td>.25</td></tr> <tr><td>5.032304</td><td>.30</td></tr> <tr><td>4.712435</td><td>.35</td></tr> <tr><td>4.854369</td><td>.40</td></tr> <tr><td>5.196015</td><td>.45</td></tr> <tr><td>5.670517</td><td>.50</td></tr> <tr><td>6.231655</td><td>.55</td></tr> <tr><td>6.649697</td><td>.60</td></tr> <tr><td>6.791762</td><td>.65</td></tr> <tr><td>6.985555</td><td>.70</td></tr> <tr><td>7.179657</td><td>.75</td></tr> <tr><td>7.541930</td><td>.80</td></tr> <tr><td>8.270509</td><td>.85</td></tr> <tr><td>8.732530</td><td>.90</td></tr> <tr><td>9.480175</td><td>.95</td></tr> <tr><td>10.109869</td><td>1.00</td></tr> </tbody> </table>	EER (%)	λ	9.147248	0	7.890538	.05	6.840065	.10	5.803506	.15	5.026621	.20	4.939820	.25	5.032304	.30	4.712435	.35	4.854369	.40	5.196015	.45	5.670517	.50	6.231655	.55	6.649697	.60	6.791762	.65	6.985555	.70	7.179657	.75	7.541930	.80	8.270509	.85	8.732530	.90	9.480175	.95	10.109869	1.00	<table border="1"> <thead> <tr> <th>EER (%)</th> <th>λ</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>9.424785</td><td>0</td></tr> <tr><td>8.280469</td><td>.05</td></tr> <tr><td>6.721434</td><td>.10</td></tr> <tr><td>6.140953</td><td>.15</td></tr> <tr><td>4.473487</td><td>.20</td></tr> <tr><td>5.047702</td><td>.25</td></tr> <tr><td>5.079556</td><td>.30</td></tr> <tr><td>4.903890</td><td>.35</td></tr> <tr><td>5.362452</td><td>.40</td></tr> <tr><td>5.429775</td><td>.45</td></tr> <tr><td>5.974737</td><td>.50</td></tr> <tr><td>6.418589</td><td>.55</td></tr> <tr><td>6.982900</td><td>.60</td></tr> <tr><td>7.029245</td><td>.65</td></tr> <tr><td>7.228648</td><td>.70</td></tr> <tr><td>7.647368</td><td>.75</td></tr> <tr><td>8.047529</td><td>.80</td></tr> <tr><td>8.002722</td><td>.85</td></tr> <tr><td>8.973112</td><td>.90</td></tr> <tr><td>9.333019</td><td>.95</td></tr> <tr><td>10.346606</td><td>1.00</td></tr> </tbody> </table>	EER (%)	λ	9.424785	0	8.280469	.05	6.721434	.10	6.140953	.15	4.473487	.20	5.047702	.25	5.079556	.30	4.903890	.35	5.362452	.40	5.429775	.45	5.974737	.50	6.418589	.55	6.982900	.60	7.029245	.65	7.228648	.70	7.647368	.75	8.047529	.80	8.002722	.85	8.973112	.90	9.333019	.95	10.346606	1.00
EER (%)	λ																																																																																									
9.147248	0																																																																																									
7.890538	.05																																																																																									
6.840065	.10																																																																																									
5.803506	.15																																																																																									
5.026621	.20																																																																																									
4.939820	.25																																																																																									
5.032304	.30																																																																																									
4.712435	.35																																																																																									
4.854369	.40																																																																																									
5.196015	.45																																																																																									
5.670517	.50																																																																																									
6.231655	.55																																																																																									
6.649697	.60																																																																																									
6.791762	.65																																																																																									
6.985555	.70																																																																																									
7.179657	.75																																																																																									
7.541930	.80																																																																																									
8.270509	.85																																																																																									
8.732530	.90																																																																																									
9.480175	.95																																																																																									
10.109869	1.00																																																																																									
EER (%)	λ																																																																																									
9.424785	0																																																																																									
8.280469	.05																																																																																									
6.721434	.10																																																																																									
6.140953	.15																																																																																									
4.473487	.20																																																																																									
5.047702	.25																																																																																									
5.079556	.30																																																																																									
4.903890	.35																																																																																									
5.362452	.40																																																																																									
5.429775	.45																																																																																									
5.974737	.50																																																																																									
6.418589	.55																																																																																									
6.982900	.60																																																																																									
7.029245	.65																																																																																									
7.228648	.70																																																																																									
7.647368	.75																																																																																									
8.047529	.80																																																																																									
8.002722	.85																																																																																									
8.973112	.90																																																																																									
9.333019	.95																																																																																									
10.346606	1.00																																																																																									
PRUEBA 15																																																																																										
	<table border="1"> <thead> <tr> <th>EER (%)</th> <th>λ</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>1.941748</td><td>0</td></tr> <tr><td>1.458051</td><td>.05</td></tr> <tr><td>1.352481</td><td>.10</td></tr> <tr><td>0.970874</td><td>.15</td></tr> <tr><td>0.970874</td><td>.20</td></tr> <tr><td>0.970874</td><td>.25</td></tr> <tr><td>0.970874</td><td>.30</td></tr> <tr><td>0.970874</td><td>.35</td></tr> <tr><td>0.970874</td><td>.40</td></tr> <tr><td>0.592065</td><td>.45</td></tr> <tr><td>0.485437</td><td>.50</td></tr> <tr><td>0.485437</td><td>.55</td></tr> <tr><td>0.485437</td><td>.60</td></tr> <tr><td>0.485437</td><td>.65</td></tr> <tr><td>0.485437</td><td>.70</td></tr> <tr><td>0.485437</td><td>.75</td></tr> <tr><td>0.518811</td><td>.80</td></tr> <tr><td>0.447190</td><td>.85</td></tr> <tr><td>0.485437</td><td>.90</td></tr> <tr><td>0.485437</td><td>.95</td></tr> <tr><td>0.554785</td><td>1.00</td></tr> </tbody> </table>	EER (%)	λ	1.941748	0	1.458051	.05	1.352481	.10	0.970874	.15	0.970874	.20	0.970874	.25	0.970874	.30	0.970874	.35	0.970874	.40	0.592065	.45	0.485437	.50	0.485437	.55	0.485437	.60	0.485437	.65	0.485437	.70	0.485437	.75	0.518811	.80	0.447190	.85	0.485437	.90	0.485437	.95	0.554785	1.00	<table border="1"> <thead> <tr> <th>EER (%)</th> <th>λ</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>1.972339</td><td>0</td></tr> <tr><td>1.645809</td><td>.05</td></tr> <tr><td>1.308922</td><td>.10</td></tr> <tr><td>0.970874</td><td>.15</td></tr> <tr><td>0.970874</td><td>.20</td></tr> <tr><td>0.970874</td><td>.25</td></tr> <tr><td>0.970874</td><td>.30</td></tr> <tr><td>0.830213</td><td>.35</td></tr> <tr><td>0.597769</td><td>.40</td></tr> <tr><td>0.485437</td><td>.45</td></tr> <tr><td>0.485437</td><td>.50</td></tr> <tr><td>0.485437</td><td>.55</td></tr> <tr><td>0.485437</td><td>.60</td></tr> <tr><td>0.485437</td><td>.65</td></tr> <tr><td>0.543689</td><td>.70</td></tr> <tr><td>0.661475</td><td>.75</td></tr> <tr><td>0.477876</td><td>.80</td></tr> <tr><td>0.470686</td><td>.85</td></tr> <tr><td>0.485437</td><td>.90</td></tr> <tr><td>0.555184</td><td>.95</td></tr> <tr><td>0.811663</td><td>1.00</td></tr> </tbody> </table>	EER (%)	λ	1.972339	0	1.645809	.05	1.308922	.10	0.970874	.15	0.970874	.20	0.970874	.25	0.970874	.30	0.830213	.35	0.597769	.40	0.485437	.45	0.485437	.50	0.485437	.55	0.485437	.60	0.485437	.65	0.543689	.70	0.661475	.75	0.477876	.80	0.470686	.85	0.485437	.90	0.555184	.95	0.811663	1.00
EER (%)	λ																																																																																									
1.941748	0																																																																																									
1.458051	.05																																																																																									
1.352481	.10																																																																																									
0.970874	.15																																																																																									
0.970874	.20																																																																																									
0.970874	.25																																																																																									
0.970874	.30																																																																																									
0.970874	.35																																																																																									
0.970874	.40																																																																																									
0.592065	.45																																																																																									
0.485437	.50																																																																																									
0.485437	.55																																																																																									
0.485437	.60																																																																																									
0.485437	.65																																																																																									
0.485437	.70																																																																																									
0.485437	.75																																																																																									
0.518811	.80																																																																																									
0.447190	.85																																																																																									
0.485437	.90																																																																																									
0.485437	.95																																																																																									
0.554785	1.00																																																																																									
EER (%)	λ																																																																																									
1.972339	0																																																																																									
1.645809	.05																																																																																									
1.308922	.10																																																																																									
0.970874	.15																																																																																									
0.970874	.20																																																																																									
0.970874	.25																																																																																									
0.970874	.30																																																																																									
0.830213	.35																																																																																									
0.597769	.40																																																																																									
0.485437	.45																																																																																									
0.485437	.50																																																																																									
0.485437	.55																																																																																									
0.485437	.60																																																																																									
0.485437	.65																																																																																									
0.543689	.70																																																																																									
0.661475	.75																																																																																									
0.477876	.80																																																																																									
0.470686	.85																																																																																									
0.485437	.90																																																																																									
0.555184	.95																																																																																									
0.811663	1.00																																																																																									

Tabla C. 8. Resultados Verificador 2.5D+3D(rango + mallado), siendo el tamaño de la imagen de rango considerada 200x200 píxeles y la función de creación de tipo exponencial. Para cada prueba se presentan de izquierda a derecha: curvas de eficiencia (EER (%) vs. λ) correspondientes a la normalización máximo-mínimo (verde) y estandarización z-score (azul); y datos numéricos correspondientes.

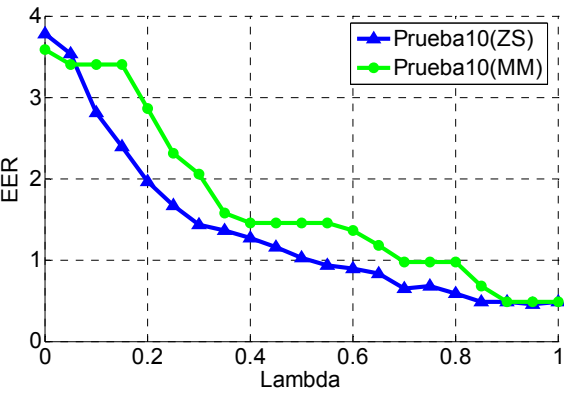
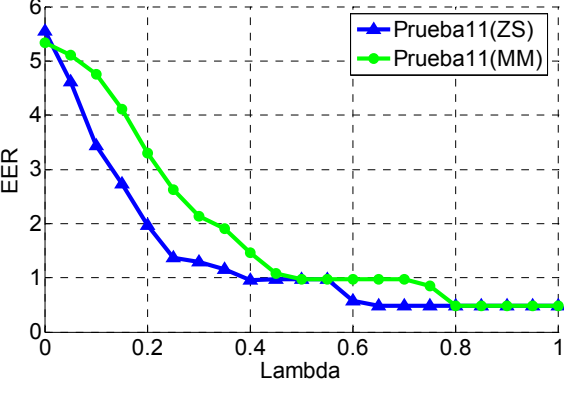
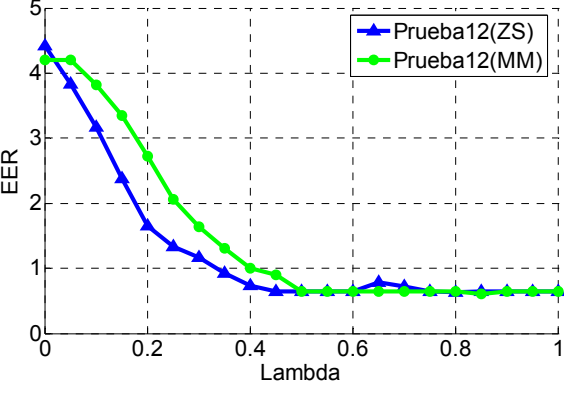
CURVA EFICIENCIA	Estandarización Z-score	Normalización Máx-mín																																																																												
PRUEBA 1																																																																														
	<table border="1"> <thead> <tr> <th>EER (%)</th> <th>λ</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>4.854369</td><td>0</td></tr> <tr><td>4.098736</td><td>.15</td></tr> <tr><td>3.525019</td><td>.20</td></tr> <tr><td>2.432442</td><td>.25</td></tr> <tr><td>1.667759</td><td>.30</td></tr> <tr><td>1.409932</td><td>.35</td></tr> <tr><td>0.970874</td><td>.40</td></tr> <tr><td>0.970874</td><td>.45</td></tr> <tr><td>0.970874</td><td>.50</td></tr> <tr><td>0.970874</td><td>.55</td></tr> <tr><td>0.970874</td><td>.60</td></tr> <tr><td>0.970874</td><td>.65</td></tr> <tr><td>0.970874</td><td>.70</td></tr> <tr><td>0.970874</td><td>.75</td></tr> <tr><td>0.280831</td><td>.80</td></tr> <tr><td>0.110957</td><td>.85</td></tr> <tr><td>0.074683</td><td>.90</td></tr> <tr><td>0.093354</td><td>1.00</td></tr> </tbody> </table>	EER (%)	λ	4.854369	0	4.098736	.15	3.525019	.20	2.432442	.25	1.667759	.30	1.409932	.35	0.970874	.40	0.970874	.45	0.970874	.50	0.970874	.55	0.970874	.60	0.970874	.65	0.970874	.70	0.970874	.75	0.280831	.80	0.110957	.85	0.074683	.90	0.093354	1.00	<table border="1"> <thead> <tr> <th>EER (%)</th> <th>λ</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>5.383580</td><td>0</td></tr> <tr><td>1.923184</td><td>.15</td></tr> <tr><td>1.097816</td><td>.20</td></tr> <tr><td>0.970874</td><td>.25</td></tr> <tr><td>0.970874</td><td>.30</td></tr> <tr><td>0.970874</td><td>.35</td></tr> <tr><td>0.970874</td><td>.40</td></tr> <tr><td>0.970874</td><td>.45</td></tr> <tr><td>0.970874</td><td>.50</td></tr> <tr><td>0.595982</td><td>.55</td></tr> <tr><td>0.430134</td><td>.60</td></tr> <tr><td>0.294204</td><td>.65</td></tr> <tr><td>0.084018</td><td>.70</td></tr> <tr><td>0.083217</td><td>.75</td></tr> <tr><td>0.083217</td><td>.80</td></tr> <tr><td>0.065982</td><td>.85</td></tr> <tr><td>0.065982</td><td>.90</td></tr> <tr><td>0.093354</td><td>1.00</td></tr> </tbody> </table>	EER (%)	λ	5.383580	0	1.923184	.15	1.097816	.20	0.970874	.25	0.970874	.30	0.970874	.35	0.970874	.40	0.970874	.45	0.970874	.50	0.595982	.55	0.430134	.60	0.294204	.65	0.084018	.70	0.083217	.75	0.083217	.80	0.065982	.85	0.065982	.90	0.093354	1.00
EER (%)	λ																																																																													
4.854369	0																																																																													
4.098736	.15																																																																													
3.525019	.20																																																																													
2.432442	.25																																																																													
1.667759	.30																																																																													
1.409932	.35																																																																													
0.970874	.40																																																																													
0.970874	.45																																																																													
0.970874	.50																																																																													
0.970874	.55																																																																													
0.970874	.60																																																																													
0.970874	.65																																																																													
0.970874	.70																																																																													
0.970874	.75																																																																													
0.280831	.80																																																																													
0.110957	.85																																																																													
0.074683	.90																																																																													
0.093354	1.00																																																																													
EER (%)	λ																																																																													
5.383580	0																																																																													
1.923184	.15																																																																													
1.097816	.20																																																																													
0.970874	.25																																																																													
0.970874	.30																																																																													
0.970874	.35																																																																													
0.970874	.40																																																																													
0.970874	.45																																																																													
0.970874	.50																																																																													
0.595982	.55																																																																													
0.430134	.60																																																																													
0.294204	.65																																																																													
0.084018	.70																																																																													
0.083217	.75																																																																													
0.083217	.80																																																																													
0.065982	.85																																																																													
0.065982	.90																																																																													
0.093354	1.00																																																																													
PRUEBA 2																																																																														
	<table border="1"> <thead> <tr> <th>EER (%)</th> <th>λ</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>10.679611</td><td>0</td></tr> <tr><td>5.400817</td><td>.15</td></tr> <tr><td>4.444782</td><td>.20</td></tr> <tr><td>3.883495</td><td>.25</td></tr> <tr><td>3.497352</td><td>.30</td></tr> <tr><td>3.589459</td><td>.35</td></tr> <tr><td>3.498400</td><td>.40</td></tr> <tr><td>3.803423</td><td>.45</td></tr> <tr><td>3.817859</td><td>.50</td></tr> <tr><td>3.842005</td><td>.55</td></tr> <tr><td>4.210984</td><td>.60</td></tr> <tr><td>4.220933</td><td>.65</td></tr> <tr><td>4.410780</td><td>.70</td></tr> <tr><td>4.472658</td><td>.75</td></tr> <tr><td>4.016492</td><td>.80</td></tr> <tr><td>4.225769</td><td>.90</td></tr> <tr><td>4.763207</td><td>1.00</td></tr> </tbody> </table>	EER (%)	λ	10.679611	0	5.400817	.15	4.444782	.20	3.883495	.25	3.497352	.30	3.589459	.35	3.498400	.40	3.803423	.45	3.817859	.50	3.842005	.55	4.210984	.60	4.220933	.65	4.410780	.70	4.472658	.75	4.016492	.80	4.225769	.90	4.763207	1.00	<table border="1"> <thead> <tr> <th>EER (%)</th> <th>λ</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>11.078792</td><td>0</td></tr> <tr><td>4.134186</td><td>.15</td></tr> <tr><td>3.170960</td><td>.20</td></tr> <tr><td>4.310830</td><td>.25</td></tr> <tr><td>3.460107</td><td>.30</td></tr> <tr><td>4.354701</td><td>.35</td></tr> <tr><td>4.037918</td><td>.40</td></tr> <tr><td>4.219200</td><td>.45</td></tr> <tr><td>4.455831</td><td>.50</td></tr> <tr><td>4.727273</td><td>.55</td></tr> <tr><td>4.356224</td><td>.60</td></tr> <tr><td>4.494009</td><td>.65</td></tr> <tr><td>4.532395</td><td>.70</td></tr> <tr><td>4.201042</td><td>.75</td></tr> <tr><td>4.554424</td><td>.80</td></tr> <tr><td>4.693354</td><td>.90</td></tr> <tr><td>5.100299</td><td>1.00</td></tr> </tbody> </table>	EER (%)	λ	11.078792	0	4.134186	.15	3.170960	.20	4.310830	.25	3.460107	.30	4.354701	.35	4.037918	.40	4.219200	.45	4.455831	.50	4.727273	.55	4.356224	.60	4.494009	.65	4.532395	.70	4.201042	.75	4.554424	.80	4.693354	.90	5.100299	1.00				
EER (%)	λ																																																																													
10.679611	0																																																																													
5.400817	.15																																																																													
4.444782	.20																																																																													
3.883495	.25																																																																													
3.497352	.30																																																																													
3.589459	.35																																																																													
3.498400	.40																																																																													
3.803423	.45																																																																													
3.817859	.50																																																																													
3.842005	.55																																																																													
4.210984	.60																																																																													
4.220933	.65																																																																													
4.410780	.70																																																																													
4.472658	.75																																																																													
4.016492	.80																																																																													
4.225769	.90																																																																													
4.763207	1.00																																																																													
EER (%)	λ																																																																													
11.078792	0																																																																													
4.134186	.15																																																																													
3.170960	.20																																																																													
4.310830	.25																																																																													
3.460107	.30																																																																													
4.354701	.35																																																																													
4.037918	.40																																																																													
4.219200	.45																																																																													
4.455831	.50																																																																													
4.727273	.55																																																																													
4.356224	.60																																																																													
4.494009	.65																																																																													
4.532395	.70																																																																													
4.201042	.75																																																																													
4.554424	.80																																																																													
4.693354	.90																																																																													
5.100299	1.00																																																																													
PRUEBA 3																																																																														
	<table border="1"> <thead> <tr> <th>EER (%)</th> <th>λ</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>12.380049</td><td>0</td></tr> <tr><td>9.555711</td><td>.05</td></tr> <tr><td>8.147781</td><td>.10</td></tr> <tr><td>6.627181</td><td>.15</td></tr> <tr><td>6.121128</td><td>.20</td></tr> <tr><td>5.825243</td><td>.25</td></tr> <tr><td>6.331785</td><td>.30</td></tr> <tr><td>6.340588</td><td>.35</td></tr> <tr><td>7.108051</td><td>.40</td></tr> <tr><td>6.796116</td><td>.45</td></tr> <tr><td>7.514375</td><td>.50</td></tr> <tr><td>8.255902</td><td>.55</td></tr> <tr><td>8.737864</td><td>.60</td></tr> <tr><td>9.551129</td><td>.65</td></tr> <tr><td>11.761255</td><td>.85</td></tr> <tr><td>12.213832</td><td>.90</td></tr> <tr><td>12.523010</td><td>.95</td></tr> <tr><td>12.992477</td><td>1.00</td></tr> </tbody> </table>	EER (%)	λ	12.380049	0	9.555711	.05	8.147781	.10	6.627181	.15	6.121128	.20	5.825243	.25	6.331785	.30	6.340588	.35	7.108051	.40	6.796116	.45	7.514375	.50	8.255902	.55	8.737864	.60	9.551129	.65	11.761255	.85	12.213832	.90	12.523010	.95	12.992477	1.00	<table border="1"> <thead> <tr> <th>EER (%)</th> <th>λ</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>15.898839</td><td>0</td></tr> <tr><td>9.742687</td><td>.05</td></tr> <tr><td>8.646488</td><td>.10</td></tr> <tr><td>6.547070</td><td>.15</td></tr> <tr><td>7.566434</td><td>.20</td></tr> <tr><td>7.751381</td><td>.25</td></tr> <tr><td>8.029728</td><td>.30</td></tr> <tr><td>8.612564</td><td>.35</td></tr> <tr><td>8.921010</td><td>.40</td></tr> <tr><td>9.856927</td><td>.45</td></tr> <tr><td>10.617237</td><td>.50</td></tr> <tr><td>11.401688</td><td>.55</td></tr> <tr><td>11.129793</td><td>.60</td></tr> <tr><td>11.898540</td><td>.65</td></tr> <tr><td>12.437473</td><td>.85</td></tr> <tr><td>13.249780</td><td>.90</td></tr> <tr><td>12.923660</td><td>.95</td></tr> <tr><td>13.61171</td><td>1.00</td></tr> </tbody> </table>	EER (%)	λ	15.898839	0	9.742687	.05	8.646488	.10	6.547070	.15	7.566434	.20	7.751381	.25	8.029728	.30	8.612564	.35	8.921010	.40	9.856927	.45	10.617237	.50	11.401688	.55	11.129793	.60	11.898540	.65	12.437473	.85	13.249780	.90	12.923660	.95	13.61171	1.00
EER (%)	λ																																																																													
12.380049	0																																																																													
9.555711	.05																																																																													
8.147781	.10																																																																													
6.627181	.15																																																																													
6.121128	.20																																																																													
5.825243	.25																																																																													
6.331785	.30																																																																													
6.340588	.35																																																																													
7.108051	.40																																																																													
6.796116	.45																																																																													
7.514375	.50																																																																													
8.255902	.55																																																																													
8.737864	.60																																																																													
9.551129	.65																																																																													
11.761255	.85																																																																													
12.213832	.90																																																																													
12.523010	.95																																																																													
12.992477	1.00																																																																													
EER (%)	λ																																																																													
15.898839	0																																																																													
9.742687	.05																																																																													
8.646488	.10																																																																													
6.547070	.15																																																																													
7.566434	.20																																																																													
7.751381	.25																																																																													
8.029728	.30																																																																													
8.612564	.35																																																																													
8.921010	.40																																																																													
9.856927	.45																																																																													
10.617237	.50																																																																													
11.401688	.55																																																																													
11.129793	.60																																																																													
11.898540	.65																																																																													
12.437473	.85																																																																													
13.249780	.90																																																																													
12.923660	.95																																																																													
13.61171	1.00																																																																													

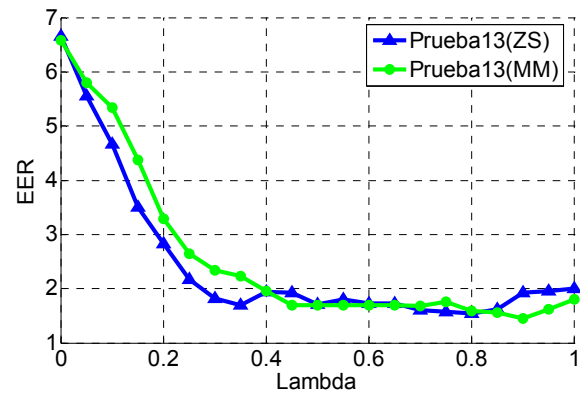
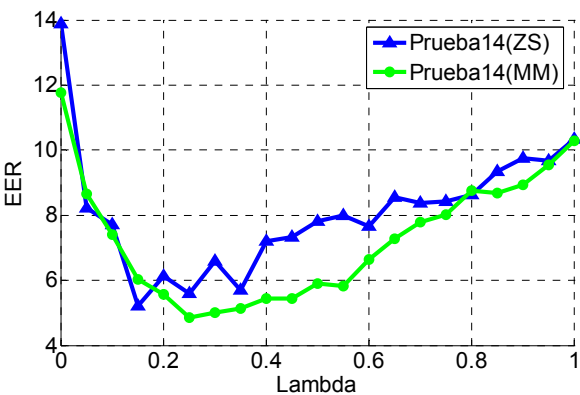
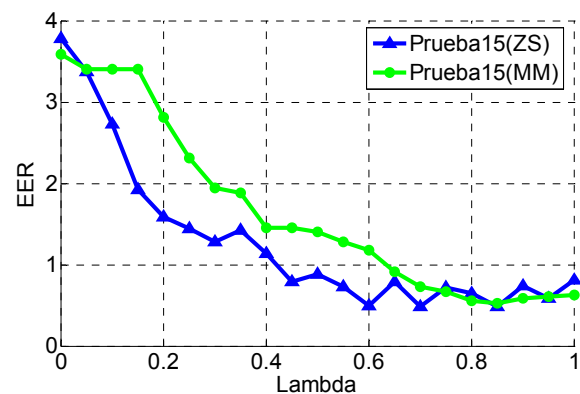
Anexo C: Resultados experimentales completos

CURVA EFICIENCIA	Estandarización Z-score	Normalización Máx-mín																																																																																								
PRUEBA 4																																																																																										
	<table border="1"> <thead> <tr> <th>EER (%)</th> <th>λ</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>3.398058</td><td>0</td></tr> <tr><td>3.052616</td><td>.05</td></tr> <tr><td>2.430977</td><td>.10</td></tr> <tr><td>2.387023</td><td>.15</td></tr> <tr><td>1.941748</td><td>.20</td></tr> <tr><td>1.492148</td><td>.25</td></tr> <tr><td>0.970874</td><td>.30</td></tr> <tr><td>0.970874</td><td>.35</td></tr> <tr><td>0.566658</td><td>.40</td></tr> <tr><td>0.160328</td><td>.45</td></tr> <tr><td>0.194175</td><td>.50</td></tr> <tr><td>0.338829</td><td>.55</td></tr> <tr><td>0.485437</td><td>.60</td></tr> <tr><td>0.485437</td><td>.65</td></tr> <tr><td>0.485437</td><td>.70</td></tr> <tr><td>0.485437</td><td>.75</td></tr> <tr><td>0.485437</td><td>.80</td></tr> <tr><td>0.485437</td><td>.85</td></tr> <tr><td>0.801838</td><td>.90</td></tr> <tr><td>0.970874</td><td>.95</td></tr> <tr><td>0.970874</td><td>1.00</td></tr> </tbody> </table>	EER (%)	λ	3.398058	0	3.052616	.05	2.430977	.10	2.387023	.15	1.941748	.20	1.492148	.25	0.970874	.30	0.970874	.35	0.566658	.40	0.160328	.45	0.194175	.50	0.338829	.55	0.485437	.60	0.485437	.65	0.485437	.70	0.485437	.75	0.485437	.80	0.485437	.85	0.801838	.90	0.970874	.95	0.970874	1.00	<table border="1"> <thead> <tr> <th>EER (%)</th> <th>λ</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>3.279761</td><td>0</td></tr> <tr><td>2.850854</td><td>.05</td></tr> <tr><td>2.370040</td><td>.10</td></tr> <tr><td>1.575233</td><td>.15</td></tr> <tr><td>1.067016</td><td>.20</td></tr> <tr><td>0.560645</td><td>.25</td></tr> <tr><td>0.453986</td><td>.30</td></tr> <tr><td>0.347436</td><td>.35</td></tr> <tr><td>0.474440</td><td>.40</td></tr> <tr><td>0.452649</td><td>.45</td></tr> <tr><td>0.485437</td><td>.50</td></tr> <tr><td>0.485437</td><td>.55</td></tr> <tr><td>0.485437</td><td>.60</td></tr> <tr><td>0.485437</td><td>.65</td></tr> <tr><td>0.485437</td><td>.70</td></tr> <tr><td>0.643254</td><td>.75</td></tr> <tr><td>0.618225</td><td>.80</td></tr> <tr><td>0.936243</td><td>.85</td></tr> <tr><td>0.930092</td><td>.90</td></tr> <tr><td>0.928041</td><td>.95</td></tr> <tr><td>0.970874</td><td>1.00</td></tr> </tbody> </table>	EER (%)	λ	3.279761	0	2.850854	.05	2.370040	.10	1.575233	.15	1.067016	.20	0.560645	.25	0.453986	.30	0.347436	.35	0.474440	.40	0.452649	.45	0.485437	.50	0.485437	.55	0.485437	.60	0.485437	.65	0.485437	.70	0.643254	.75	0.618225	.80	0.936243	.85	0.930092	.90	0.928041	.95	0.970874	1.00
EER (%)	λ																																																																																									
3.398058	0																																																																																									
3.052616	.05																																																																																									
2.430977	.10																																																																																									
2.387023	.15																																																																																									
1.941748	.20																																																																																									
1.492148	.25																																																																																									
0.970874	.30																																																																																									
0.970874	.35																																																																																									
0.566658	.40																																																																																									
0.160328	.45																																																																																									
0.194175	.50																																																																																									
0.338829	.55																																																																																									
0.485437	.60																																																																																									
0.485437	.65																																																																																									
0.485437	.70																																																																																									
0.485437	.75																																																																																									
0.485437	.80																																																																																									
0.485437	.85																																																																																									
0.801838	.90																																																																																									
0.970874	.95																																																																																									
0.970874	1.00																																																																																									
EER (%)	λ																																																																																									
3.279761	0																																																																																									
2.850854	.05																																																																																									
2.370040	.10																																																																																									
1.575233	.15																																																																																									
1.067016	.20																																																																																									
0.560645	.25																																																																																									
0.453986	.30																																																																																									
0.347436	.35																																																																																									
0.474440	.40																																																																																									
0.452649	.45																																																																																									
0.485437	.50																																																																																									
0.485437	.55																																																																																									
0.485437	.60																																																																																									
0.485437	.65																																																																																									
0.485437	.70																																																																																									
0.643254	.75																																																																																									
0.618225	.80																																																																																									
0.936243	.85																																																																																									
0.930092	.90																																																																																									
0.928041	.95																																																																																									
0.970874	1.00																																																																																									
PRUEBA 5																																																																																										
	<table border="1"> <thead> <tr> <th>EER (%)</th> <th>λ</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>4.368932</td><td>0</td></tr> <tr><td>4.265232</td><td>.05</td></tr> <tr><td>3.905777</td><td>.10</td></tr> <tr><td>3.600461</td><td>.15</td></tr> <tr><td>3.266610</td><td>.20</td></tr> <tr><td>2.912621</td><td>.25</td></tr> <tr><td>2.824769</td><td>.30</td></tr> <tr><td>2.364011</td><td>.35</td></tr> <tr><td>1.655465</td><td>.40</td></tr> <tr><td>1.456311</td><td>.45</td></tr> <tr><td>1.379257</td><td>.50</td></tr> <tr><td>1.282463</td><td>.55</td></tr> <tr><td>1.216516</td><td>.60</td></tr> <tr><td>1.157580</td><td>.65</td></tr> <tr><td>1.125672</td><td>.70</td></tr> <tr><td>1.193277</td><td>.75</td></tr> <tr><td>0.970874</td><td>.80</td></tr> <tr><td>0.970874</td><td>.85</td></tr> <tr><td>0.974538</td><td>.90</td></tr> <tr><td>1.079961</td><td>1.00</td></tr> </tbody> </table>	EER (%)	λ	4.368932	0	4.265232	.05	3.905777	.10	3.600461	.15	3.266610	.20	2.912621	.25	2.824769	.30	2.364011	.35	1.655465	.40	1.456311	.45	1.379257	.50	1.282463	.55	1.216516	.60	1.157580	.65	1.125672	.70	1.193277	.75	0.970874	.80	0.970874	.85	0.974538	.90	1.079961	1.00	<table border="1"> <thead> <tr> <th>EER (%)</th> <th>λ</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>4.368932</td><td>0</td></tr> <tr><td>3.815973</td><td>.05</td></tr> <tr><td>3.351654</td><td>.10</td></tr> <tr><td>2.768230</td><td>.15</td></tr> <tr><td>2.594341</td><td>.20</td></tr> <tr><td>2.067086</td><td>.25</td></tr> <tr><td>1.534467</td><td>.30</td></tr> <tr><td>1.486494</td><td>.35</td></tr> <tr><td>1.299102</td><td>.40</td></tr> <tr><td>1.118954</td><td>.45</td></tr> <tr><td>1.180233</td><td>.50</td></tr> <tr><td>0.897323</td><td>.55</td></tr> <tr><td>1.505400</td><td>.60</td></tr> <tr><td>1.373966</td><td>.65</td></tr> <tr><td>1.319596</td><td>.70</td></tr> <tr><td>1.150485</td><td>.75</td></tr> <tr><td>0.970874</td><td>.80</td></tr> <tr><td>1.527086</td><td>.85</td></tr> <tr><td>1.381159</td><td>.90</td></tr> <tr><td>1.116505</td><td>1.00</td></tr> </tbody> </table>	EER (%)	λ	4.368932	0	3.815973	.05	3.351654	.10	2.768230	.15	2.594341	.20	2.067086	.25	1.534467	.30	1.486494	.35	1.299102	.40	1.118954	.45	1.180233	.50	0.897323	.55	1.505400	.60	1.373966	.65	1.319596	.70	1.150485	.75	0.970874	.80	1.527086	.85	1.381159	.90	1.116505	1.00				
EER (%)	λ																																																																																									
4.368932	0																																																																																									
4.265232	.05																																																																																									
3.905777	.10																																																																																									
3.600461	.15																																																																																									
3.266610	.20																																																																																									
2.912621	.25																																																																																									
2.824769	.30																																																																																									
2.364011	.35																																																																																									
1.655465	.40																																																																																									
1.456311	.45																																																																																									
1.379257	.50																																																																																									
1.282463	.55																																																																																									
1.216516	.60																																																																																									
1.157580	.65																																																																																									
1.125672	.70																																																																																									
1.193277	.75																																																																																									
0.970874	.80																																																																																									
0.970874	.85																																																																																									
0.974538	.90																																																																																									
1.079961	1.00																																																																																									
EER (%)	λ																																																																																									
4.368932	0																																																																																									
3.815973	.05																																																																																									
3.351654	.10																																																																																									
2.768230	.15																																																																																									
2.594341	.20																																																																																									
2.067086	.25																																																																																									
1.534467	.30																																																																																									
1.486494	.35																																																																																									
1.299102	.40																																																																																									
1.118954	.45																																																																																									
1.180233	.50																																																																																									
0.897323	.55																																																																																									
1.505400	.60																																																																																									
1.373966	.65																																																																																									
1.319596	.70																																																																																									
1.150485	.75																																																																																									
0.970874	.80																																																																																									
1.527086	.85																																																																																									
1.381159	.90																																																																																									
1.116505	1.00																																																																																									
PRUEBA 6																																																																																										
	<table border="1"> <thead> <tr> <th>EER (%)</th> <th>λ</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>7.689427</td><td>0</td></tr> <tr><td>6.362040</td><td>.05</td></tr> <tr><td>5.825243</td><td>.10</td></tr> <tr><td>5.060012</td><td>.15</td></tr> <tr><td>4.150432</td><td>.20</td></tr> <tr><td>2.772998</td><td>.25</td></tr> <tr><td>2.299438</td><td>.30</td></tr> <tr><td>1.941748</td><td>.35</td></tr> <tr><td>1.941748</td><td>.40</td></tr> <tr><td>1.941748</td><td>.45</td></tr> <tr><td>1.941748</td><td>.50</td></tr> <tr><td>1.978091</td><td>.55</td></tr> <tr><td>1.941748</td><td>.60</td></tr> <tr><td>1.941748</td><td>.65</td></tr> <tr><td>2.308205</td><td>.70</td></tr> <tr><td>2.273504</td><td>.75</td></tr> <tr><td>2.261984</td><td>.80</td></tr> <tr><td>1.941748</td><td>.90</td></tr> <tr><td>1.941748</td><td>.95</td></tr> <tr><td>2.378895</td><td>1.00</td></tr> </tbody> </table>	EER (%)	λ	7.689427	0	6.362040	.05	5.825243	.10	5.060012	.15	4.150432	.20	2.772998	.25	2.299438	.30	1.941748	.35	1.941748	.40	1.941748	.45	1.941748	.50	1.978091	.55	1.941748	.60	1.941748	.65	2.308205	.70	2.273504	.75	2.261984	.80	1.941748	.90	1.941748	.95	2.378895	1.00	<table border="1"> <thead> <tr> <th>EER (%)</th> <th>λ</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>7.652032</td><td>0</td></tr> <tr><td>6.151318</td><td>.05</td></tr> <tr><td>4.702526</td><td>.10</td></tr> <tr><td>3.985900</td><td>.15</td></tr> <tr><td>3.204535</td><td>.20</td></tr> <tr><td>2.612601</td><td>.25</td></tr> <tr><td>2.318828</td><td>.30</td></tr> <tr><td>2.055016</td><td>.35</td></tr> <tr><td>1.941748</td><td>.40</td></tr> <tr><td>1.941748</td><td>.45</td></tr> <tr><td>2.599607</td><td>.50</td></tr> <tr><td>2.529487</td><td>.55</td></tr> <tr><td>2.480878</td><td>.60</td></tr> <tr><td>2.395826</td><td>.65</td></tr> <tr><td>2.007034</td><td>.70</td></tr> <tr><td>1.937211</td><td>.75</td></tr> <tr><td>2.216403</td><td>.80</td></tr> <tr><td>2.188402</td><td>.90</td></tr> <tr><td>2.092401</td><td>.95</td></tr> <tr><td>2.592804</td><td>1.00</td></tr> </tbody> </table>	EER (%)	λ	7.652032	0	6.151318	.05	4.702526	.10	3.985900	.15	3.204535	.20	2.612601	.25	2.318828	.30	2.055016	.35	1.941748	.40	1.941748	.45	2.599607	.50	2.529487	.55	2.480878	.60	2.395826	.65	2.007034	.70	1.937211	.75	2.216403	.80	2.188402	.90	2.092401	.95	2.592804	1.00				
EER (%)	λ																																																																																									
7.689427	0																																																																																									
6.362040	.05																																																																																									
5.825243	.10																																																																																									
5.060012	.15																																																																																									
4.150432	.20																																																																																									
2.772998	.25																																																																																									
2.299438	.30																																																																																									
1.941748	.35																																																																																									
1.941748	.40																																																																																									
1.941748	.45																																																																																									
1.941748	.50																																																																																									
1.978091	.55																																																																																									
1.941748	.60																																																																																									
1.941748	.65																																																																																									
2.308205	.70																																																																																									
2.273504	.75																																																																																									
2.261984	.80																																																																																									
1.941748	.90																																																																																									
1.941748	.95																																																																																									
2.378895	1.00																																																																																									
EER (%)	λ																																																																																									
7.652032	0																																																																																									
6.151318	.05																																																																																									
4.702526	.10																																																																																									
3.985900	.15																																																																																									
3.204535	.20																																																																																									
2.612601	.25																																																																																									
2.318828	.30																																																																																									
2.055016	.35																																																																																									
1.941748	.40																																																																																									
1.941748	.45																																																																																									
2.599607	.50																																																																																									
2.529487	.55																																																																																									
2.480878	.60																																																																																									
2.395826	.65																																																																																									
2.007034	.70																																																																																									
1.937211	.75																																																																																									
2.216403	.80																																																																																									
2.188402	.90																																																																																									
2.092401	.95																																																																																									
2.592804	1.00																																																																																									

CURVA EFICIENCIA	Estandarización Z-score	Normalización Máx-mín																																																																																								
PRUEBA 7																																																																																										
	<table border="1"> <thead> <tr> <th>EER (%)</th> <th>λ</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>5.174160</td><td>0</td></tr> <tr><td>4.854369</td><td>.05</td></tr> <tr><td>4.643568</td><td>.10</td></tr> <tr><td>4.006150</td><td>.15</td></tr> <tr><td>3.399849</td><td>.20</td></tr> <tr><td>3.398058</td><td>.25</td></tr> <tr><td>2.943067</td><td>.30</td></tr> <tr><td>2.433057</td><td>.35</td></tr> <tr><td>2.427185</td><td>.40</td></tr> <tr><td>2.427185</td><td>.45</td></tr> <tr><td>2.386331</td><td>.50</td></tr> <tr><td>1.692832</td><td>.55</td></tr> <tr><td>1.505558</td><td>.60</td></tr> <tr><td>1.297253</td><td>.65</td></tr> <tr><td>1.456311</td><td>.70</td></tr> <tr><td>1.456311</td><td>.75</td></tr> <tr><td>1.456311</td><td>.80</td></tr> <tr><td>1.514938</td><td>.85</td></tr> <tr><td>1.764722</td><td>.90</td></tr> <tr><td>1.571343</td><td>.95</td></tr> <tr><td>1.864474</td><td>1.00</td></tr> </tbody> </table>	EER (%)	λ	5.174160	0	4.854369	.05	4.643568	.10	4.006150	.15	3.399849	.20	3.398058	.25	2.943067	.30	2.433057	.35	2.427185	.40	2.427185	.45	2.386331	.50	1.692832	.55	1.505558	.60	1.297253	.65	1.456311	.70	1.456311	.75	1.456311	.80	1.514938	.85	1.764722	.90	1.571343	.95	1.864474	1.00	<table border="1"> <thead> <tr> <th>EER (%)</th> <th>λ</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>5.348216</td><td>0</td></tr> <tr><td>4.683437</td><td>.05</td></tr> <tr><td>4.046746</td><td>.10</td></tr> <tr><td>3.324570</td><td>.15</td></tr> <tr><td>3.049581</td><td>.20</td></tr> <tr><td>2.669027</td><td>.25</td></tr> <tr><td>2.298549</td><td>.30</td></tr> <tr><td>2.044119</td><td>.35</td></tr> <tr><td>1.618941</td><td>.40</td></tr> <tr><td>1.795115</td><td>.45</td></tr> <tr><td>1.784387</td><td>.50</td></tr> <tr><td>1.619707</td><td>.55</td></tr> <tr><td>1.420084</td><td>.60</td></tr> <tr><td>1.456311</td><td>.65</td></tr> <tr><td>1.692931</td><td>.70</td></tr> <tr><td>1.456311</td><td>.75</td></tr> <tr><td>1.594664</td><td>.80</td></tr> <tr><td>1.603201</td><td>.85</td></tr> <tr><td>1.451059</td><td>.90</td></tr> <tr><td>1.817668</td><td>.95</td></tr> <tr><td>2.046134</td><td>1.00</td></tr> </tbody> </table>	EER (%)	λ	5.348216	0	4.683437	.05	4.046746	.10	3.324570	.15	3.049581	.20	2.669027	.25	2.298549	.30	2.044119	.35	1.618941	.40	1.795115	.45	1.784387	.50	1.619707	.55	1.420084	.60	1.456311	.65	1.692931	.70	1.456311	.75	1.594664	.80	1.603201	.85	1.451059	.90	1.817668	.95	2.046134	1.00
EER (%)	λ																																																																																									
5.174160	0																																																																																									
4.854369	.05																																																																																									
4.643568	.10																																																																																									
4.006150	.15																																																																																									
3.399849	.20																																																																																									
3.398058	.25																																																																																									
2.943067	.30																																																																																									
2.433057	.35																																																																																									
2.427185	.40																																																																																									
2.427185	.45																																																																																									
2.386331	.50																																																																																									
1.692832	.55																																																																																									
1.505558	.60																																																																																									
1.297253	.65																																																																																									
1.456311	.70																																																																																									
1.456311	.75																																																																																									
1.456311	.80																																																																																									
1.514938	.85																																																																																									
1.764722	.90																																																																																									
1.571343	.95																																																																																									
1.864474	1.00																																																																																									
EER (%)	λ																																																																																									
5.348216	0																																																																																									
4.683437	.05																																																																																									
4.046746	.10																																																																																									
3.324570	.15																																																																																									
3.049581	.20																																																																																									
2.669027	.25																																																																																									
2.298549	.30																																																																																									
2.044119	.35																																																																																									
1.618941	.40																																																																																									
1.795115	.45																																																																																									
1.784387	.50																																																																																									
1.619707	.55																																																																																									
1.420084	.60																																																																																									
1.456311	.65																																																																																									
1.692931	.70																																																																																									
1.456311	.75																																																																																									
1.594664	.80																																																																																									
1.603201	.85																																																																																									
1.451059	.90																																																																																									
1.817668	.95																																																																																									
2.046134	1.00																																																																																									
PRUEBA 8																																																																																										
	<table border="1"> <thead> <tr> <th>EER (%)</th> <th>λ</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>5.825243</td><td>0</td></tr> <tr><td>4.587918</td><td>.10</td></tr> <tr><td>3.501607</td><td>.15</td></tr> <tr><td>3.266990</td><td>.20</td></tr> <tr><td>2.919246</td><td>.25</td></tr> <tr><td>2.276448</td><td>.30</td></tr> <tr><td>1.875792</td><td>.35</td></tr> <tr><td>1.779625</td><td>.40</td></tr> <tr><td>1.371186</td><td>.45</td></tr> <tr><td>1.289296</td><td>.50</td></tr> <tr><td>1.193850</td><td>.55</td></tr> <tr><td>1.194401</td><td>.60</td></tr> <tr><td>0.970874</td><td>.65</td></tr> <tr><td>1.304426</td><td>.70</td></tr> <tr><td>1.941748</td><td>.75</td></tr> <tr><td>2.411981</td><td>.80</td></tr> <tr><td>3.256614</td><td>.85</td></tr> <tr><td>3.809355</td><td>.90</td></tr> <tr><td>4.893854</td><td>1.00</td></tr> </tbody> </table>	EER (%)	λ	5.825243	0	4.587918	.10	3.501607	.15	3.266990	.20	2.919246	.25	2.276448	.30	1.875792	.35	1.779625	.40	1.371186	.45	1.289296	.50	1.193850	.55	1.194401	.60	0.970874	.65	1.304426	.70	1.941748	.75	2.411981	.80	3.256614	.85	3.809355	.90	4.893854	1.00	<table border="1"> <thead> <tr> <th>EER (%)</th> <th>λ</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>5.783399</td><td>0</td></tr> <tr><td>3.331768</td><td>.10</td></tr> <tr><td>2.693138</td><td>.15</td></tr> <tr><td>1.868688</td><td>.20</td></tr> <tr><td>1.839133</td><td>.25</td></tr> <tr><td>1.802746</td><td>.30</td></tr> <tr><td>1.483359</td><td>.35</td></tr> <tr><td>1.106860</td><td>.40</td></tr> <tr><td>1.474437</td><td>.45</td></tr> <tr><td>1.567435</td><td>.50</td></tr> <tr><td>1.707136</td><td>.55</td></tr> <tr><td>2.412677</td><td>.60</td></tr> <tr><td>2.516617</td><td>.65</td></tr> <tr><td>2.830645</td><td>.70</td></tr> <tr><td>3.434597</td><td>.75</td></tr> <tr><td>3.797616</td><td>.80</td></tr> <tr><td>4.151544</td><td>.85</td></tr> <tr><td>4.359552</td><td>.90</td></tr> <tr><td>5.017759</td><td>1.00</td></tr> </tbody> </table>	EER (%)	λ	5.783399	0	3.331768	.10	2.693138	.15	1.868688	.20	1.839133	.25	1.802746	.30	1.483359	.35	1.106860	.40	1.474437	.45	1.567435	.50	1.707136	.55	2.412677	.60	2.516617	.65	2.830645	.70	3.434597	.75	3.797616	.80	4.151544	.85	4.359552	.90	5.017759	1.00								
EER (%)	λ																																																																																									
5.825243	0																																																																																									
4.587918	.10																																																																																									
3.501607	.15																																																																																									
3.266990	.20																																																																																									
2.919246	.25																																																																																									
2.276448	.30																																																																																									
1.875792	.35																																																																																									
1.779625	.40																																																																																									
1.371186	.45																																																																																									
1.289296	.50																																																																																									
1.193850	.55																																																																																									
1.194401	.60																																																																																									
0.970874	.65																																																																																									
1.304426	.70																																																																																									
1.941748	.75																																																																																									
2.411981	.80																																																																																									
3.256614	.85																																																																																									
3.809355	.90																																																																																									
4.893854	1.00																																																																																									
EER (%)	λ																																																																																									
5.783399	0																																																																																									
3.331768	.10																																																																																									
2.693138	.15																																																																																									
1.868688	.20																																																																																									
1.839133	.25																																																																																									
1.802746	.30																																																																																									
1.483359	.35																																																																																									
1.106860	.40																																																																																									
1.474437	.45																																																																																									
1.567435	.50																																																																																									
1.707136	.55																																																																																									
2.412677	.60																																																																																									
2.516617	.65																																																																																									
2.830645	.70																																																																																									
3.434597	.75																																																																																									
3.797616	.80																																																																																									
4.151544	.85																																																																																									
4.359552	.90																																																																																									
5.017759	1.00																																																																																									
PRUEBA 9																																																																																										
	<table border="1"> <thead> <tr> <th>EER (%)</th> <th>λ</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>7.192391</td><td>0</td></tr> <tr><td>5.825243</td><td>.10</td></tr> <tr><td>5.372904</td><td>.15</td></tr> <tr><td>4.854369</td><td>.20</td></tr> <tr><td>4.100171</td><td>.25</td></tr> <tr><td>3.883495</td><td>.30</td></tr> <tr><td>3.883495</td><td>.35</td></tr> <tr><td>2.912621</td><td>.40</td></tr> <tr><td>2.912621</td><td>.45</td></tr> <tr><td>3.177405</td><td>.50</td></tr> <tr><td>3.650486</td><td>.55</td></tr> <tr><td>3.883495</td><td>.60</td></tr> <tr><td>3.883495</td><td>.65</td></tr> <tr><td>3.883495</td><td>.70</td></tr> <tr><td>3.883495</td><td>.75</td></tr> <tr><td>3.883495</td><td>.80</td></tr> <tr><td>2.912621</td><td>.85</td></tr> <tr><td>2.912621</td><td>.90</td></tr> <tr><td>2.996403</td><td>.95</td></tr> <tr><td>3.544386</td><td>1.00</td></tr> </tbody> </table>	EER (%)	λ	7.192391	0	5.825243	.10	5.372904	.15	4.854369	.20	4.100171	.25	3.883495	.30	3.883495	.35	2.912621	.40	2.912621	.45	3.177405	.50	3.650486	.55	3.883495	.60	3.883495	.65	3.883495	.70	3.883495	.75	3.883495	.80	2.912621	.85	2.912621	.90	2.996403	.95	3.544386	1.00	<table border="1"> <thead> <tr> <th>EER (%)</th> <th>λ</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>8.382333</td><td>0</td></tr> <tr><td>4.896951</td><td>.10</td></tr> <tr><td>3.883495</td><td>.15</td></tr> <tr><td>3.688472</td><td>.20</td></tr> <tr><td>3.475253</td><td>.25</td></tr> <tr><td>3.225134</td><td>.30</td></tr> <tr><td>3.768164</td><td>.35</td></tr> <tr><td>3.623968</td><td>.40</td></tr> <tr><td>3.883495</td><td>.45</td></tr> <tr><td>3.883495</td><td>.50</td></tr> <tr><td>3.883495</td><td>.55</td></tr> <tr><td>3.883495</td><td>.60</td></tr> <tr><td>3.527375</td><td>.65</td></tr> <tr><td>3.392237</td><td>.70</td></tr> <tr><td>3.238024</td><td>.75</td></tr> <tr><td>3.050869</td><td>.80</td></tr> <tr><td>2.912621</td><td>.85</td></tr> <tr><td>3.522466</td><td>.90</td></tr> <tr><td>3.395361</td><td>.95</td></tr> <tr><td>3.543131</td><td>1.00</td></tr> </tbody> </table>	EER (%)	λ	8.382333	0	4.896951	.10	3.883495	.15	3.688472	.20	3.475253	.25	3.225134	.30	3.768164	.35	3.623968	.40	3.883495	.45	3.883495	.50	3.883495	.55	3.883495	.60	3.527375	.65	3.392237	.70	3.238024	.75	3.050869	.80	2.912621	.85	3.522466	.90	3.395361	.95	3.543131	1.00				
EER (%)	λ																																																																																									
7.192391	0																																																																																									
5.825243	.10																																																																																									
5.372904	.15																																																																																									
4.854369	.20																																																																																									
4.100171	.25																																																																																									
3.883495	.30																																																																																									
3.883495	.35																																																																																									
2.912621	.40																																																																																									
2.912621	.45																																																																																									
3.177405	.50																																																																																									
3.650486	.55																																																																																									
3.883495	.60																																																																																									
3.883495	.65																																																																																									
3.883495	.70																																																																																									
3.883495	.75																																																																																									
3.883495	.80																																																																																									
2.912621	.85																																																																																									
2.912621	.90																																																																																									
2.996403	.95																																																																																									
3.544386	1.00																																																																																									
EER (%)	λ																																																																																									
8.382333	0																																																																																									
4.896951	.10																																																																																									
3.883495	.15																																																																																									
3.688472	.20																																																																																									
3.475253	.25																																																																																									
3.225134	.30																																																																																									
3.768164	.35																																																																																									
3.623968	.40																																																																																									
3.883495	.45																																																																																									
3.883495	.50																																																																																									
3.883495	.55																																																																																									
3.883495	.60																																																																																									
3.527375	.65																																																																																									
3.392237	.70																																																																																									
3.238024	.75																																																																																									
3.050869	.80																																																																																									
2.912621	.85																																																																																									
3.522466	.90																																																																																									
3.395361	.95																																																																																									
3.543131	1.00																																																																																									

Anexo C: Resultados experimentales completos

CURVA EFICIENCIA	Estandarización Z-score	Normalización Máx-mín																																																																																								
PRUEBA 10																																																																																										
	<table border="1"> <thead> <tr> <th>EER (%)</th> <th>λ</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>3.582312</td><td>0</td></tr> <tr><td>3.398058</td><td>.05</td></tr> <tr><td>3.398058</td><td>.10</td></tr> <tr><td>3.398058</td><td>.15</td></tr> <tr><td>2.866953</td><td>.20</td></tr> <tr><td>2.309210</td><td>.25</td></tr> <tr><td>2.058419</td><td>.30</td></tr> <tr><td>1.573719</td><td>.35</td></tr> <tr><td>1.456311</td><td>.40</td></tr> <tr><td>1.456311</td><td>.45</td></tr> <tr><td>1.456311</td><td>.50</td></tr> <tr><td>1.456311</td><td>.55</td></tr> <tr><td>1.363670</td><td>.60</td></tr> <tr><td>1.179678</td><td>.65</td></tr> <tr><td>0.970874</td><td>.70</td></tr> <tr><td>0.970874</td><td>.75</td></tr> <tr><td>0.970874</td><td>.80</td></tr> <tr><td>0.676593</td><td>.85</td></tr> <tr><td>0.485437</td><td>.90</td></tr> <tr><td>0.485437</td><td>.95</td></tr> <tr><td>0.485437</td><td>1.00</td></tr> </tbody> </table>	EER (%)	λ	3.582312	0	3.398058	.05	3.398058	.10	3.398058	.15	2.866953	.20	2.309210	.25	2.058419	.30	1.573719	.35	1.456311	.40	1.456311	.45	1.456311	.50	1.456311	.55	1.363670	.60	1.179678	.65	0.970874	.70	0.970874	.75	0.970874	.80	0.676593	.85	0.485437	.90	0.485437	.95	0.485437	1.00	<table border="1"> <thead> <tr> <th>EER (%)</th> <th>λ</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>3.784908</td><td>0</td></tr> <tr><td>3.539718</td><td>.05</td></tr> <tr><td>2.813665</td><td>.10</td></tr> <tr><td>2.389073</td><td>.15</td></tr> <tr><td>1.961922</td><td>.20</td></tr> <tr><td>1.665852</td><td>.25</td></tr> <tr><td>1.433070</td><td>.30</td></tr> <tr><td>1.359596</td><td>.35</td></tr> <tr><td>1.267202</td><td>.40</td></tr> <tr><td>1.161866</td><td>.45</td></tr> <tr><td>1.023475</td><td>.50</td></tr> <tr><td>0.937377</td><td>.55</td></tr> <tr><td>0.893290</td><td>.60</td></tr> <tr><td>0.835979</td><td>.65</td></tr> <tr><td>0.644564</td><td>.70</td></tr> <tr><td>0.678282</td><td>.75</td></tr> <tr><td>0.582095</td><td>.80</td></tr> <tr><td>0.485437</td><td>.85</td></tr> <tr><td>0.479972</td><td>.90</td></tr> <tr><td>0.457937</td><td>.95</td></tr> <tr><td>0.485437</td><td>1.00</td></tr> </tbody> </table>	EER (%)	λ	3.784908	0	3.539718	.05	2.813665	.10	2.389073	.15	1.961922	.20	1.665852	.25	1.433070	.30	1.359596	.35	1.267202	.40	1.161866	.45	1.023475	.50	0.937377	.55	0.893290	.60	0.835979	.65	0.644564	.70	0.678282	.75	0.582095	.80	0.485437	.85	0.479972	.90	0.457937	.95	0.485437	1.00
EER (%)	λ																																																																																									
3.582312	0																																																																																									
3.398058	.05																																																																																									
3.398058	.10																																																																																									
3.398058	.15																																																																																									
2.866953	.20																																																																																									
2.309210	.25																																																																																									
2.058419	.30																																																																																									
1.573719	.35																																																																																									
1.456311	.40																																																																																									
1.456311	.45																																																																																									
1.456311	.50																																																																																									
1.456311	.55																																																																																									
1.363670	.60																																																																																									
1.179678	.65																																																																																									
0.970874	.70																																																																																									
0.970874	.75																																																																																									
0.970874	.80																																																																																									
0.676593	.85																																																																																									
0.485437	.90																																																																																									
0.485437	.95																																																																																									
0.485437	1.00																																																																																									
EER (%)	λ																																																																																									
3.784908	0																																																																																									
3.539718	.05																																																																																									
2.813665	.10																																																																																									
2.389073	.15																																																																																									
1.961922	.20																																																																																									
1.665852	.25																																																																																									
1.433070	.30																																																																																									
1.359596	.35																																																																																									
1.267202	.40																																																																																									
1.161866	.45																																																																																									
1.023475	.50																																																																																									
0.937377	.55																																																																																									
0.893290	.60																																																																																									
0.835979	.65																																																																																									
0.644564	.70																																																																																									
0.678282	.75																																																																																									
0.582095	.80																																																																																									
0.485437	.85																																																																																									
0.479972	.90																																																																																									
0.457937	.95																																																																																									
0.485437	1.00																																																																																									
PRUEBA 11																																																																																										
	<table border="1"> <thead> <tr> <th>EER (%)</th> <th>λ</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>5.339806</td><td>0</td></tr> <tr><td>4.750151</td><td>.10</td></tr> <tr><td>4.108713</td><td>.15</td></tr> <tr><td>3.299990</td><td>.20</td></tr> <tr><td>2.618240</td><td>.25</td></tr> <tr><td>2.128020</td><td>.30</td></tr> <tr><td>1.903193</td><td>.35</td></tr> <tr><td>1.465829</td><td>.40</td></tr> <tr><td>1.079849</td><td>.45</td></tr> <tr><td>0.970874</td><td>.50</td></tr> <tr><td>0.970874</td><td>.55</td></tr> <tr><td>0.970874</td><td>.60</td></tr> <tr><td>0.970874</td><td>.65</td></tr> <tr><td>0.970874</td><td>.70</td></tr> <tr><td>0.844867</td><td>.75</td></tr> <tr><td>0.485437</td><td>.80</td></tr> <tr><td>0.485437</td><td>.85</td></tr> <tr><td>0.485437</td><td>.90</td></tr> <tr><td>0.485437</td><td>.95</td></tr> <tr><td>0.485437</td><td>1.00</td></tr> </tbody> </table>	EER (%)	λ	5.339806	0	4.750151	.10	4.108713	.15	3.299990	.20	2.618240	.25	2.128020	.30	1.903193	.35	1.465829	.40	1.079849	.45	0.970874	.50	0.970874	.55	0.970874	.60	0.970874	.65	0.970874	.70	0.844867	.75	0.485437	.80	0.485437	.85	0.485437	.90	0.485437	.95	0.485437	1.00	<table border="1"> <thead> <tr> <th>EER (%)</th> <th>λ</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>5.548502</td><td>0</td></tr> <tr><td>3.429546</td><td>.10</td></tr> <tr><td>2.728234</td><td>.15</td></tr> <tr><td>1.972686</td><td>.20</td></tr> <tr><td>1.366379</td><td>.25</td></tr> <tr><td>1.290412</td><td>.30</td></tr> <tr><td>1.149657</td><td>.35</td></tr> <tr><td>0.963482</td><td>.40</td></tr> <tr><td>0.970874</td><td>.45</td></tr> <tr><td>0.970874</td><td>.50</td></tr> <tr><td>0.970874</td><td>.55</td></tr> <tr><td>0.569668</td><td>.60</td></tr> <tr><td>0.485437</td><td>.65</td></tr> <tr><td>0.485437</td><td>.70</td></tr> <tr><td>0.485437</td><td>.75</td></tr> <tr><td>0.485437</td><td>.80</td></tr> <tr><td>0.485437</td><td>.85</td></tr> <tr><td>0.485437</td><td>.90</td></tr> <tr><td>0.485437</td><td>.95</td></tr> <tr><td>0.485437</td><td>1.00</td></tr> </tbody> </table>	EER (%)	λ	5.548502	0	3.429546	.10	2.728234	.15	1.972686	.20	1.366379	.25	1.290412	.30	1.149657	.35	0.963482	.40	0.970874	.45	0.970874	.50	0.970874	.55	0.569668	.60	0.485437	.65	0.485437	.70	0.485437	.75	0.485437	.80	0.485437	.85	0.485437	.90	0.485437	.95	0.485437	1.00				
EER (%)	λ																																																																																									
5.339806	0																																																																																									
4.750151	.10																																																																																									
4.108713	.15																																																																																									
3.299990	.20																																																																																									
2.618240	.25																																																																																									
2.128020	.30																																																																																									
1.903193	.35																																																																																									
1.465829	.40																																																																																									
1.079849	.45																																																																																									
0.970874	.50																																																																																									
0.970874	.55																																																																																									
0.970874	.60																																																																																									
0.970874	.65																																																																																									
0.970874	.70																																																																																									
0.844867	.75																																																																																									
0.485437	.80																																																																																									
0.485437	.85																																																																																									
0.485437	.90																																																																																									
0.485437	.95																																																																																									
0.485437	1.00																																																																																									
EER (%)	λ																																																																																									
5.548502	0																																																																																									
3.429546	.10																																																																																									
2.728234	.15																																																																																									
1.972686	.20																																																																																									
1.366379	.25																																																																																									
1.290412	.30																																																																																									
1.149657	.35																																																																																									
0.963482	.40																																																																																									
0.970874	.45																																																																																									
0.970874	.50																																																																																									
0.970874	.55																																																																																									
0.569668	.60																																																																																									
0.485437	.65																																																																																									
0.485437	.70																																																																																									
0.485437	.75																																																																																									
0.485437	.80																																																																																									
0.485437	.85																																																																																									
0.485437	.90																																																																																									
0.485437	.95																																																																																									
0.485437	1.00																																																																																									
PRUEBA 12																																																																																										
	<table border="1"> <thead> <tr> <th>EER (%)</th> <th>λ</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>4.207120</td><td>0</td></tr> <tr><td>3.823774</td><td>.10</td></tr> <tr><td>3.345544</td><td>.15</td></tr> <tr><td>2.723060</td><td>.20</td></tr> <tr><td>2.057099</td><td>.25</td></tr> <tr><td>1.633293</td><td>.30</td></tr> <tr><td>1.301533</td><td>.35</td></tr> <tr><td>0.999341</td><td>.40</td></tr> <tr><td>0.898806</td><td>.45</td></tr> <tr><td>0.647249</td><td>.50</td></tr> <tr><td>0.647249</td><td>.55</td></tr> <tr><td>0.647249</td><td>.60</td></tr> <tr><td>0.647249</td><td>.65</td></tr> <tr><td>0.647249</td><td>.70</td></tr> <tr><td>0.647249</td><td>.75</td></tr> <tr><td>0.647249</td><td>.80</td></tr> <tr><td>0.604417</td><td>.85</td></tr> <tr><td>0.647249</td><td>.90</td></tr> <tr><td>0.647249</td><td>.95</td></tr> <tr><td>0.647249</td><td>1.00</td></tr> </tbody> </table>	EER (%)	λ	4.207120	0	3.823774	.10	3.345544	.15	2.723060	.20	2.057099	.25	1.633293	.30	1.301533	.35	0.999341	.40	0.898806	.45	0.647249	.50	0.647249	.55	0.647249	.60	0.647249	.65	0.647249	.70	0.647249	.75	0.647249	.80	0.604417	.85	0.647249	.90	0.647249	.95	0.647249	1.00	<table border="1"> <thead> <tr> <th>EER (%)</th> <th>λ</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>4.418641</td><td>0</td></tr> <tr><td>3.173453</td><td>.10</td></tr> <tr><td>2.377872</td><td>.15</td></tr> <tr><td>1.657297</td><td>.20</td></tr> <tr><td>1.330716</td><td>.25</td></tr> <tr><td>1.169354</td><td>.30</td></tr> <tr><td>0.922674</td><td>.35</td></tr> <tr><td>0.728369</td><td>.40</td></tr> <tr><td>0.643087</td><td>.45</td></tr> <tr><td>0.647249</td><td>.50</td></tr> <tr><td>0.647249</td><td>.55</td></tr> <tr><td>0.647249</td><td>.60</td></tr> <tr><td>0.782093</td><td>.65</td></tr> <tr><td>0.718856</td><td>.70</td></tr> <tr><td>0.645240</td><td>.75</td></tr> <tr><td>0.632687</td><td>.80</td></tr> <tr><td>0.647249</td><td>.85</td></tr> <tr><td>0.647249</td><td>.90</td></tr> <tr><td>0.647249</td><td>.95</td></tr> <tr><td>0.647249</td><td>1.00</td></tr> </tbody> </table>	EER (%)	λ	4.418641	0	3.173453	.10	2.377872	.15	1.657297	.20	1.330716	.25	1.169354	.30	0.922674	.35	0.728369	.40	0.643087	.45	0.647249	.50	0.647249	.55	0.647249	.60	0.782093	.65	0.718856	.70	0.645240	.75	0.632687	.80	0.647249	.85	0.647249	.90	0.647249	.95	0.647249	1.00				
EER (%)	λ																																																																																									
4.207120	0																																																																																									
3.823774	.10																																																																																									
3.345544	.15																																																																																									
2.723060	.20																																																																																									
2.057099	.25																																																																																									
1.633293	.30																																																																																									
1.301533	.35																																																																																									
0.999341	.40																																																																																									
0.898806	.45																																																																																									
0.647249	.50																																																																																									
0.647249	.55																																																																																									
0.647249	.60																																																																																									
0.647249	.65																																																																																									
0.647249	.70																																																																																									
0.647249	.75																																																																																									
0.647249	.80																																																																																									
0.604417	.85																																																																																									
0.647249	.90																																																																																									
0.647249	.95																																																																																									
0.647249	1.00																																																																																									
EER (%)	λ																																																																																									
4.418641	0																																																																																									
3.173453	.10																																																																																									
2.377872	.15																																																																																									
1.657297	.20																																																																																									
1.330716	.25																																																																																									
1.169354	.30																																																																																									
0.922674	.35																																																																																									
0.728369	.40																																																																																									
0.643087	.45																																																																																									
0.647249	.50																																																																																									
0.647249	.55																																																																																									
0.647249	.60																																																																																									
0.782093	.65																																																																																									
0.718856	.70																																																																																									
0.645240	.75																																																																																									
0.632687	.80																																																																																									
0.647249	.85																																																																																									
0.647249	.90																																																																																									
0.647249	.95																																																																																									
0.647249	1.00																																																																																									

CURVA EFICIENCIA	Estandarización Z-score	Normalización Máx-mín																																																																																				
PRUEBA 13																																																																																						
	<table border="1"> <thead> <tr> <th>EER (%)</th> <th>λ</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>6.575084</td><td>0</td></tr> <tr><td>5.798745</td><td>.05</td></tr> <tr><td>5.335716</td><td>.10</td></tr> <tr><td>4.368603</td><td>.15</td></tr> <tr><td>3.291965</td><td>.20</td></tr> <tr><td>2.644917</td><td>.25</td></tr> <tr><td>2.340617</td><td>.30</td></tr> <tr><td>2.233804</td><td>.35</td></tr> <tr><td>1.961263</td><td>.40</td></tr> <tr><td>1.701177</td><td>.45</td></tr> <tr><td>1.699029</td><td>.50</td></tr> <tr><td>1.699029</td><td>.55</td></tr> <tr><td>1.699029</td><td>.60</td></tr> <tr><td>1.700935</td><td>.65</td></tr> <tr><td>1.679378</td><td>.70</td></tr> <tr><td>1.754323</td><td>.75</td></tr> <tr><td>1.584500</td><td>.80</td></tr> <tr><td>1.563583</td><td>.85</td></tr> <tr><td>1.445373</td><td>.90</td></tr> <tr><td>1.799074</td><td>1.00</td></tr> </tbody> </table>	EER (%)	λ	6.575084	0	5.798745	.05	5.335716	.10	4.368603	.15	3.291965	.20	2.644917	.25	2.340617	.30	2.233804	.35	1.961263	.40	1.701177	.45	1.699029	.50	1.699029	.55	1.699029	.60	1.700935	.65	1.679378	.70	1.754323	.75	1.584500	.80	1.563583	.85	1.445373	.90	1.799074	1.00	<table border="1"> <thead> <tr> <th>EER (%)</th> <th>λ</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>6.652793</td><td>0</td></tr> <tr><td>5.551854</td><td>.05</td></tr> <tr><td>4.659163</td><td>.10</td></tr> <tr><td>3.509722</td><td>.15</td></tr> <tr><td>2.832910</td><td>.20</td></tr> <tr><td>2.177757</td><td>.25</td></tr> <tr><td>1.821787</td><td>.30</td></tr> <tr><td>1.689153</td><td>.35</td></tr> <tr><td>1.940150</td><td>.40</td></tr> <tr><td>1.919647</td><td>.45</td></tr> <tr><td>1.709479</td><td>.50</td></tr> <tr><td>1.796253</td><td>.55</td></tr> <tr><td>1.722199</td><td>.60</td></tr> <tr><td>1.729547</td><td>.65</td></tr> <tr><td>1.609957</td><td>.70</td></tr> <tr><td>1.570387</td><td>.75</td></tr> <tr><td>1.537033</td><td>.80</td></tr> <tr><td>1.616601</td><td>.85</td></tr> <tr><td>1.923959</td><td>.90</td></tr> <tr><td>1.995582</td><td>1.00</td></tr> </tbody> </table>	EER (%)	λ	6.652793	0	5.551854	.05	4.659163	.10	3.509722	.15	2.832910	.20	2.177757	.25	1.821787	.30	1.689153	.35	1.940150	.40	1.919647	.45	1.709479	.50	1.796253	.55	1.722199	.60	1.729547	.65	1.609957	.70	1.570387	.75	1.537033	.80	1.616601	.85	1.923959	.90	1.995582	1.00
EER (%)	λ																																																																																					
6.575084	0																																																																																					
5.798745	.05																																																																																					
5.335716	.10																																																																																					
4.368603	.15																																																																																					
3.291965	.20																																																																																					
2.644917	.25																																																																																					
2.340617	.30																																																																																					
2.233804	.35																																																																																					
1.961263	.40																																																																																					
1.701177	.45																																																																																					
1.699029	.50																																																																																					
1.699029	.55																																																																																					
1.699029	.60																																																																																					
1.700935	.65																																																																																					
1.679378	.70																																																																																					
1.754323	.75																																																																																					
1.584500	.80																																																																																					
1.563583	.85																																																																																					
1.445373	.90																																																																																					
1.799074	1.00																																																																																					
EER (%)	λ																																																																																					
6.652793	0																																																																																					
5.551854	.05																																																																																					
4.659163	.10																																																																																					
3.509722	.15																																																																																					
2.832910	.20																																																																																					
2.177757	.25																																																																																					
1.821787	.30																																																																																					
1.689153	.35																																																																																					
1.940150	.40																																																																																					
1.919647	.45																																																																																					
1.709479	.50																																																																																					
1.796253	.55																																																																																					
1.722199	.60																																																																																					
1.729547	.65																																																																																					
1.609957	.70																																																																																					
1.570387	.75																																																																																					
1.537033	.80																																																																																					
1.616601	.85																																																																																					
1.923959	.90																																																																																					
1.995582	1.00																																																																																					
PRUEBA 14																																																																																						
	<table border="1"> <thead> <tr> <th>EER (%)</th> <th>λ</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>11.765366</td><td>0</td></tr> <tr><td>8.668173</td><td>.05</td></tr> <tr><td>7.395342</td><td>.10</td></tr> <tr><td>6.020162</td><td>.15</td></tr> <tr><td>5.564275</td><td>.20</td></tr> <tr><td>4.845295</td><td>.25</td></tr> <tr><td>4.994978</td><td>.30</td></tr> <tr><td>5.146661</td><td>.35</td></tr> <tr><td>5.437213</td><td>.40</td></tr> <tr><td>5.430651</td><td>.45</td></tr> <tr><td>5.893507</td><td>.50</td></tr> <tr><td>5.817643</td><td>.55</td></tr> <tr><td>6.651956</td><td>.60</td></tr> <tr><td>7.281553</td><td>.65</td></tr> <tr><td>7.787301</td><td>.70</td></tr> <tr><td>8.015201</td><td>.75</td></tr> <tr><td>8.746690</td><td>.80</td></tr> <tr><td>8.688507</td><td>.85</td></tr> <tr><td>8.925365</td><td>.90</td></tr> <tr><td>10.276958</td><td>1.00</td></tr> </tbody> </table>	EER (%)	λ	11.765366	0	8.668173	.05	7.395342	.10	6.020162	.15	5.564275	.20	4.845295	.25	4.994978	.30	5.146661	.35	5.437213	.40	5.430651	.45	5.893507	.50	5.817643	.55	6.651956	.60	7.281553	.65	7.787301	.70	8.015201	.75	8.746690	.80	8.688507	.85	8.925365	.90	10.276958	1.00	<table border="1"> <thead> <tr> <th>EER (%)</th> <th>λ</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>13.885677</td><td>0</td></tr> <tr><td>8.216114</td><td>.05</td></tr> <tr><td>7.711040</td><td>.10</td></tr> <tr><td>5.222854</td><td>.15</td></tr> <tr><td>6.118248</td><td>.20</td></tr> <tr><td>5.606446</td><td>.25</td></tr> <tr><td>6.590178</td><td>.30</td></tr> <tr><td>5.709063</td><td>.35</td></tr> <tr><td>7.191995</td><td>.40</td></tr> <tr><td>7.328165</td><td>.45</td></tr> <tr><td>7.809028</td><td>.50</td></tr> <tr><td>7.995777</td><td>.55</td></tr> <tr><td>7.652784</td><td>.60</td></tr> <tr><td>8.547175</td><td>.65</td></tr> <tr><td>8.377975</td><td>.70</td></tr> <tr><td>8.435876</td><td>.75</td></tr> <tr><td>8.636770</td><td>.80</td></tr> <tr><td>9.342203</td><td>.85</td></tr> <tr><td>9.755374</td><td>.90</td></tr> <tr><td>10.346606</td><td>1.00</td></tr> </tbody> </table>	EER (%)	λ	13.885677	0	8.216114	.05	7.711040	.10	5.222854	.15	6.118248	.20	5.606446	.25	6.590178	.30	5.709063	.35	7.191995	.40	7.328165	.45	7.809028	.50	7.995777	.55	7.652784	.60	8.547175	.65	8.377975	.70	8.435876	.75	8.636770	.80	9.342203	.85	9.755374	.90	10.346606	1.00
EER (%)	λ																																																																																					
11.765366	0																																																																																					
8.668173	.05																																																																																					
7.395342	.10																																																																																					
6.020162	.15																																																																																					
5.564275	.20																																																																																					
4.845295	.25																																																																																					
4.994978	.30																																																																																					
5.146661	.35																																																																																					
5.437213	.40																																																																																					
5.430651	.45																																																																																					
5.893507	.50																																																																																					
5.817643	.55																																																																																					
6.651956	.60																																																																																					
7.281553	.65																																																																																					
7.787301	.70																																																																																					
8.015201	.75																																																																																					
8.746690	.80																																																																																					
8.688507	.85																																																																																					
8.925365	.90																																																																																					
10.276958	1.00																																																																																					
EER (%)	λ																																																																																					
13.885677	0																																																																																					
8.216114	.05																																																																																					
7.711040	.10																																																																																					
5.222854	.15																																																																																					
6.118248	.20																																																																																					
5.606446	.25																																																																																					
6.590178	.30																																																																																					
5.709063	.35																																																																																					
7.191995	.40																																																																																					
7.328165	.45																																																																																					
7.809028	.50																																																																																					
7.995777	.55																																																																																					
7.652784	.60																																																																																					
8.547175	.65																																																																																					
8.377975	.70																																																																																					
8.435876	.75																																																																																					
8.636770	.80																																																																																					
9.342203	.85																																																																																					
9.755374	.90																																																																																					
10.346606	1.00																																																																																					
PRUEBA 15																																																																																						
	<table border="1"> <thead> <tr> <th>EER (%)</th> <th>λ</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>3.582312</td><td>0</td></tr> <tr><td>3.398058</td><td>.05</td></tr> <tr><td>3.398058</td><td>.10</td></tr> <tr><td>3.398058</td><td>.15</td></tr> <tr><td>2.811689</td><td>.20</td></tr> <tr><td>2.311342</td><td>.25</td></tr> <tr><td>1.941748</td><td>.30</td></tr> <tr><td>1.878992</td><td>.35</td></tr> <tr><td>1.456311</td><td>.40</td></tr> <tr><td>1.456311</td><td>.45</td></tr> <tr><td>1.403673</td><td>.50</td></tr> <tr><td>1.284126</td><td>.55</td></tr> <tr><td>1.177398</td><td>.60</td></tr> <tr><td>0.915219</td><td>.65</td></tr> <tr><td>0.734316</td><td>.70</td></tr> <tr><td>0.670884</td><td>.75</td></tr> <tr><td>0.552207</td><td>.80</td></tr> <tr><td>0.523660</td><td>.85</td></tr> <tr><td>0.604320</td><td>.95</td></tr> <tr><td>0.630738</td><td>1.00</td></tr> </tbody> </table>	EER (%)	λ	3.582312	0	3.398058	.05	3.398058	.10	3.398058	.15	2.811689	.20	2.311342	.25	1.941748	.30	1.878992	.35	1.456311	.40	1.456311	.45	1.403673	.50	1.284126	.55	1.177398	.60	0.915219	.65	0.734316	.70	0.670884	.75	0.552207	.80	0.523660	.85	0.604320	.95	0.630738	1.00	<table border="1"> <thead> <tr> <th>EER (%)</th> <th>λ</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>3.784908</td><td>0</td></tr> <tr><td>3.374344</td><td>.05</td></tr> <tr><td>2.729244</td><td>.10</td></tr> <tr><td>1.923809</td><td>.15</td></tr> <tr><td>1.582114</td><td>.20</td></tr> <tr><td>1.444359</td><td>.25</td></tr> <tr><td>1.279870</td><td>.30</td></tr> <tr><td>1.427506</td><td>.35</td></tr> <tr><td>1.133696</td><td>.40</td></tr> <tr><td>0.793804</td><td>.45</td></tr> <tr><td>0.878169</td><td>.50</td></tr> <tr><td>0.725901</td><td>.55</td></tr> <tr><td>0.495692</td><td>.60</td></tr> <tr><td>0.789819</td><td>.65</td></tr> <tr><td>0.485437</td><td>.70</td></tr> <tr><td>0.717774</td><td>.75</td></tr> <tr><td>0.643732</td><td>.80</td></tr> <tr><td>0.485437</td><td>.85</td></tr> <tr><td>0.589459</td><td>.95</td></tr> <tr><td>0.811663</td><td>1.00</td></tr> </tbody> </table>	EER (%)	λ	3.784908	0	3.374344	.05	2.729244	.10	1.923809	.15	1.582114	.20	1.444359	.25	1.279870	.30	1.427506	.35	1.133696	.40	0.793804	.45	0.878169	.50	0.725901	.55	0.495692	.60	0.789819	.65	0.485437	.70	0.717774	.75	0.643732	.80	0.485437	.85	0.589459	.95	0.811663	1.00
EER (%)	λ																																																																																					
3.582312	0																																																																																					
3.398058	.05																																																																																					
3.398058	.10																																																																																					
3.398058	.15																																																																																					
2.811689	.20																																																																																					
2.311342	.25																																																																																					
1.941748	.30																																																																																					
1.878992	.35																																																																																					
1.456311	.40																																																																																					
1.456311	.45																																																																																					
1.403673	.50																																																																																					
1.284126	.55																																																																																					
1.177398	.60																																																																																					
0.915219	.65																																																																																					
0.734316	.70																																																																																					
0.670884	.75																																																																																					
0.552207	.80																																																																																					
0.523660	.85																																																																																					
0.604320	.95																																																																																					
0.630738	1.00																																																																																					
EER (%)	λ																																																																																					
3.784908	0																																																																																					
3.374344	.05																																																																																					
2.729244	.10																																																																																					
1.923809	.15																																																																																					
1.582114	.20																																																																																					
1.444359	.25																																																																																					
1.279870	.30																																																																																					
1.427506	.35																																																																																					
1.133696	.40																																																																																					
0.793804	.45																																																																																					
0.878169	.50																																																																																					
0.725901	.55																																																																																					
0.495692	.60																																																																																					
0.789819	.65																																																																																					
0.485437	.70																																																																																					
0.717774	.75																																																																																					
0.643732	.80																																																																																					
0.485437	.85																																																																																					
0.589459	.95																																																																																					
0.811663	1.00																																																																																					

BIBLIOGRAFÍA

- [Ach97] B. Achermann, X. Jiang and H. Bunke. Face recognition using range images. Proceedings International Conference on Virtual Systems and MultiMedia, Geneva, Switzerland. Páginas 129-136 (September 1997).
- [Ahl01] Ahlberg, J.: CANDIDE-3 - an updated parameterized face. Technical Report LiTHISY- R-2326. Dept. of Electrical Engineering, Linköping University. (2001)
- [Ans03] Ansari, A., Abdel-Mottaleb, M.: 3D Face modeling using two views and a generic face model with application to 3D face recognition. Proceedings of the IEEE Conference on Advanced Video and Signal Based Surveillance. (2003) 37–44
- [BAN03] Bailly-Baillière, E.; Bengio, S.; Bimbot, F.; Hamouz, M.; Kittler, J.; Mariéthoz, J.; Matas, J.; Messer, K.; Popovici, V.; Porée, F.; Ruiz, B. and Thiran, J.-P. The BANCA Database and Evaluation Protocol. 4th International Conference on Audio- and Video-Based Biometric Person Authentication, AVBPA, Springer-Verlag, 2003, páginas 625-638.
- [Ben80] J. L. Bentley. Multidimensional Divide and Conquer. Communications of the ACM. Volume 23, Issue 4, páginas 214-229. 1980.
- [Ben05] Chiraz BenAbdelkader and Paul A. Griffin, Comparing and combining depth and texture cues for face recognition, Image and Vision Computing, Volume 23, Issue 3, 1 March 2005, Páginas 339-352.
- [Ber05] Bertino, E. and Sandhu, R. Database Security—Concepts, Approaches, and Challenges. IEEE Transactions on Dependable and Secure Computing, Vol. 2, No. 1, January-March 2005, páginas 2-19.
- [Bes92] P.J. Besl, N.D. McKay, A method for registration of 3-d shapes, IEEE Trans. Pattern Anal. and Mach. Intell. 14 (2) (1992) 239-256.
- [Beu00] Beumier, C., Acheroy, M.: Automatic 3D face authentication. Image and Vision Computing. 18 (2000) 315–321
- [Beu01] Beumier, C., Acheroy, M.: Face verification from 3D and grey level clues. Pattern Recognition Letters. 22 (2001) 1321–1329
- [BIOSEC] www.biosec.org
- [Bla02] Blanz, V., Romdhani, S., Vetter, T.: Face Identification across different poses and illuminations with a 3D morphable model. Proceedings of the IEEE International Automatic Face and Gesture Recognition. (2002)
- [Bla03] Blanz, V., Vetter, T.: Face Recognition Based on Fitting a 3D Morphable Model. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 25 (2003)
- [Boe04] C. Boehnen and T. Russ. A fast multi-modal approach to facial feature detection. In Workshop on Applications of Computer Vision, 2004
- [Bol04] R.M. Bolle, J.H. Connell, S. Pankanti, N.K. Ratha and A.W. Senior. Guide to Biometrics. Series: Springer Professional Computing. 2004. ISBN: 0-387-40089-3
- [Boo97] F. L. Bookstein. Shape and the information in medical images: A decade of the morphometric synthesis. Computer Vision and Image Understanding, 77(2):97–118, 1997.
- [Bow04] Bowyer, K.W., Chang, K., Flynn, P.J.: A survey of approaches to three-dimensional face recognition. International Conference of Pattern Recognition, Vol I. (2004) 358–361
- [Bro03] M. Bronstein A. Bronstein and R. Kimmel, "Expression invariant 3d face recognition," in *Proc. AVBPA. 2003, Lecture Notes on Computer Science*, pp. 62–69, Springer.
- [Bro05] A. M. Bronstein, M. M. Bronstein, R. Kimmel, "Expression-invariant face recognition via spherical embedding", *Proc. Intl. Conf. on Image Processing (ICIP)*, 2005

- [Cab04] Técnicas de reconocimiento facial mediante redes neuronales. Tesis Doctoral. Enrique Cabello Pardos. Universidad Politécnica de Madrid. Abril de 2004
- [Car89] J. Cartoux, J. Laprest and M. Richetin, Face authentication by profile extraction from range images. Proc. of IEEE Workshop on Interpretation of 3D Scenes, páginas 194-199 (1989).
- [Cha03] Chang, K.I., Bowyer, K.W., Flynn, P.J.: Multi-Modal 2D and 3D Biometrics for Face Recognition. Proceedings of the IEEE International Workshop on Analysis and Modeling of Faces and Gestures. (AMFG 2003). Page(s):187 - 194
- [Cha05] Chang, K.I.; Bowyer, K.W.; Flynn, P.J. An evaluation of multimodal 2D+3D face Biometrics. Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on. April 2005. Volume: 27, Issue: 4. Páginas 619- 624.
- [Che95] R. Chellapa, C. L. Wilson, S. Sirohey, Human and Machine Recognition of Faces : a Survey. Proceedings of the IEEE, Volumen 83, Nº 5, páginas 705-740. Mayo 1995.
- [Chu96] Chua, C.S. and Jarvis, R., 1996. 3d free-form surface registration and object recognition. *Internat. J. Comput. Vision* **17** 1, pp. 77–99
- [Chu00] C. Chua, F. Han and Y. Ho, 3D human face recognition using point signature. International Conference on Automatic Face and Gesture Recognition, páginas 233-238 (2000).
- [Col05] D. Colbry, G. Stockman and A. Jain, "Detection of Anchor Points for 3D Face Verification", Proc. IEEE Workshop on Advanced 3D Imaging for Safety and Security A3DISS, San Diego, CA, June 25, 2005.
- [Con03a] C. Conde, A. Ruiz and E. Cabello. PCA vs Low Resolution Images in Face Verification. Proceedings 12th International Conference on Image Analysis and Processing. IEEE Computer Society. Septiembre 2003. ISBN: 0-1695-1948-2
- [Con03b] C. Conde, A. Ruiz, L. Pastor and E. Cabello. Face Verification using SVM, Influence of Illumination. "Applications and Science in Soft Computing". Springer Verlag. Advances in Soft Computing Series. Noviembre 2003. ISSN: 1434-9922
- [Con05a] C. Conde , R. Cipolla , L. J. Rodríguez-Aragón, A. Serrano and E. Cabello. 3D Facial feature location with Spin Images. Conference on Machine Vision Applications 2005. The International Association for Pattern Recognition (IAPR). Páginas 418-427. Mayo 2005. ISBN: 4-901122-04-5
- [Con05b] C. Conde, A. Serrano, L. J. Rodríguez-Aragón and E. Cabello. 3D facial normalization with spin images and influence of range data calculation over face verification. In IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2005.
- [Coo04] Cook, J.; Chandran, V.; Sridharan, S.; Fookes, C.; Face recognition from 3D data using Iterative Closest Point algorithm and Gaussian mixture models. 3D Data Processing, Visualization and Transmission, 2004. 3DPVT 2004. Proceedings. 2nd International Symposium on 6-9 Sept. 2004 Page(s):502 – 509.
- [Cor95] Cortes and Vapnik, V.: Support vector network. Machine Learning. 20 (1995).273–297.
- [Dou02] Douros, I., Buxton, B.F.: Three-Dimensional Surface Curvature Estimation using Quadric Surface Patches. Proceedings of the Scanning 2002 Conference. (2002)
- [Ela01] Elad, A., Kimmel, R. Bending invariant representations for surfaces, Proc. CVPR (2001).
- [FER98] Phillips, P. J.; Wechsler, H.; Huang, J. and Rauss, P. J. The FERET database and evaluation procedure for face-recognition algorithms. Image and Vision Computing, Vol. 16, April 1998, páginas 295-306.
- [Fis86] Fisher and Lee. Correlation Coefficients for Random Variables on a Unit Sphere or Hypersphere: *Biometrika* 73 p.159-164 (1986).

- [Fis87] Fisher N.I. and Lewis T. and Embleton B.J.J. .Statistical analysis of spherical data : The Cambridge University Press (1987)
- [Fly03] P. J. Flynn, K. W. Bowyer, and P. J. Phillips Assessment of time dependency in face recognition: An initial study. In Audio-and Video-Based Biometric Person Authentication, páginas 44–51, 2003.
- [FRAV] <http://frav.escet.urjc.es>
- [Fri77] J. H. Friedman, J. L. Bentley and R. A. Finkel. An Algorithm for Finding Best Matches in Logarithmic Expected Time. ACM Transactions on Mathematical Software. Volume 3, issue 3, páginas 209-226. September 1977.
- [FRVT] [http:// www.frvt.org](http://www.frvt.org)
- [Gor91] G. Gordon, Face recognition based on depth maps and surface curvature. SPIE Geometric Methods in Computer Vision, San Diego CA., 1570 (1991).
- [Gor92] G. Gordon, Face recognition based on depth and curvature features. Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), páginas 108-110 (June 1992).
- [Gro02] Gross, R. Handbook of Face Recognition, Face Databases. Editors Li, S. and Jain, A. Springer-Verlag, 2005.
- [Hei03] Heisele, B., Koshizen, T.: Components for Face Recognition. Proceedings of the Audio- and Video-Based Biometric Person Authentication, Vol 2688. (2003) 153–159
- [Hes03] C. Heshner, A. Srivastava and G. Erlebacher, A novel technique for face recognition using range imaging. Seventh International Symposium on Signal Processing and its Applications (2003).
- [Hes04] Three T. Heseltine, N. Pears, and J. Austin. Three dimensional face recognition using surface space combinations. In Proceedings of the British Machine Vision Conference, 2004.
- [Hor87] Horn, B. K. P., Closed-form solution of absolute orientation using unit quaternions. Journal of the Optical Society of America A, Vol. 4, No. 4, 1987, pp. 629-642.
- [Hua03] Huang, J., Heisele, B., Blanz, V.: Component-Based Face Recognition with 3D Morphable Models. Proceedings of the Audio- and Video-Based Biometric Person Authentication, Vol 2688. (2003) 27–34
- [Irf04] Irfanoglu, M.O.; Gokberk, B.; Akarun, L.; 3D shape-based face recognition using automatically registered facial surfaces. Pattern Recognition, 2004. ICPR 2004. Proceedings of the 17th International Conference on. Volume 4, 23-26 Aug. 2004 Page(s):183 - 186 Vol.4
- [Jai04] Jain, A. K.; Ross, A. and Prabhakar, S. An Introduction to Biometric Recognition. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, Vol. 14, No. 1, January 2004, páginas 4-20.
- [Jes01] O. Jesorsky, K. Kirchberg, and R. Frischholz . Robust face detection using the hausdorff distance. In Audio and Video based Person Authentication, páginas 90–95, 2001.
- [Joh97] A.E. Johnson. Spin-images: “A representation for 3-D surface matching.” PhD Thesis. Robotics Institute. Carnegie Mellon University. 1997.
- [Joh98] A. E. Johnson, M.Hebert.: Surface matching for object recognition in complex three-dimensional scenes. Image Vision Computing, 1998, 16: 635-651.
- [Joh99] A. E. Johnson, M.Hebert.: Using Spin Images for efficient object recognition in cluttered 3D scenes. IEEE Trans. PAMI.1999, 21(5): 433-449
- [Kim98] Kimmel, R., Sethian, J. A. Computing geodesic on manifolds. Proc. US National Academy of Science 95, pp. 8431–8435 (1998).

- [Kit05] J. Kittler, A. Hilton, M. Hamouz, J. Illingworth. 3D Assisted Face Recognition: A Survey of 3D Imaging, Modelling and Recognition Approaches. Proc. IEEE Workshop on Advanced 3D Imaging for Safety and Security A3DISS, San Diego, CA, June 25, 2005.
- [Kon05] S. Kong, J. Heo, B. Abidi, J. Paik and M. Abidi. Recent advances in visual and infrared face recognition: a review. Computer Vision and Image Understanding. Volumen 97, N° 1, páginas 103-135, 2005.
- [Krs98] P. Krsek, G. Luckacs, R. R. Martin. Algorithms for Computing Curvatures from Range Data. in RECCAD Deliverable Document 4 Copernicus Project No. 1068, Eds. R. R. Martin, T. Varady. Report GML 1998/4, Computer and Automation Institute, Hungarian Academy of Sciences, Budapest, 1998.
- [Kur04] T. Kuratate and E. Vatikiotis-Bateson. Estimating 3d face expression postures for animation from photographs using a 3d face database. In Proceedings of the Eurographics/ACM SIGGRAPH Symposium on Computer Animation, 2004.
- [Lao00] S. Lao, Y. Sumi, M. Kawade and F. Tomita, 3D template matching for pose invariant face recognition using 3d facial model built with isoluminance line based stereo system. International Conference on Pattern Recognition, 2: 911- 916 (2000).
- [Lee90] J. Lee and E. Miliotis, Matching range images of human faces. Proc. IEEE Soc. 3rd International Conference on Computer Vision, páginas 722-726 (1990).
- [Lee05] Yongjin Lee, Kyunghee Lee and Sungbum Pan. Local Featured Based Face Recognition. Audio- and Video-Based Biometric Person Authentication: 5th International Conference, AVBPA 2005 Proceedings, pp219, NY, USA, 2005
- [Li05] Handbook of Face Recognition. Stan Z. Li and Anil K. Jain (Eds.) 2005. Springer. New York. ISBN: 0-387-40595-X
- [Lu04] X. Lu, D. Colbry and A. Jain, Three-dimensional model based face recognition. International Conference on Pattern Recognition, páginas 362-366 (2004).
- [Lyc01] Tom Lyche and Larry L. Schumaker (eds.): Mathematical Methods for Curves and Surfaces. Oslo 2000. pp. 135–146. Copyright 2001 by Vanderbilt University Press, Nashville, TN. ISBN 0-8265-1378-6.
- [Mal05] S. Malassiotis and M.G. Strintzis. Robust Real-time 3D Head Pose Estimation from Range Data. Pattern Recognition, Vol.38. N°8, pp. 1153-1165. Agosto 2005.
- [Mar01] Mavridis, N., Tsalakanidou, F., Pantazis, D., Malasiotis, S., Strintzis, M.: The HISCORE face recognition application: A.ordable desktop face recognition based on a novel 3D camera. Proceedings of the International Conference on Augmented Virtual Environments and 3D Images. (2001).
- [Mat05] S. Mata, C. Conde, A. Sanchez y E. Cabello. Influence of location over several classifiers in 2D and 3D face verification. Studies in Biometrics. Lecture Notes in Computer Science 3161. Springer Verlag. Páginas 153-158. Mayo 2005. ISBN: 3-540-26204-0
- [Med03] G. Medioni and R. Waupotitsch, Face modeling and recognition in 3-D. IEEE nternational Workshop on Analysis and Modeling of Faces and Gestures, páginas 232-233 (October 2003).
- [Mes99] K. Messer, J. Matas, J. Kittler, and K. Jonsson. XM2VTSDB: The extended M2VTS database. In Audio and Video-Based Biometric Person Authentication, páginas 72–77, Washington, D.C., mar 1999.
- [MIN] “Minolta VIVID 700 3D laser scanner” <http://kmpi.konicaminolta.us/vivid>
- [Mon00] R. Montes Diez. Optimal Design of Two-Stage Screens: A Bayesian Approach. PhD. Thesis. University of Nottingham. Maths and Science Dpt. 2000.
- [Moe71] A. Moenssens, Fingerprint Techniques. Chilton Book Co., 1971.
- [Mon04] "Automatic Detection of the Optimal Acceptance Threshold in a Face Verification System". Autores: Montes Diez, R.; Conde, C.; Cabello, E. Lecture Notes in Computer Science. Biometric Authentication: ECCV 2004 International Workshop, BioAW 2004, Prague, Czech

Republic, May 15th, 2004. Proceedings. Volumen: LNCS 3087 / 2004. Páginas: 70-79. Fecha: 2004.

[Mon05] "Optimization Of A Face Verification System Using Bayesian Screening Techniques". Autores: Montes Diez, R.; Conde, C.; Serrano, Á.; Rodríguez-Aragón, L.J.; Cabello, E. Fecha: Febrero 2005. Páginas: 427-432. IASTED International Conference on Artificial Intelligence And Applications. Innsbruck, Austria.

[MPI] <http://faces.kyb.tuebingen.mpg.de/>

[Naf02] Naftal, A.J., Mao, Z., Trenouth, M.J.: Stereo-assisted landmark detection for the analysis of 3D facial shape changes. Technical Report TRS-2002-007. Deptment of Computation UMIST, Manchester. (2002)

[Nag92] T. Nagamine, T. Uemura and I. Masuda, 3D facial image analysis for human identification. International Conference on Pattern Recognition, páginas 324-327 (1992).

[Nav02] Nanavati, S.; Thieme, M. and Nanavati, R. Biometrics, identity verification in a networked world. Ed. John Wiley & sons, Tech Brief Series, 2002.

[Nut88] A. W. Nutbourne, R. R. Martin. Differential Geometry Applied to Curve and Surface Design, Ellis Horwood, 1988.

[PA74] Privacy Act of 1974, Public Law (P.L.) 93-579, Title 5, United States Code Section 552a.

[Pan03]G. Pan, Z. Wu and Y. Pan, Automated 3D face verification from range data. International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing, páginas 192-196 (2003).

[Peñ01] Daniel Peña Sánchez de Rivera. Fundamentos de estadística. Alianza 2001. ISBN 84-206-8696-4.

[Phi02] J. Phillips, P. Grother, R. Micheals, D. Blackburn, E. Tabassi and M. Bone, Facial recognition vendor test 2002. Evaluation report <http://www.frvt2002.org>).

[Phi05] P. J. Phillips, P. J. Flynn, T. Scruggs, K. W. Bowyer, J. Chang, K. Ho_man, J. Marques, J. Min, and W. Worek. Overview of the face recognition grand challenge. In IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, páginas 947-954, 2005.

[Rab86] L. R. and Juang, B. H., An introduction to hidden Markov models. IEEE ASSP Magazine. Enero 1986. paginas 4-15

[RN45/2001] On the protection of individuals with regard to the processing of personal data by the community institutions and bodies and on the free movement of such data. Regulation No 45/2001 of the European Parliament and of the Council of 18 December 2000.

[Rod05] L. Rodriguez-Aragon, C. Conde, Á. Serrano and E. Cabello. Face verification advances using spatial dimension reduction methods: 2DPCA & SVM. Proceedings 13th International Conference on Image Analysis and Processing .Lecture Notes in Computer Science. LNCS 3617. Pag 978-985. Springer Verlag. Sept 2005.

[Rom03] Romdhani, S., Vetter, T.: Efficient, Robust and Accurate Fitting of a 3DMorphable Model. Proceedings of the European Conference on Computer Vision. (2003).

[Ros03] Arun Ross and Anil Jain, Information fusion in biometrics, Pattern Recognition Letters, Volume 24, Issue 13, September 2003, Páginas 2115-2125.

[Rus04] T. Russ, K. Koch and C. Little, 3D face recognition: a quantitative analysis. 45-th Annual Meeting of the Institute of Nuclear Materials Management (2004).

[Sar01] N.Sarris, N. Grammalidis, M.G. Strintis, Building three-dimensional head models, Graphical Models 63 (5) (2001) 333-368.

[Sch05] Alize Scheenstra, Arnout Ruifrok, Remco C. Veltkamp, A Survey of 3D Face Recognition Methods, Lecture Notes in Computer Science, Volume 3546, Jun 2005, Páginas 891 – 899

- [Ser04] A. Serrano, S. Mata, A. Ruiz, C. Conde, L. J. Rodríguez-Aragón, L. Pastor and E. Cabello. Visor-Compliant Face Verification Video Sensor. Technical Report .Universidad Rey Juan Carlos. Agosto 2004. ISBN: 84/688-7875-8.
- [Sim94] D. Simon, M.Hebert, T.Kanade, Real-time 3-d pose estimation using a high-speed range sensor, IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA'94).Vol.3, 1994, pp.2235-2241.
- [Sne05] R. Snelick, U. Uludag, A. Mink, M. Indovina, and A. Jain, " Large Scale Evaluation of Multimodal Biometric Authentication Using State-of-the-Art Systems", *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* , Vol. 27, No. 3, pp. 450-455, March 2005.
- [Sui04] Suikerbuik, C.A.M., Tangelder, J.W.H., Daanen, H.A.M., Oudenhuijzen, A.J.K. : Automatic feature detection in 3D human body scans. Proceedings of the conference "SAE Digital Human Modelling for Design and Engineering. (2004).
- [Sun98] Sung, K.-K. and Poggio, Example-based learning for view-based human face detection. T. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 20, issue 1, 1998, páginas 39-51.
- [Tan98] H. Tanaka, M. Ikeda and H. Chiaki, Curvature-based face surface recognition using spherical correlation - principal directions for curved object recognition. 3rd International Conference on Automatic Face and Gesture Recognition, páginas 372-377 (1998).
- [The99] Sergios Theodoridis and Konstantinos Koutroumbas: Pattern Recognition. Academic Press. 1999. Chapter 11.
- [Tis05] M.Tistarelli, J.Bigun, and E.Grosso (Eds.): Biometrics School 2003, LNCS 3161, pp. 1–18, 2005. Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2005.
- [Tor04] L. Torres, Is there any hope for face recognition?, Proc. of the 5th International Workshop on Image Analysis for Multimedia Interactive Services, WIAMIS 2004, 21-23 April 2004, Lisboa, Portugal.
- [Tsa03] Tsalakanidou, F., Tzovaras, D., Strintzis, M.G.: Use of depth and colour eigenfaces for face recognition. Pattern Recognition Letters. 24 (2003) 1427–1435
- [Tsa04] Tsalakanidou, F., Malassiotis, S., Strintzis, M.G.: Integration of 2D and 3D images for Enhanced Face Authentication. Proceedings of the IEEE International Conference in Automatic Face and Gesture Recognition. (2004) 266–271
- [Tsa05] F. Tsalakanidou, F. Forster, S. Malassiotis and M.G. Strintzis. "Real-time acquisition of depth and color images using structured light and its application to 3D face recognition. Elsevier Real-Time Imaging, Special Issue on Multi-Dimensional Image Processing, Vol. 11, No 5-6, pp.358-369, December 2005.
- [Tur91] M. Turk, A. Pentland. Eigenfaces for Recognition. Journal of Cognitive Neuroscience. V 3, N 1, P 71-86. 1991.
- [USF] USF DARPA Human-ID 3D Face Database, Courtesy of Prof. Sudeep Sarkar, University of South Florida, Tampa, FL. <http://marthon.csee.usf.edu/HumanID/>
- [Wan02] Y. Wang, C. Chua, Y. Ho, Facial feature detection and face recognition from 2D and 3D images , *Pattern Recognition Letters*, vol. 23, no. 10, August 2002, pp. 1191-1202.
- [Wis97] [Wiskott](#), L., Fellous, J., Kruger, N. and von der Malsburg, C., 1997. Face recognition by elastic bunch graph matching. *IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell.* **19** 7, pp. 775–779.
- [Won04] Wong, H.S., Chueng, K.K.T., Ip, H.H.S.: 3D head model classification by evolutionary optimization of the extended Gaussian image representation. Pattern Recognition. 37 (2004) 2307–2322
- [Wu03] Wu, Y., Pan, G., Wu, Z.: Face Authentication Based on Multiple Pro.les Extracted from range data. Proceedings of the Audio- and Video-Based Biometric Person

Authentication, Vol. 2688. (2003) 515–522

[Xu04a] C. Xu, Y. Wang, T. Tan and L. Quan, Automatic 3D face recognition combining global geometric features with local shape variation information. Sixth International Conference on Automated Face and Gesture Recognition, páginas 308-313 (May 2004).

[Xu04b] Depth vs. intensity: which is more important for face recognition?. Chenghua Xu; Yunhong Wang; Tieniu Tan; Long Quan; Pattern Recognition, 2004. ICPR 2004. Proceedings of the 17th International Conference on Volume 1, 23-26 Aug. 2004 Page(s):342 – 345.

[Zha03a] W. Zhao, R. Chellappa and A. Rosenfeld, Face recognition: a literature survey. ACM Computing Surveys, 35: 399-458 (December 2003).

[Zha03b] L. Zhang and D. Samaras. Face recognition under variable lighting using harmonic image exemplars. In the Proceedings of the IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, volume 1, páginas 19–25, 2003.

