

Máster Universitario en Ingeniería Informática

INTELIGENCIA COMPUTACIONAL

TRABAJO TEÓRICO

APLICACIÓN DE LA LÓGICA DIFUSA A LA IDENTIFICACIÓN FORENSE



**UNIVERSIDAD
DE GRANADA**



Carlos Morales Aguilera
Carlos Santiago Sánchez Muñoz

30 de noviembre de 2020

Índice

| | |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 1. Resumen | 2 |
| 2. Introducción | 2 |
| 3. Estado del arte | 3 |
| 3.1. Introducción | 3 |
| 3.2. Uso de técnicas | 4 |
| 3.2.1. Escenarios de Identificación y Naturaleza de la Investigación | 4 |
| 3.2.2. Distribución geográfica | 7 |
| 3.3. Métodos y herramientas | 8 |
| 3.3.1. Landmarks | 9 |
| 3.3.2. Revisión de la literatura | 9 |
| 3.3.3. Conclusiones | 10 |
| 4. Modelo | 10 |
| 4.1. Superposición de cráneo-cara | 10 |
| 4.1.1. Métrica de distancia | 14 |
| 4.2. Decisión | 16 |
| 4.2.1. Evaluación de criterios | 17 |
| 4.2.2. Evaluación SFO (Skull-face Overlay) | 18 |
| 4.2.3. Evaluación CFS (Craniofacial superimposition) | 20 |
| 5. Resultados | 22 |
| 5.1. Etapa de superposición de cara de cráneo: modelado del estudio de distancias difusas e incertidumbre de coincidencia de puntos de referencia | 22 |
| 5.2. Etapa de toma de decisiones: desarrollo jerárquico del sistema de apoyo a las decisiones | 23 |
| 5.3. Experimentos realizados | 24 |
| 5.3.1. Experimento 1: Correspondencia de puntos de referencia con incertidumbre | 24 |
| 5.3.2. Experimento 2: Distancias difusas | 26 |
| 6. Conclusiones | 26 |
| 6.1. Próximas vías de desarrollo y mejoras | 27 |
| 6.2. Conclusión final | 27 |
| 7. Bibliografía | 28 |

1. Resumen

A lo largo de la historia se han acontecido numerosas técnicas de investigación y estudio del cuerpo humano en la medicina forense con el objetivo de investigar causas de la muerte, situación, lugar y hora exacta. Sin embargo, uno de los principales problemas en este campo de investigación es la identificación de individuos a partir de un esqueleto, el cual resulta ser siempre el último recurso en este campo.

El principal problema consiste en que el esqueleto de por sí no proporciona una información exacta u objetiva que permita identificar a un determinado individuo, tal y como pueden hacerlo otros elementos como el ADN, por lo que este recurso suele presentarse como el último recurso ya que existen otros métodos más fáciles y exactos de identificación de un cadáver.

Además, dentro del campo de investigación, pese a haber llegado a enfoques que obtienen resultados considerables, no llegan a presentar un modelo realmente fiel a la anatomía humana ya que no se considera un factor tan importante como es el tejido humano, el cual ocupa un espacio, y es algo impreciso, ya que no se trata de un factor que se pueda medir de forma exacta.

Por lo tanto se propone la lógica difusa mediante la superposición de imágenes como una solución alternativa a la par que fiable, capaz de reconocer individuos mediante la morfología de un cráneo y su correspondencia mediante visualización por computadores con fotografías de personas, considerando conjuntos difusos y representación de este tejido previamente mencionado.

¿Entonces puede mejorar este enfoque al previamente recogido en enfoques como el existente *RCGA*? A continuación veremos como se desarrolla esta idea, de que factores se compone y como puede resultar en una mejora de cara al reconocimiento de personas mediante un análisis craneal.

2. Introducción

Algunos científicos datan el comienzo de la ciencia o medicina forense ("tribunal abierto.^{en} latín) en el 275 A.C., donde se encuentra la historia de el Rey de Siracusa, Arquímedes y la corona de plata, donde se determinó la *Ley de Arquímedes* sobre los volúmenes. Esto dió lugar a una ciencia en la que se investigaban las causas de un delito en base a unas pruebas no evidentes mediante análisis.

Otros historiadores datan sus inicios en 1302, al realizarse la primera autopsia en Bolo-
nia, cuando el Dr. Bartolomeo da Varignana examinó los cuerpos de personas fallecidas en circunstancias sospechas y con causa de muerte no determinada. Sin embargo, las técnicas eran limitadas y los resultados distan mucho de los obtenidos en la actualidad.

Tras esta primera autopsia empezó a crecer un nuevo campo de investigación dando lugar a lo que hoy en día se conoce como la ciencia forense. Surgieron entonces numerosas técnicas y herramientas que mejoraban los resultados, conclusiones y precisión obtenidas,

como el microscopio en 1590 o la detección de envenenamientos en 1831 mediante pruebas químicas.

No fue hasta el año 2000 que los avances tecnológicos no entraron en este campo, ya que hasta entonces tomaron lugar numerosas ciencias como la química, biología o física entre otras, pero campos más novedosos como la informática empezaron a tener su repercusión en este ámbito recientemente. Desde entonces han surgido nuevas técnicas como el Análisis de conducción cruzada, Análisis estocástico o la Antiesteganografía. Sin embargo estas aplicaciones están más relacionadas con los datos que con el reconocimiento forense en sí.

Entonces la pregunta que se plantea es: ¿Sería posible mejorar el reconocimiento de cadáveres aplicando métodos de inteligencia artificial? La respuesta evidentemente es sí, mediante diferentes metodologías, dando lugar a numerosas ramas de estudio, pero no en todas ellas se obtiene la misma información, ya que en todos los casos se pueden obtener datos objetivos y específicos, por lo que entonces se llega a un punto muerto donde si las técnicas previas no son útiles, no habría forma de determinar la correspondencia de un cadáver con una persona.

En este punto toma lugar la Lógica Difusa, donde mediante técnicas de correspondencia de puntos morfológicos y superposición craneofacial, pretende resolver la identificación y asignación de características de un individuo y el análisis de correspondencia morfológica.

3. Estado del arte

En esta sección vamos a abordar el estado del arte de esta técnica, la superposición craneofacial (Craniofacial superimposition, CFS). La bibliografía de esta parte es [ICD17].

3.1. Introducción

Un análisis completo de la literatura científica sobre los casos resueltos con CFS se ha llevado a cabo para determinar la prevalencia de CFS entre los científicos forenses, esto es, la proporción de forenses que han usado dicha técnica. Sin embargo, dado que muchos expertos que trabajan con CFS pueden no haber publicado su actividad en el campo, el proyecto “Methodologies and Protocols of Forensic Identification by Craniofacial Superimposition” (MEPROCS) lanzó una encuesta entre los antropólogos, un proyecto que tenía como objetivo proponer un Marco de la UE para permitir la amplia aplicación de la técnica CFS en escenarios prácticos de identificación forense, comúnmente abordados por las unidades de policía científica europeas.

El cuestionario fue elaborado por el Centro Europeo de Soft Computing (España), basándose en los requisitos y la experiencia científica de los investigadores forenses de la Universidad de Granada (España), la Universidad de Coimbra (Portugal), la Guardia Civil (España) y la Policía de Israel. Esta encuesta se envió a aproximadamente 600 científicos forenses en todo el mundo, durante un período de 3 meses. Los datos fueron proporcionados por investigadores forenses de universidades y agencias de aplicación de la ley de 32 países de América del Norte, Central y del Sur; Europa; Asia; y Africa. Se recibieron un

total de 97 respuestas. De estos, 45 investigadores respondieron que han utilizado el CFS como método de identificación en diversas investigaciones.

La encuesta estuvo compuesta por 16 preguntas que abordan cuestiones relacionadas con el número de casos emprendidos en los últimos 30 años; clasificados según diferentes escenarios de identificación (fosas comunes, terrorismo, personas desaparecidas y fosas comunes); el número de horas empleadas en la realización de CFS; resultados de identificación; si los resultados se presentaron en la corte; los materiales, herramientas y técnicas utilizadas; y los principales problemas enfrentados en la aplicación del CFS.

De las 97 respuestas, el 56 % fueron positivas, es decir, el investigador informó haber usado CFS de manera regular o haber usado CFS en el pasado. El siguiente informe aborda solo las respuestas positivas.

3.2. Uso de técnicas

De la encuesta MEPROCS, se reportaron un total de 3854 casos de CFS: de estos, 2744 (71,2 %) fueron presentados en un tribunal de justicia y 1246 (32,3 %) de ellos resultaron en una identificación positiva. La mayoría de los casos (2489) no fueron clasificados por los encuestados en ninguna de las categorías sugeridas en la encuesta. Las siguientes subsecciones están dedicadas a un análisis en profundidad de las respuestas de los participantes, según las principales cuestiones planteadas. Los datos fueron proporcionados por investigadores forenses de universidades y agencias policiales de todo el mundo.

Más del 50 % de los investigadores han implementado CFS en solo un pequeño número de casos (1 a 10 casos durante un período de 10 años) principalmente en investigaciones de personas desaparecidas o homicidios, mientras que los encuestados restantes informaron un mayor número de casos (más de 20 casos).

3.2.1. Escenarios de Identificación y Naturaleza de la Investigación

Según el escenario de identificación, hemos definido un sistema de clasificación en función del número de candidatos a identificar y el número de posibles coincidencias: un candidato, una lista abierta o una lista cerrada de candidatos. La lista abierta se considera un evento que resulta en la muerte de un número indeterminado de individuos desconocidos, para los cuales no hay datos o registros disponibles. Las listas cerradas, por otro lado, son aquellas en las que se ha producido la muerte de un grupo conocido de personas identificables. La primera categoría de esta clasificación es la presunta identidad de un solo candidato (presumed identity of only one individual candidate, PIOI). La segunda y tercera categorías son la presunta identidad de un individuo dentro de una lista cerrada de posibles candidatos (presumed identity of an individual within a closed list of possible candidates, PICL) o la identidad desconocida de un individuo dentro de una lista cerrada de posibles candidatos (unknown identity of an individual within a closed list of possible candidates, UICL). La última categoría es la identidad desconocida de un individuo dentro de una lista abierta (unknown identity of an individual within an open list, UIOL). Finalmente, CNC (cases not classified by the responders) denota aquellos casos no clasificados por los respondedores.

La Tabla 1 muestra la clasificación del número total de casos de CFS notificados por los participantes en la encuesta según la naturaleza de la investigación. El escenario más común es la presunta identidad de un solo candidato individual (545 casos). Las dos categorías diferentes que consideran una lista cerrada incluyen 670 casos, mientras que la lista abierta se aplicó en al menos 150 casos.

| Escenario | Id. positiva | Exclusión | Indeter. | No clasificado | Total |
|-----------|---------------|------------|------------|----------------|---------------|
| PIOI | 451 (11.7 %) | 33 (0.9 %) | 61 (1.6 %) | – | 545 (14.1 %) |
| PICL | 309 (8.0 %) | 4 (0.1 %) | 19 (0.5 %) | – | 332 (8.6 %) |
| UICL | 336 (8.7) | – | 2 (0.1 %) | – | 338 (8.8 %) |
| UIOL | 150 (3.9 %) | – | – | – | 150 (3.9 %) |
| CNC | – | – | – | 2489 (64.6 %) | 2489 (64.6 %) |
| Total | 1246 (32.3 %) | 37 (1.0 %) | 82 (2.1 %) | 2489(64.6 %) | 3854(100.0 %) |

Tabla 1: Uso de CFS reportado por 45 investigadores

Todos los casos se clasificaron además según la naturaleza de la investigación abordada. Hemos distinguido los siguientes cuatro:

- Los *desastres masivos* se definen como eventos naturales o provocados por el hombre, que causan la muerte o lesiones a un gran número de personas. Estos incluyen desastres naturales causados por inundaciones, fenómenos climáticos y geofísicos y epidemias o pandemias, y desastres provocados por el hombre, causados por acciones del hombre, intencionales o no, como guerras, desastres civiles o accidentes.
- El *terrorismo* puede definirse como una actividad humana diseñada para causar daño, utilizando violencia premeditada con fines políticos o religiosos.
- Las *personas desaparecidas*, de acuerdo con el RCIC (Red Cross International Committee), son aquellas personas de las que sus familiares no tienen noticias y/o que, sobre la base de información fidedigna, han sido reportadas como desaparecidas como resultado de un conflicto armado. internacional o no internacional, causa de violencia interna, disturbios internos, o cualquier otra situación que requiera la intervención de una autoridad pública neutral e independiente o cuando los cuerpos carezcan de información para su identificación, en virtud de una investigación médico-legal de la persona fallecida.
- Las *fosas comunes* son lugares donde se entierra un número indeterminado de personas como consecuencia de la guerra, la guerra de guerrillas o como resultado de desastres masivos. A menudo, la exhumación y el estudio de restos óseos de fosas comunes implican una serie de procedimientos largos y costosos. Se han sugerido varios protocolos; en su mayoría modificado del Manual de la ONU sobre la prevención e investigación efectivas de ejecuciones extralegales, arbitrarias y sumarias [VE94], en el que se sugieren cinco fases diferentes para el estudio de restos óseos: investigaciones preliminares, investigación de exhumaciones, investigación forense estudio, informe final y destino final de restos óseos [PJM09].

La Tabla 2 resume las respuestas según el escenario en el que se aplicó el CFS. Lamentablemente, la mayoría de los encuestados (82,1 %) no clasificaron sus casos.

| Nature of the investigation | Cases |
|------------------------------------|----------------|
| Terrorist attack | 15 (0.4 %) |
| Missing persons | 458 (11.9 %) |
| Mass casualty | 130 (3.4 %) |
| Mass grave | 87 (2.2 %) |
| Other | 3164 (82.1 %) |
| Total | 3854 (100.0 %) |

Tabla 2: Clasificación de los resultados obtenidos en la encuesta según la naturaleza de la investigación

3.2.2. Distribución geográfica

La distribución mundial de casos de identificación de CFS entre los diferentes continentes y países se resume en la Tabla 3. India es el país en el que se han notificado la mayoría de los casos (1471), seguido de Perú (980).

| Continent/country | Cases | Percentage |
|---------------------------|-------|------------|
| Central and North America | 147 | 3.8 |
| Mexico | 105 | 2.7 |
| USA | 42 | 1.1 |
| South America | 1164 | 30.3 |
| Brazil | 6 | 0.2 |
| Chile | 2 | 0.1 |
| Peru | 980 | 25.4 |
| Uruguay | 176 | 4.6 |
| Asia | 2367 | 61.4 |
| China | 600 | 15.6 |
| Japan | 15 | 0.4 |
| Jordan | 5 | 0.1 |
| India | 1471 | 38.2 |
| Russia | 217 | 5.6 |
| Turkey | 58 | 1.5 |
| United Arab Emirates | 1 | 0.0 |
| Europe | 176 | 4.6 |
| Spain | 31 | 0.8 |
| Denmark | 10 | 0.3 |
| Italy | 20 | 0.5 |
| Lithuania | 80 | 2.1 |
| Netherland | 8 | 0.2 |
| UK | 7 | 0.2 |
| Romania | 20 | 0.5 |
| Total cases | 3854 | 100.1 |

Tabla 3: Casos de CFS agrupados por países

3.3. Métodos y herramientas

Se pidió a los investigadores que informaran sobre el método (manual, semiautomático o completamente automático) y el tipo de técnica de CFS utilizada, así como la fuente del material (fotografía, imagen de vídeo o digital) para la superposición. La Tabla 4 presenta la distribución de las diversas técnicas reportadas.

| | Superposición fotográfica | Superposición de vídeo | Superposición asistida por computadora | Respuestas totales |
|----------------------|--------------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------------------------------|-------------------------------|
| Manual | 20 | 3 | 8 | 31 |
| Semiautomatic | 10 | 3 | 5 | 18 |
| Automatic | 11 | 1 | 2 | 14 |
| Total | 41 | 7 | 15 | 63 |

Tabla 4: Distribución de técnicas reportadas

Las herramientas necesarias durante la implementación de la técnica se presentan en la Tabla 5.

| Respuesta | Porcentaje | Cantidad |
|--------------------|--------------------|-----------------|
| Rayos X | 12 | 4 |
| CTs | 12 | 4 |
| Escáner 3D | 12 | 4 |
| Sistema de vídeo | 15 | 6 |
| Banco de calaveras | 15 | 5 |
| Photoshop | 61 | 21 |
| Otros | 39 | 13 |
| | Total de repuestas | 34 |

Tabla 5: Herramientas implementadas en técnica

Otras respuestas incluyeron software como Photomodeler, Freeform Modeling System, Powerpoint, Geomagic y 3Dmax. El hardware utilizado incluyó dispositivos hápticos Phantom[®], cámaras fotográficas y varios tipos de escáneres.

3.3.1. Landmarks

Finalmente, se abordaron los hitos antropológicos. Un landmark es un punto craneofacial en donde se va a realizar la medición. Las respuestas de los investigadores con respecto a los puntos de referencia utilizados se presentan en la Tabla 6.

| Response | Frequency | Count |
|-----------------------------------------------|-----------|-------|
| Glabella | 38 % | 11 |
| Nasion | 38 % | 11 |
| Rhinion | 17 % | 5 |
| Nasospinale-Subnasale | 28 % | 8 |
| Alare-Alare | 31 % | 9 |
| Subspinale-Superior labial sulcus | 24 % | 7 |
| Prosthion-Upper lip border (Labiale superius) | 34 % | 10 |
| Infradentale superius-Lower lip border | 17 % | 5 |
| Incisor superius-Stomion | 10 % | 3 |
| Supramentale-Labiamentale | 14 % | 4 |
| Gonion | 38 % | 11 |
| Zygion | 31 % | 9 |
| Orbitale-Infraorbital | 17 % | 5 |
| Supraorbital | 10 % | 3 |
| Porion | 17 % | 5 |
| Supraglenoide | 10 % | 3 |
| Dacryon-Endocanthion | 34 % | 10 |
| Gnathion-Menton | 21 % | 6 |
| Gnathion | 38 % | 11 |
| Pogonion-Mental | 14 % | 4 |
| Pogonion | 14 % | 4 |
| Prosthion | 24 % | 7 |
| Menton | 7 % | 2 |
| Ectoconchion | 38 % | 11 |
| Frontozygomatic suture-Ectocanthion | 21 % | 6 |
| Other | 62 % | 18 |

Tabla 6: Landmarks usados

Otros puntos de referencia incluyeron la forma general del cráneo, el contorno de la cara y la bóveda del cráneo, medidas orbitales, forma orbital, ancho de los ojos, tubérculo de Whitnall, pliegue labial del mentón, contorno nasal (incluida la asimetría), trago, posición del meato auditivo, posición de los labios, dentición, mentón y ángulos mandibulares.

3.3.2. Revisión de la literatura

Las estadísticas obtenidas en la encuesta fueron similares a los datos encontrados en la literatura. Todos los trabajos revisados fueron clasificados de acuerdo a la naturaleza de la investigación, escenarios de identificación y resultados. La literatura revisada para el proyecto reveló que 26 artículos habían abordado la naturaleza de la investigación en la que se implementó el CFS y, posteriormente, habían sido sometidos a escrutinio judicial.

Cabe señalar que una gran cantidad de los casos remitidos a las autoridades judiciales incluyeron identificación por superposición, corroborada por otras técnicas de identificación, es decir, comparación de perfiles de ADN. Cuando no se pudo obtener corroboración, se utilizó como método de identificación la superposición, junto con el perfil antropológico. La mayoría de los artículos se clasificaron dentro de una categoría general “otros”, que en la mayoría de los casos incluía la identificación de casos únicos de cadáveres en diversas condiciones tafonómicas, o la identificación de personajes históricos como Mozart [PPG89].

3.3.3. Conclusiones

La encuesta internacional sobre el uso de CFS como método de identificación entre los investigadores forenses es una herramienta única que ha proporcionado una visión importante de este estado del arte de la técnica.

Los resultados del escrutinio de la literatura pertinente y la encuesta realizada entre investigadores forenses parecen indicar que el CFS se considera una técnica de identificación confiable y eficiente, aunque se implementa junto con otro método en muchos casos. De un total de 3854 casos notificados en todo el mundo, el 32,3 % resultó en la identificación positiva de restos, con 2744 (71,2 %) casos sometidos a escrutinio judicial.

4. Modelo

El principal objetivo a la hora de diseñar un modelo que sea capaz de realizar la función deseada, es detectar los factores que determinan su funcionamiento. Para ello hay que proporcionar un modelo que sea capaz de proporcionar un sistema que incorpore el modelado de la imprecisión relacionada con el espesor entre puntos de referencia del cráneo y la cara al método de superposición original.

A continuación se deben estudiar las correspondencias entre cráneo y cara, para poder obtener la información e imprecisión del problema. Por lo tanto se pueden distinguir tres fases dentro del proceso:

- Fase 1: Adquisición y procesamiento de los materiales.
- Fase 2: Superposición de cráneo-cara.
- Fase 3: Decisión.

Al igual que en todos los estudios, este trabajo se centrará en el análisis de la segunda y tercera fase, ya que la primera consiste en una preparación de datos e información que no están relacionados en sí con el tema del trabajo.

4.1. Superposición de cráneo-cara

Los primeros enfoques se basan en la superposición de una calavera modelada mediante tecnología 3D sobre una cara en una fotografía, minimizando la distancia entre pares de

puntos de referencia tratando la imprecisión [ICDS09, ICDS11, ICD12] debida a la localización exacta de dichos puntos de referencia [CGMG+13]. El proceso de minimización involucra la búsqueda de proyecciones específicas del modelo 3D que reduce las distancia entre puntos de referencia lo máximo posible. Sin embargo, no se considera el espesor de la piel como un elemento de cara a dicho análisis, por lo que no es una aproximación del todo fiel al problema planteado [CAM17].

Tras descubrir este problema, se propone un modelo que utiliza una capa de suavizado que imita el espesor de una piel utilizando para ello la teoría de conjuntos difusos [Zad96]. Este modelo utiliza las tecnologías previas pero a su vez considera las relaciones espaciales entre los diferentes puntos de referencia.

El primer enfoque trata de construir un modelo donde el centro es el punto de referencia craneal con un grado de pertenencia de cero, a partir de este punto se calculan los valores *max*, *min* y *mean*, en los tres ejes dimensionales. Este punto central se representa en el modelo como una esfera 3D con origen en el punto céntrico definido anteriormente.

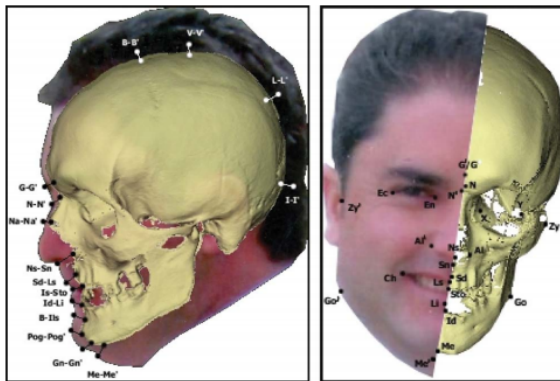


Imagen 1: Superposición de puntos de referencia y distancias [ICDS11]

Esta incertidumbre tal y como se puede observar se representa mediante una matriz 3D, y estas dimensiones representadas a su vez por conjuntos difusos λ_{B_x} , λ_{B_y} y λ_{B_z} . Los cuales son definidos a partir del centro c con su dimensión correspondiente.

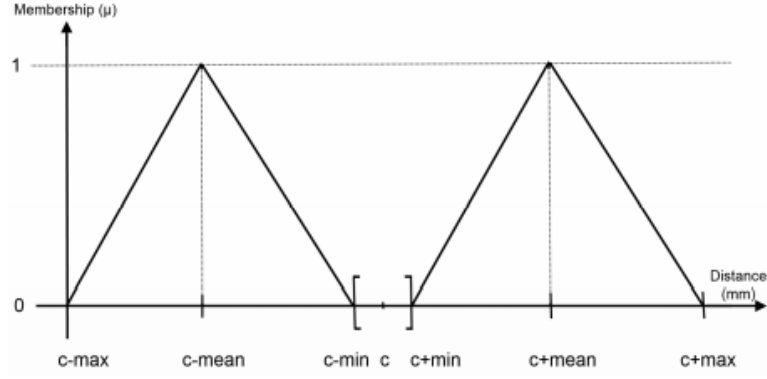


Imagen 2: Representación gráfica de una dimensión del conjunto difuso [CAM17]

Para ello se utiliza además una función de pertenencia que sigue el siguiente formato $\lambda_{B_{xyz}} = \lambda_{B_x} \cdot \lambda_{B_y} \cdot \lambda_{B_z}$, donde B_p es:

$$\tilde{B}_p = \begin{cases} 1 - \frac{|p - c + \text{mean}|}{\text{max} - \text{mean}}, & \text{if } c - \text{max} \leq p < c - \text{mean} \\ 1 - \frac{|p - c + \text{mean}|}{\text{mean} - \text{min}}, & \text{if } c - \text{mean} \leq p \leq c - \text{min} \\ 1 - \frac{|p - c - \text{mean}|}{\text{mean} - \text{min}}, & \text{if } c + \text{min} \leq p \leq c + \text{mean} \\ 1 - \frac{|p - c - \text{mean}|}{\text{max} - \text{mean}}, & \text{if } c + \text{mean} < p \leq c + \text{max} \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}$$

Este enfoque sin embargo resulta no ser correcto ya que da lugar a soluciones incorrectas teniendo en cuenta la anatomía humana, tal y como se puede ver en la siguiente figura:

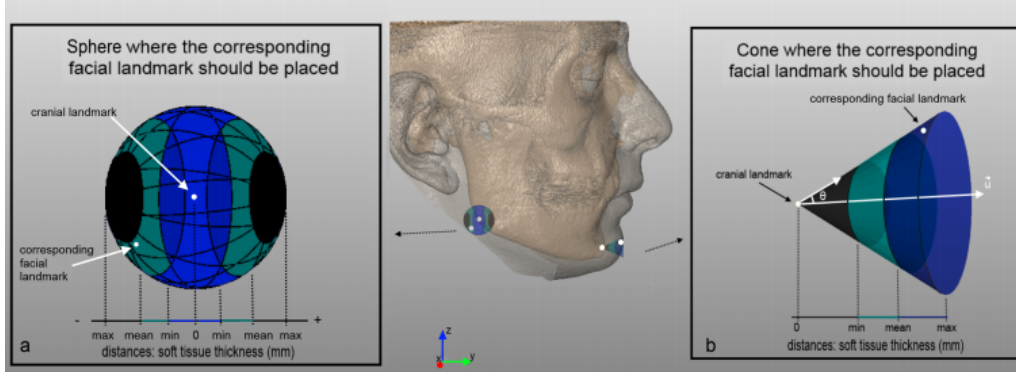


Imagen 3: Puntos de referencia inconsistentes respecto a la anatomía humana [CAM17]

Por lo tanto a continuación se plantea una variante para resolver este problema, sustituyendo en el modelo 3D la esfera por un cono que represente el volumen, utilizando para ello el punto de referencia como vértice del cono. Esto se puede observar en la Imagen 3. Con este nuevo enfoque se reduce el área donde se puede encontrar el punto de referencia.

A partir de este punto se asume un grado de perpendicularidad definido entre los puntos de referencia craneal y facial, como la mayoría de estudios sobre suavizado de tejidos hacen [SS08i,SS08ii]. Por lo tanto se plantea un vector normal a la superficie del modelo 3D de la calavera para cada punto donde cada componente es el punto en cada dimensión para cada punto de referencia referencia.

Se define entonces el vector normal como $\vec{v} = (x_n, y_n, z_n)$. Por otro lado se define la magnitud de \vec{v} como $||\vec{v}|| = \sqrt{x_n^2 + y_n^2 + z_n^2}$. El vector unitario de \vec{v} se define entonces de la manera:

$$\vec{u} = \left(\frac{x_n}{||\vec{v}||}, \frac{y_n}{||\vec{v}||}, \frac{z_n}{||\vec{v}||} \right) = (u_x, u_y, u_z)$$

Nuevamente estas coordenadas \vec{u} son multiplicadas por el *min*, *max* y *mean* con el objetivo de determinar los puntos de referencia faciales. Aun así, como la correspondencia de un par de puntos de referencia no siempre es perpendicular, se aplican diferentes ángulos de inclinación al vector unitario \vec{u} para determinar el volumen en el que se debe ubicar el punto de referencia facial. Este punto se puede encontrar rotando el volumen del punto (cono) 3D en los ejes *X*, *Y* y *Z* [HB97].

Tras tener en cuenta las consideraciones previas se presenta ahora las nuevas fórmulas de distancias de suavizado de tejidos:

$$\tilde{B}_p = \begin{cases} 1 - \frac{|p - c + u \cdot \text{mean}|}{u(\text{max} - \text{mean})}, & \text{if } c - u \cdot \text{max} \leq p \leq c - u \cdot \text{mean} \\ 1 - \frac{|p - c + u \cdot \text{mean}|}{u(\text{mean} - \text{min})}, & \text{if } c - u \cdot \text{mean} \leq p \leq c - u \cdot \text{min} \\ 1 - \frac{|p - c - u \cdot \text{mean}|}{u(\text{mean} - \text{min})}, & \text{if } c + u \cdot \text{min} \leq p \leq c + u \cdot \text{mean} \\ 1 - \frac{|p - c - u \cdot \text{mean}|}{u(\text{max} - \text{mean})}, & \text{if } c + u \cdot \text{mean} < p \leq c + u \cdot \text{max} \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}$$

Esto da lugar a un nuevo modelo del conjunto difuso:

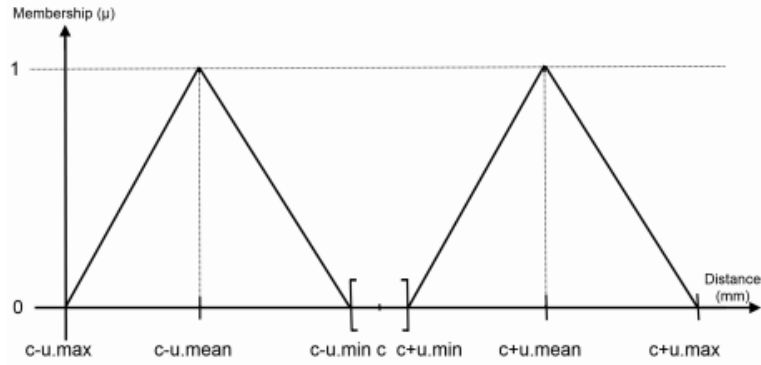


Imagen 4: Representación gráfica de una dimensión del conjunto difuso en el nuevo enfoque [CAM17]

4.1.1. Métrica de distancia

El enfoque introducido previamente plantea trabajar con un conjunto difuso para cada punto de referencia craneal. Mientras que estos puntos de referencia son puntos exactos y precisos, los puntos de referencia faciales pueden ser ubicados de forma precisa o imprecisa, por lo que se pueden tener puntos de referencia exactos o imprecisos a la vez.

El modelo trata de minimizar todas las distancias entre cada par de puntos de referencia correspondientes, teniendo en cuenta que los puntos craneales se representan mediante conjuntos difusos y los puntos faciales se representan mediante conjuntos difusos o puntos exactos. Por lo tanto se deben definir dos tipos de distancias, entre conjunto difusos y entre conjunto difuso y punto exacto.

Al tratarse de un escenario en el que se tienen en cuenta diferentes dimensiones, se ha estimado que se deben tomar métricas basadas en la geometría, por lo que se propone utilizar siempre la distancia Euclídea entre dos puntos en el espacio R^2 . Se entiende un

punto exacto como un subconjunto de conjunto difuso.

Tras analizar diferentes métricas, se concluye con que la distancia que se toma para calcular las distancias entre diferentes puntos es la *Mean weighted distance*. Se definen entonces:

- Distancia entre conjuntos difusos: $d'(x, B) = \frac{\sum_y d(x, y) \cdot B(y)}{\sum_y B(y)}$
- Distancia entre punto y conj. difuso: $d''(A, B) = \frac{\sum_x \sum_y d(x, y) t[A(x), B(y)]}{\sum_x \sum_y t[A(x), B(y)]}$
- Función fitness *Fuzzy Mean Error*: $FME = \frac{\sum_{i=1}^{N_{crisp}} (d'(x_i, f(C^i))) + \sum_{j=1}^{N_{fuzzy}} (d''(F^j, f(C^j)))}{N}$

A partir de esta función de fitness se definen:

- N_{crisp} : Número de puntos de referencia 2D ubicados de forma precisa.
- N_{fuzzy} : Número de puntos de referencia 2D ubicados de forma imprecisa y definidos como conjuntos difusos 2D.
- N : Número total de puntos de referencia.
- C^i, C^j : Conjuntos difusos que modelan cada punto de referencia craneal en 3D considerando la distancia del tejido suavizado y el punto de referencia facial en 3D denominado como i o j .
- $f(C^i), f(C^j)$: Conjuntos difusos de puntos imprecisos 2D de los puntos de referencia facial.

Sin embargo, se plantea también una alternativa donde se considera que no existen puntos precisos sino números difusos, en los que se varía el planteamiento significativamente. En este nuevo planteamiento se utiliza el métodos basado en α -cortes. Se define un conjunto difuso en el conjunto α -corte como:

$$(A * B)_\alpha = A_\alpha * B_\alpha$$

para cada $\alpha \in (0, 1]$ donde A_α denota el α -corte de A .

Para estos casos se denomina la distancia media como *Fuzzy Mean Distance*, la cual es un número difuso donde los α -cortes son los valores de pertenencia, esta distancia se denota de la forma:

$$D_{FMD} = \frac{\bigcup_{\alpha \in (0, 1]} \sum_{i=1}^N D(F^i, f(C^i))_\alpha}{N}$$

Por lo tanto, el número obtenido se aplica a la función de fitness de la forma:

$$FME = \frac{\sum_{\alpha_{min}}^{\alpha_{max}} \alpha \cdot D_{FMD}(\alpha)}{\sum_{\alpha_{min}}^{\alpha_{max}} D_{FMD}(\alpha)}$$

4.2. Decisión

Se debe definir una serie de métodos, instrucciones o herramientas que permitan obtener una decisión en base a lo estudiado previamente y que determine si finalmente un cráneo corresponde a una determinada persona mediante su fotografía. Para ello se define un grado de soporte basado en la consistencia de la correspondencia entre la cara y el cráneo, pero que a su vez evidentemente es influenciado por los materiales usados. La confianza de la técnica dependerá de la cantidad de fotografías, poses, etc [FHS08].

Esta decisión se guía por diferentes criterios que estudian la relación anatómica entre cráneo y cara [CAM17]:

- **Análisis de la consistencia anatómica de las curvas morfológicas del cráneo y la cara.**
- **Evaluación de la consistencia anatómica por correspondencia posicional.** Por ejemplo, si la posición relativa de los ojos en un cráneo se corresponden con la posición relativa en la cara de la fotografía.
- **Localización linear y comparación para analizar la consistencia anatómica.**
- **Evaluación de la consistencia del espesor del tejido suavizado entre los puntos de referencia craneales y faciales.**

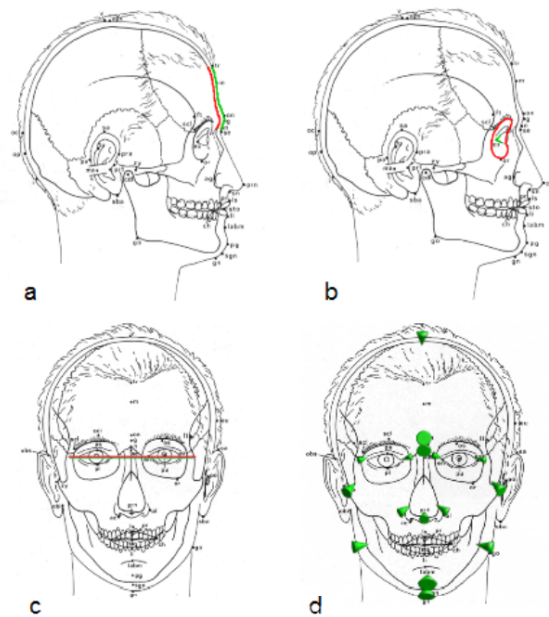


Imagen 5: Diferentes criterios de evaluación [CAM17]

Por lo tanto, teniendo en cuenta los criterios previamente explicados, se consideran que existen determinadas fuentes de incertidumbre que deben ser evaluadas:

- **Calidad de los huesos:** La calidad del esqueleto es importante ya que la condición, su estado y el paso del tiempo son factores que afectan directamente en la confianza de la evaluación.

- **Calidad de la imagen:** La incertidumbre respecto a la localización de los puntos de referencia en una imagen se pueden ver afectados por la calidad de la misma. Se deben considerar variaciones de las sombras, luces, resolución, enfoque o incluso la pose y ángulo de la persona.
- **Precisión de la superposición cráneo-cara:** Como se explicó en el punto anterior, se ha de obtener la mejor superposición posible, y esta se ve afectada por incertidumbre.
- **Aspectos morfológicos de la persona,** como la edad, sexo o índice de masa.
- **Precisión del método automático que modela la relación espacial y morfológica:** El método escogido puede variar, por lo que la elección es importante de cara a reducir una posible incertidumbre.

Por lo tanto el modelo final debe consistir en tres niveles [CAM17]:

- **Level 1:** Evaluación CFS (Craniofacial superimposition)
- **Level 2:** Evaluación SFO (Skull-face Overlay)
- **Level 3:** Evaluación de criterios.

4.2.1. Evaluación de criterios

Para evaluar los diferentes criterios definidos anteriormente, se definen diferentes métodos de visión por computador y técnicas de agregación:

1. Modelado de la consistencia anatómica de los contornos facial y craneal.

Mediante técnicas de *CV* se deben extraer los contornos y ubicar la correspondencia entre las curvas del contorno del cráneo con las de la fotografía, y posteriormente se optimizan estas superposiciones obtenidas. Si se obtienen contornos que se cruzan, se puede determinar que esta característica es anatómicamente imposible.

2. Medir la posición relativa de dos regiones para estudiar la consistencia anatómica.

El objetivo consiste en medir la posición relativa de una región del cráneo frente a la región en la cara y determinar el grado de consistencia anatómica de esa posición relativa. Esto se obtiene trasladando a planos 2D donde las relaciones se pueden observar con mayor facilidad, teniendo en cuenta dos ejes. Se puede determinar si una región se encuentra en alguna dirección respecto a la otra o incluso si se encuentra contenida.

Esto se puede realizar mediante el uso de funciones de grado de pertenencia difusas, con grados comprendidos entre $[0,1]$ para cada relación.

3. Modelado de la consistencia anatómica por localización linear y comparación.

Se deben determinar los puntos de referencia 3D y trazar las líneas en modelos 2D para el cráneo y la fotografía utilizando la transformación de la etapa de la superposición

craneal. A partir de este punto se analizan características como el paralelismo de las líneas, la similitud de longitudes y otros factores que determinan que son similares ambos modelos de cráneo y cara.

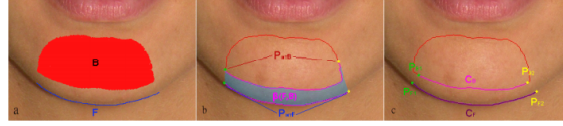


Imagen 6: Ejemplo segmentación de contorno de una barbilla [CAM17]

En *CV* este tipo de criterios se establece con valores comprendidos entre $[0,1]$, para ello se aplican diversos métodos, pero el principal problema que encuentran estos métodos es que no consideran factores como la edad o el *BMI* [ARP07, KS10], los cuales aportan incertidumbre. Por lo tanto se utilizan para este estudio la representación mediante conjuntos difusos tal y como se pueden ver a continuación:

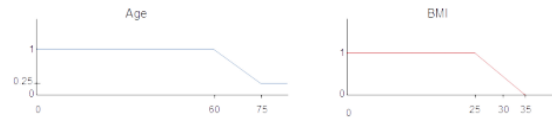


Imagen 7: Conjuntos difusos de edad y BMI [CAM17]

4. Modelado de la consistencia anatómica de una posición de dos regiones óseas.

Desde el punto de vista de *VC* la implementación consiste en proyectar las diferentes regiones 3D en planos 2D haciendo uso de la superposición craneofacial, y entonces comprobar si las regiones están situadas en la misma región de la imagen. Teniendo en cuenta los materiales, las regiones de la fotografía podrían resultar menos precisas, y se hace por lo tanto el cálculo de un cierto grado de superimposición, y se comprueba la pertenencia de la región dentro de la área que cubre dicho grado.

4.2.2. Evaluación SFO (Skull-face Overlay)

En este nivel el problema consiste en determinar la correspondencia en un SFO de cada una de los puntos de referencia correspondientes, teniendo en cuenta la incertidumbre asociada. Por lo tanto para definir la función de agregación se definen los siguientes subniveles:

Nivel 2.1: Función de agregación para combinar evaluaciones de calidad de material y perfil biológico.

Se consideran los factores de la calidad de la foto en la región PQ_m , la calidad del cráneo en la región BQ_m y la variabilidad biológica del perfil del individuo respecto a los criterios BP_m , es decir, el modo en el que el perfil biológico afecta al grado de confianza de cada criterio, mediante conjuntos difusos. En estos conjuntos difusos se engloban factores

como la edad, el sexo o el BMI.

Estos factores descritos además son independientes, por lo que una mala calidad del cráneo no se puede compensar mediante una gran calidad de la fotografía. Por lo tanto, con el objetivo de tener una función que tenga en cuenta las necesidades descritas se utilizan las funciones de *mínimo*, *producto* y *media aritmética*. Se puede definir entonces la función de agregación como:

$$O_{Level2,1}(PQ_m, BQ_m, BP_m) = \{min, prod, mean\}$$

Nivel 2.2: Función de agregación para combinar el grado de correspondencia y el valor de incertidumbre del nivel 2.1.

A la información obtenida anteriormente se deben añadir las fuentes de incertidumbre con el grado de correspondencia de las regiones del cráneo y la cara. Esto se plantea definiendo que la puntuación total no puede encontrarse por encima o debajo de ninguna de las entradas. El valor agregado se comporta como el orden de un valor representativo de todas las entradas. No todas las entradas sin embargo tienen la misma contribución, por lo que se necesita una función de pesos que no sea simétrica.

Para esta labor se utilizan las funciones de *Weighted Arithmetic Mean* y *Weighted Geometric Mean*. Los pesos se establecen con la valoración de un experto. Por lo tanto esta función se define como:

$$O_{Level2,2}(C_m, Output_{Level2,1}) = \{wam, wgm\}$$

Nivel 2.3: Función de agregación para combinar el poder de identificación el grado del nivel 2.2.

El último paso consiste en obtener el grado de evaluación del SFO. Esta función debe no ser simétrica, ya que el poder de identificación de una región refleja la contribución relativa de cada entrada a la respectiva salida, es decir, el grado de evaluación SFO.

Para ello se utilizan dos tipos de funciones de agregación, con pesos los cuales se obtiene a partir de un conjunto de datos de forma realista, y con integrales difusas como funciones de agregación.

Las integrarles difusas combinan los datos proporcionados por diversas fuentes de información de acuerdo con una medida difusa, la cual representa el conocimiento de estas fuentes de información. Se utiliza la integral de Choquet y Sugeno [MA09] y la λ -measure de Sugeno para determinar la medida difusa. Esta medida es una función sobre valores reales definida sobre un universo de discurso con rango $[0,1]$.

La medida difusa determina lo bueno que es cada subconjunto de información para evaluar una determinada hipótesis. Esta da una confianza en la hipótesis y determina como medir esta confianza, en este caso el poder de identificación de cada región facial. Se define entonces la medida difusa como g y g_λ es una λ -medida de Sugeno si existe un $\lambda > -1$ que permita:

$$g_\lambda(A \cup B) = g_\lambda(A) + g_\lambda(B) + \lambda g_\lambda(A)\mu(B)$$

Una vez determinado el λ , la integral difusa se puede calcular.

- *Integral discreta de Choquet*: $C_g(x) = \sum_{i=1}^n [x_{(i)} - x_{(i-1)}]g(H_{(i)})$
- *Integral de Sugeno*: $S_g(x) = \max_{i=1,\dots,n} \min(x_{(i)}, g(H_{(i)}))$

Por lo tanto, se define el nivel 2.3 como:

$$O_{Level2,3}(Output_{Level2,2,i}, Power_I D(W_i)) = \{wam, wgm, choq, sug\}$$

4.2.3. Evaluación CFS (Craniofacial superimposition)

En este punto del framework, solo queda reunir la información obtenida en los niveles previos de los grados de correspondencia de los diferentes SFOs, correspondientes a diferentes zonas, y se debe producir un único grado de correspondencia CFS.

Esta tarea se ha estudiado en numerosos estudios [ASM94, YIMS95], por lo que para el sistema de decisión de soporte que se plantea se podría unitizar un único grado para poder ser capaces de ordenar un conjunto de candidatos de acuerdo a este valor, o en su lugar proveer un grado de correspondencia CFS con un grado de confianza como valor de correspondencia.

En este caso se evaluarían también la calidad y precisión de los SFOs que se consideran. Pero actualmente no se ha llegado a este punto por lo que se considera únicamente un único valor CFS, asumiendo que el SFO óptimo ha sido obtenido en la segunda etapa de todo el sistema.

La función resultante define la agregación de diferentes regiones, utilizando la información de los diferentes grados SFOs obtenidos para un mismo caso CFS de la forma:

$$Agg_Nreg = \frac{\sum_{n=1}^N (D_SFO_n \cdot Nreg_n)}{\sum_{n=1}^N Nreg_n}$$

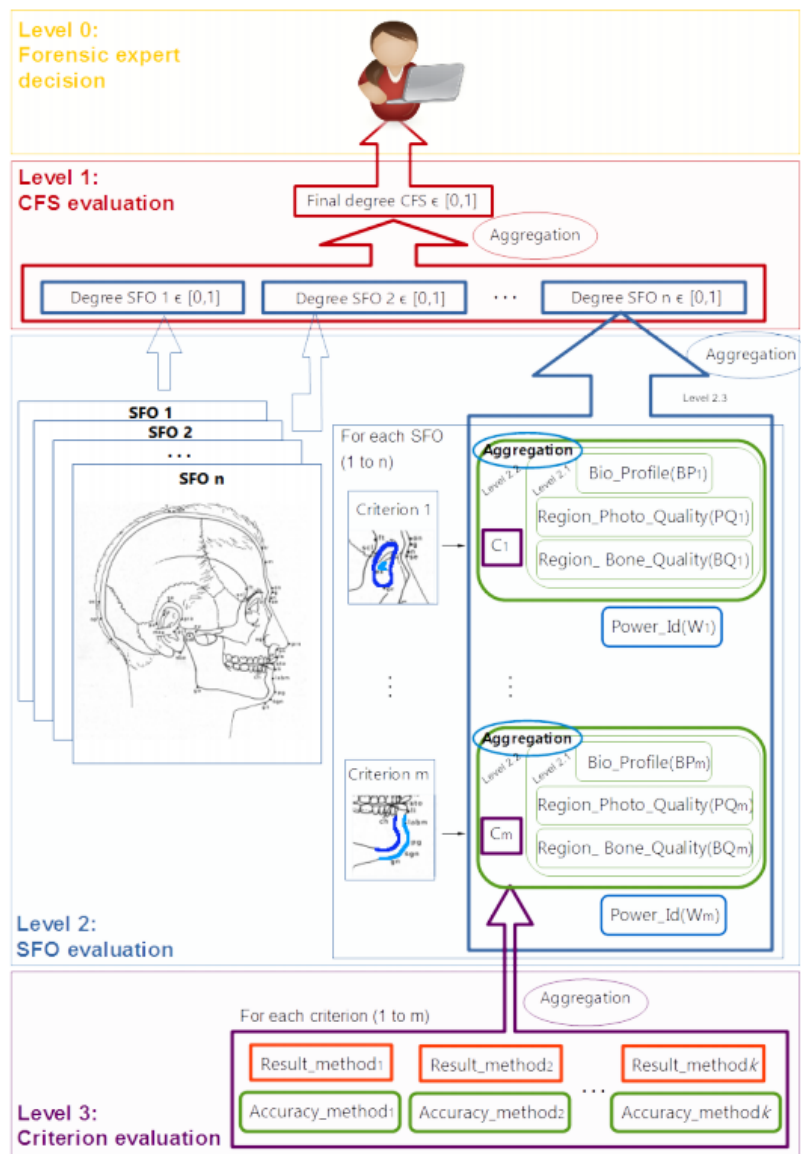


Imagen 8: Esquema jerárquico del sistema de decisión de soporte [CAM17]

5. Resultados

El apartado actual resume los principales resultados obtenidos en esta tesis doctoral con un apartado específico para cada uno de ellos.

5.1. Etapa de superposición de cara de cráneo: modelado del estudio de distancias difusas e incertidumbre de coincidencia de puntos de referencia

Nuestro procedimiento automático, basado en CV y SC, realiza la SFO de la forma más natural replicando el escenario original en el que se tomó la fotografía. Nuestro procedimiento técnico para SFO automatiza este enfoque repetitivo y propenso a errores. La orientación del cráneo y su ajuste de tamaño con el rostro en la fotografía se puede realizar de forma automática simplificando el trabajo de los expertos. Eso reduce considerablemente el tiempo necesario para obtener una superposición válida y automatiza la aplicación del método.

El desempeño de nuestro método SFO automático (ver Sección 3.2.1) y los dos anteriores [ICDS11, ICD12] que no incluyen el tratamiento de incertidumbre de coincidencia de hitos se han evaluado objetivamente considerando el conjunto de datos de verdad del terreno descrito en la Sección 2.4.4 en 18. estudios de caso. Las diferentes variantes de nuestro método logran un emparejamiento competitivo entre pares de puntos de referencia craneales y faciales correspondientes debido al modelado natural de las correspondencias de puntos de referencia utilizando técnicas SC. En particular, RCGA-c-45 supera significativamente a los demás métodos SFO automáticos probados. Obtiene el mejor rendimiento con respecto a la verdad del suelo en la mayoría de los casos. La variante RCGA-c-30 también logra una buena clasificación en el análisis estadístico calculado (de hecho, es el mismo método con diferentes parámetros). Por lo tanto, las nuevas propuestas que modelan la incertidumbre de coincidencia histórica obtienen mejores resultados que los enfoques anteriores que no consideran el grosor de los tejidos blandos faciales.

No obstante, aunque se obtienen resultados realmente buenos, es importante tener en cuenta que aún se identifica una distancia o un error residual al evaluar un resultado de SFO contra su correspondiente superposición de verdad del terreno.

Por otro lado, la elección de una buena métrica de distancia es crucial para nuestro método, ya que puede afectar significativamente la calidad de las soluciones finales. Nuestro enfoque SFO presenta el mejor rendimiento utilizando la distancia media ponderada en la mayoría de los casos. Los resultados son más precisos y robustos que las otras implementaciones estudiadas. De hecho, esta distancia supera claramente al resto con respecto al error medio en 30 carreras independientes.

Esta función de distancia entre pares de hitos solo considera información espacial relacionada con la distancia, pero no toma en cuenta la posición relativa direccional entre ellos. Este aspecto puede resultar muy interesante para nuestro enfoque porque la relación entre los puntos de referencia craneales y faciales debe satisfacer un criterio de posición específico en función de la pose. Planeamos realizar esta ampliación como un trabajo futuro.

5.2. Etapa de toma de decisiones: desarrollo jerárquico del sistema de apoyo a las decisiones

El marco completo propuesto para un DSS en CFS desarrolla la fusión de información sobre la correspondencia anatómica cráneo-cara en tres niveles diferentes: evaluación de criterios, evaluación de SFO y evaluación de CFS. Clasificamos las fuentes de incertidumbre y los grados de confianza involucrados en este proceso en relación con el hueso, la imagen, las superposiciones del cráneo y la cara, los aspectos morfológicos y los métodos utilizados.

En cuanto a la etapa de evaluación del criterio, los expertos distinguen cuatro familias diferentes para evaluar la correspondencia craneofacial: 1) la coherencia entre los contornos craneales y faciales; 2) consistencia anatómica por relación posicional; 3) ubicación y comparación de la línea; y 4) consistencia del grosor del tejido blando entre los puntos de referencia craneales y faciales correspondientes. En este trabajo hemos estudiado y modelado varios criterios morfológicos cráneo-cara que pertenecen a los tres primeros grupos: mentón y contorno craneal (primera familia); órbita craneal y posición central del globo ocular, borde superior y posición de la oreja, longitud de la oclusión de la boca, ancho de la nariz, superposición de líneas interdentes (segunda familia); y paralelismo de líneas de ectocantión y líneas frontales y centrales (tercera familia). De esta forma, la evaluación de correspondencia craneofacial comprende todo el rostro. Así, hemos considerado de una a ocho regiones y de cero a 18 líneas interdentes. Utilizando técnicas de CV, hemos estudiado diferentes métodos para medir la consistencia entre cada región ósea y facial. En algunos de ellos, el mejor rendimiento se obtiene combinando dos o tres técnicas gracias al uso del Sugeno integral.

Dentro de la etapa de evaluación de la OFS, distinguimos tres subniveles con diferentes condiciones de fusión de información. Por ello, realizamos un estudio experimental para analizar qué función de agregación proporciona los mejores resultados. El primer subnivel agrega las fuentes de incertidumbre del hueso y la imagen, y la variabilidad del perfil biológico. Para este subnivel, proponemos utilizar el mínimo (min), el producto (prod) y la media aritmética (media) como funciones de agregación. El segundo subnivel consiste en integrar esta agregación con el grado de coincidencia del cráneo y la cara. En este caso, estudiamos el uso de la media aritmética ponderada (wam) y la media geométrica ponderada (wgm). Finalmente, en el tercer subnivel, obtenemos el grado de correspondencia craneofacial SFO agregando los diferentes valores previos para todas las regiones tomando en cuenta el poder discriminativo de la región aislada como peso. Para realizar esta agregación, probamos el wam, el wgm, la integral de Sugeno (sug) y la integral de Choquet (choq). Así, a nivel de evaluación CFS, analizamos la agregación de los diferentes grados de SFO utilizando los siguientes cuatro operadores: la media, el máximo, el mínimo y una función de ponderación en función del número de regiones analizadas en cada OFS. A la vista de los resultados obtenidos en los experimentos, concluimos que el mejor desempeño actual en el nivel 2 se obtiene utilizando la combinación de funciones de agregación mean-wgm-wgm. Entonces, el mejor comportamiento del sistema se logra cuando se agregan los diferentes grados de SFO de un mismo caso ponderando por el número de regiones consideradas en cada OFS. Finalmente, se han estudiado varios umbrales para establecer una clasificación binaria (positiva o negativa), obteniendo 0,86 como mejor valor. Con respecto a este resultado, nuestro DSS clasificó correctamente un número relativamente

alto de casos positivos (13 de 16, es decir, 81,25 %) y negativos (186 de 224, es decir, 83,03 %). Estos parámetros se han logrado en un conjunto de datos de entrenamiento. El rendimiento del sistema se ha evaluado utilizando un conjunto de casos ocultos diferente (conjunto de datos de prueba), obteniendo una peor tasa en los casos positivos (62,5 % de TP) pero un muy buen comportamiento en los negativos (97,4 % de TN).

Del análisis de la experimentación desarrollada podemos concluir que nuestro sistema actual es apto para:

- Casos de filtrado (clasificación-listado): en el 62,5 % de las ocasiones el caso positivo se sitúa en la primera posición. Además, dado un conjunto de datos de candidatos iniciales, el caso positivo se incluyó en el 60 % de los candidatos mejor clasificados con un 100 % de probabilidad y dentro del 27 % de los candidatos mejor clasificados con un 92 % de probabilidad.
- Establecimiento de la exclusión: la capacidad para determinar una identidad negativa se realizó con un 97,4 % de precisión (97,4 % de la tasa de TN sobre el conjunto de datos de prueba y 83,03 % sobre el conjunto de datos de entrenamiento).

Así, el DSS diseñado puede considerarse la primera herramienta automática para clasificar parejas de rostros y cráneos desconocidos como casos positivos o negativos con una precisión similar a la de los expertos forenses con mejor desempeño.

5.3. Experimentos realizados

En este apartado nos centraremos únicamente en los experimentos que involucran la utilización de la lógica difusa de todos los experimentos realizados. Se distinguen entonces dos experimentos que tratan el modelado de la correspondencia de puntos de referencia con incertidumbre y el estudio de las distancias difusas. Ambos experimentos tienen lugar con 18 casos de SFO que corresponden a nueve casos de personas reales que vivan de España e Italia.

Los modelos 3D de los cráneos de estos nueve individuos y las fotografías fueron almacenados utilizando el software *Face2SkullTM*. Además se compara la propuesta frente a los enfoques *RCGA* y *CCGA-2* del estado del arte.

5.3.1. Experimento 1: Correspondencia de puntos de referencia con incertidumbre

Los parámetros de configuración utilizados para probar el algoritmo son los obtenidos por los mejores resultados de [ICDS09] y [ICD12], respectivamente. Estas propuestas calculan la distancia entre un punto de referencia craneal y su correspondiente facial mediante la función de fitness y la función de distancia que obtiene los mejores resultados en procesos estocásticos.

Se realizaron 30 ejecuciones de manera independiente para cada instancia del problema para comparar la robustez de los métodos y evitar cualquier parcialidad.

| Case, pose | pl | il | CCGA | RCGA | RCGA-s | RCGA-c-0 | RCGA-c-10 | RCGA-c-30 | RCGA-c-45 |
|--------------|----|----|--------|--------|--------------|--------------|--------------|--------------|---------------|
| 1,f | 7 | 7 | 4.565 | 2.750 | 2.727 | 4.116 | 4.330 | 3.078 | 3.164 |
| 1,l | 5 | 4 | 16.588 | 7.406 | 6.938 | 7.400 | 6.693 | 5.788 | 5.828 |
| 2,f | 8 | 5 | 4.906 | 3.690 | 3.486 | 3.823 | 4.212 | 3.337 | 3.331 |
| 2,l | 3 | 2 | 8.299 | 8.605 | 8.871 | 8.871 | 8.871 | 5.286 | 3.688 |
| 3,f | 8 | 7 | 3.815 | 3.629 | 3.664 | 6.594 | 6.594 | 3.007 | 2.941 |
| 3,l | 4 | 4 | 9.367 | 10.643 | 10.815 | 11.073 | 11.073 | 7.604 | 7.001 |
| 4,f | 7 | 6 | 4.635 | 3.647 | 3.505 | 3.356 | 3.356 | 3.223 | 3.045 |
| 4,l | 4 | 3 | 14.027 | 14.327 | 13.494 | 13.847 | 13.847 | 12.446 | 12.171 |
| 5,f | 10 | 6 | 2.996 | 2.436 | 2.453 | 2.204 | 2.406 | 2.641 | 2.600 |
| 5,l | 5 | 4 | 8.545 | 6.865 | 6.097 | 6.846 | 6.846 | 3.715 | 2.825 |
| 6,f | 8 | 7 | 4.654 | 3.784 | 3.644 | 2.618 | 3.076 | 2.878 | 2.921 |
| 6,l | 3 | 4 | 16.486 | 12.959 | 11.665 | 2.204 | 11.126 | 11.009 | 10.626 |
| 7,f | 10 | 5 | 4.253 | 3.639 | 3.617 | 4.695 | 4.695 | 4.100 | 3.714 |
| 7,l | 5 | 4 | 10.212 | 12.663 | 10.909 | 9.649 | 9.649 | 9.729 | 10.345 |
| 8,f | 9 | 6 | 5.269 | 4.409 | 3.579 | 3.492 | 3.492 | 2.856 | 2.882 |
| 8,l | 4 | 4 | 6.840 | 8.555 | 7.812 | 19.935 | 19.935 | 6.262 | 5.412 |
| 9,f | 10 | 4 | 6.174 | 5.541 | 5.757 | 6.660 | 6.660 | 5.071 | 4.887 |
| 9,l | 3 | 5 | 10.210 | 11.701 | 11.700 | 19.852 | 19.852 | 10.391 | 9.509 |
| Average (mm) | | | 7.778 | 6.976 | 6.548 | 7.759 | 8.416 | 5.585 | 5.281 |

Imagen 9: Tabla de resultados del modelo frente al estado del arte, tras 30 ejecuciones para los 9 casos donde f=frontal y l=lateral [CAM17]

Como se puede observar, los modelos que utilizan como región 3D el modelo del cono ($c - angulo$) son los que obtienen por norma general los mejores resultados, e incluso los del modelo esférico (s) obtienen resultados prometedores frente a los resultados obtenidos por los enfoques descritos en el estado del arte.

Además, se han utilizado cuatro variantes del enfoque cónico, en los que se consideran cuatro amplitudes diferentes del ángulo del cono, considerando que el que mejor resultados ha obtenido es el modelo con $\pm 45^\circ$.

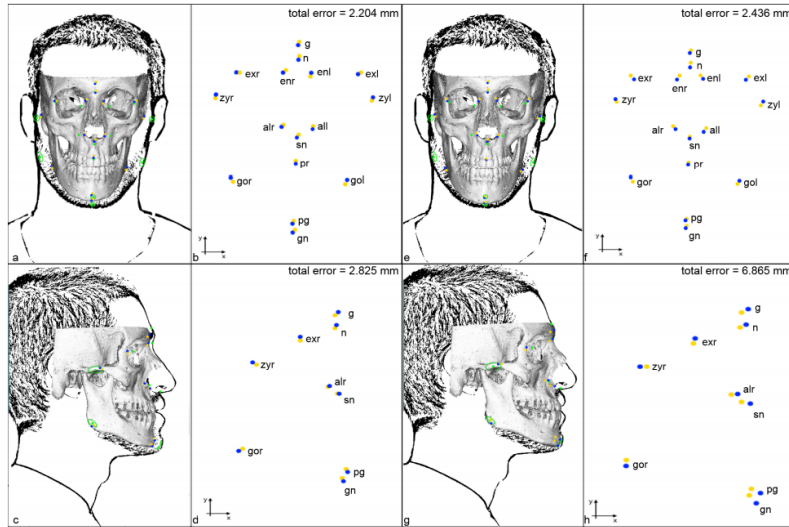


Imagen 10: Las imágenes a y c corresponden al enfoque $RCGA-c-45$ mientras que las imágenes e y g corresponden al enfoque $RCGA$ clásico [CAM17]

5.3.2. Experimento 2: Distancias difusas

Previamente se mencionaba la utilización de **Weighted Mean distance**, pero esta elección consiste en una elección arbitraria, y se pretende demostrar en este experimento, donde se toman los mismos parámetros y ejemplos que en el anterior, solo que únicamente se ejecuta el modelo *RCGA-c-45*. La siguiente tabla representa el error (en mm) y desviación obtenidos para cada caso de estudio igual que en el ejemplo anterior.

| Case, pose | pl | il | Weighted Mean | Nearest Point | Nearest Point E1 | Nearest Point E2 | Mean o-cuts (Nearest point) | Mean o-cuts (Sym. mean) | Mean o-cuts (Hausdorff) | Rosenfeld |
|------------|----|----|------------------|---------------|------------------|------------------|-----------------------------|-------------------------|-------------------------|------------|
| 1,f | 7 | 7 | 3.17±0.31 | 3.28±0.65 | 2.97±0.81 | 2.07±0.87 | 2.51±1.00 | 1.98±0.89 | 3.03±0.53 | 3.04±0.91 |
| 1,l | 5 | 4 | 5.83±2.59 | 6.68±2.84 | 8.13±3.25 | 7.63±3.24 | 7.73±3.17 | 7.78±3.14 | 7.42±3.85 | 9.39±1.47 |
| 2,f | 8 | 5 | 3.33±0.45 | 3.18±1.42 | 3.14±1.88 | 2.15±0.42 | 2.45±1.12 | 3.27±1.78 | 4.24±1.18 | 3.90±0.36 |
| 2,l | 3 | 2 | 3.69±0.23 | 9.25±2.14 | 8.24±1.90 | 8.19±2.76 | 7.64±2.22 | 6.52±2.71 | 6.48±2.62 | 8.57±2.78 |
| 3,f | 8 | 7 | 2.94±0.23 | 4.81±0.69 | 4.55±0.56 | 4.46±0.56 | 4.35±0.65 | 4.17±0.67 | 3.66±0.65 | 4.64±0.77 |
| 3,l | 4 | 4 | 7.00±0.09 | 7.20±0.56 | 7.35±0.81 | 6.94±0.39 | 7.05±0.51 | 6.98±0.37 | 7.54±0.59 | 9.59±1.50 |
| 4,f | 7 | 6 | 3.05±0.06 | 4.24±0.18 | 3.90±0.27 | 3.90±0.34 | 4.17±0.40 | 3.67±0.30 | 4.10±0.13 | 4.46±0.67 |
| 4,l | 4 | 3 | 12.17±2.83 | 11.64±2.71 | 11.95±2.90 | 11.93±2.94 | 10.83±2.51 | 11.38±2.66 | 12.01±2.08 | 12.65±2.92 |
| 5,f | 10 | 6 | 2.60±0.13 | 5.21±0.65 | 5.14±0.84 | 5.34±0.71 | 5.26±0.66 | 4.12±0.33 | 4.42±0.46 | 7.77±1.66 |
| 5,l | 5 | 4 | 2.83±0.15 | 5.15±2.33 | 5.05±2.07 | 5.69±2.14 | 6.14±2.15 | 4.49±1.71 | 6.85±2.60 | 8.57±2.28 |
| 6,f | 8 | 7 | 2.92±0.12 | 4.98±0.37 | 3.78±0.74 | 3.98±0.88 | 3.70±0.54 | 3.23±0.53 | 3.97±0.57 | 2.93±0.88 |
| 6,l | 3 | 4 | 10.63±3.02 | 12.64±3.69 | 11.19±4.10 | 11.88±3.24 | 9.89±2.74 | 10.41±3.35 | 12.05±2.46 | 11.34±2.38 |
| 7,f | 10 | 5 | 3.71±0.17 | 3.93±1.64 | 4.42±2.12 | 4.12±2.06 | 3.50±1.77 | 3.19±0.81 | 5.05±0.64 | 5.33±1.09 |
| 7,l | 5 | 4 | 10.35±1.97 | 10.96±1.21 | 10.48±1.15 | 10.36±0.88 | 9.91±0.93 | 10.20±0.89 | 10.95±0.90 | 10.85±1.33 |
| 8,f | 9 | 6 | 2.88±0.24 | 4.35±0.49 | 4.21±0.46 | 4.39±0.40 | 4.36±0.21 | 4.43±0.33 | 3.56±0.16 | 5.85±1.35 |
| 8,l | 4 | 4 | 5.41±0.15 | 8.64±1.96 | 8.19±1.76 | 9.15±1.55 | 8.10±1.77 | 6.87±1.70 | 7.40±1.85 | 10.60±1.93 |
| 9,f | 10 | 4 | 4.89±0.15 | 5.72±0.44 | 5.79±0.33 | 5.74±0.36 | 5.61±0.40 | 5.19±0.34 | 4.54±0.25 | 5.25±0.72 |
| 9,l | 3 | 5 | 9.51±0.69 | 11.68±2.84 | 11.02±2.19 | 11.22±1.98 | 11.41±2.06 | 10.22±1.15 | 10.53±1.23 | 13.26±2.31 |
| Average | | | 5.38 | 6.86 | 6.64 | 6.62 | 6.37 | 6.01 | 6.54 | 7.67 |

Imagen 11: Tabla de resultados de las diferentes distancias obtenidas, tras 30 ejecuciones para los 9 casos donde f=frontal y l=lateral [CAM17]

Si bien es cierto que se obtienen resultados similares y según el caso es más oportuno utilizar una distancia u otra, en la fila final se puede observar un promedio de los resultados donde se indica claramente que la medida de distancia que mejor funciona en este problema de forma general es la *Weighted Mean Distance*.

6. Conclusiones

Tras comprender el nuevo enfoque propuesto haciendo uso de la lógica difusa, y comprender la importancia que se posee en los tejidos respecto al análisis craneofacial, podemos responder a la pregunta realizada en la introducción: ¿Entonces puede mejorar este enfoque al previamente recogido en enfoques como el existente *RCGA*?

La respuesta a esta pregunta es sí, estos enfoques pese a ser una buena aproximación no consideraban factores como el espesor de la piel humana, y el tejido que la compone, el cual ocupa un espacio dentro de la anatomía del cuerpo humano. Este nuevo modelo presenta esta nueva consideración la cual garantiza una mayor fidelidad al cuerpo humano, y esto se traduce también en mejores resultados como se ha podido observar.

El interés de utilizar la lógica difusa en este problema radica en la importancia de tratar un cuerpo humano de la forma más fiel a la anatomía del mismo, y esto introduce factores que no son exactos, y que producen incertidumbre, ya que todos los cuerpos no poseen las mismas características, y factores como la edad, el BMI o incluso la etnia pueden hacer variar determinadas condiciones del aspecto de una persona. Por ello la lógica

difusa cobra un gran papel de cara a desempeñar la función de determinar las posibles aproximaciones entre un cráneo real y una cara de una fotografía, estableciendo las normas necesarias para poder hacer correspondencias válidas y fieles.

Realmente es un problema no ha llegado a su fin, ya que en los numerosos artículos se ha podido observar que existen una serie de mejoras pendientes, como el trabajar con cráneos reales en lugar de modelos 3D, o tratar quizás con casos que presenten anomalías, como puede ser el caso de una persona con alguna deformación, por lo tanto se introducen a continuación las próximas vías de desarrollo que consideramos y posibles mejoras sobre el mismo.

6.1. Próximas vías de desarrollo y mejoras

Realmente el cuerpo humano no sigue un patrón determinado, por lo que dentro de que se examinen valores como la edad o el BMI, quizás no sea suficiente para determinados casos donde las personas poseen condiciones especiales, las cuales se mencionan y se aportan posibles enfoques que mejoren el modelo actual:

- Personas con alguna deformidad craneal: Bien puede ser una persona con una determinada enfermedad desde el nacimiento, cuyo cráneo no sigue la anatomía humana, sino que posee una forma distinta debido a algún tipo de deformidad de la misma. Sería interesante en estos casos realizar algún uso de la lógica difusa que permita tener en cuenta un grado de deformidad para poder establecer la ubicación de estos puntos de referencia y actuar de forma similar al modelo actual.
- Personas con problemas de peso: Si bien se considera mediante lógica difusa el factor del BMI, hay determinados casos en los que el modelo quizás pueda no resultar lo suficientemente preciso, ya que personas con problemas de peso como puede ser una obesidad mórbida no poseen las mismas referencias que una persona con un BMI adecuado, la grasa acumulada en el cuerpo podría resultar en un obstáculo definiendo una distancia aún mayor entre los puntos de referencia faciales y craneales. Un posible planteamiento sería utilizar la lógica difusa igual que se ha utilizado en este modelo para los tejidos, pero teniendo en cuenta que los factores varían y la información es considerablemente diferente.
- Personas con lesiones: Una lesión craneal si bien podría suponer a simple vista una forma más rápida de identificar un cuerpo, sin embargo, en el problema tratado, suponemos que se poseen fotografías de los individuos previa a la lesión y se posee un cráneo con una lesión que impide identificar con tanta precisión los puntos de referencia o carece de algunos. Una posible solución sería permitir una reconstrucción aproximada mediante tecnologías de modelado 3D y visión por computador.

6.2. Conclusión final

Se puede concluir finalmente con que aunque los modelos del estado del arte obtienen unos buenos resultados, el empleo de la lógica difusa permite afinar estos resultados, y obtener modelos más realistas en base a la anatomía del cuerpo humano, por lo que su introducción no sólo es una mejora del modelo actual, sino que abre un amplio abanico de posibilidades a futuras mejoras y campos de estudio.

En definitiva, consideramos que la lógica difusa realmente es una herramienta muy útil para este problema y mejora las soluciones previas a la misma.

7. Bibliografía

[ICD17] O. Ibáñez, O. Cordón, and S. Damas. Handbook on Craniofacial Superimposition. *Springer*, 2017.

[ICD12] O. Ibáñez, O. Cordón, and S. Damas. A cooperative coevolutionary approach dealing with the skull-face overlay uncertainty in forensic identification by craniofacial superimposition. *Soft Computing*, 2012.

[ICDS09] O. Ibáñez, O. Cordón, and S. Damas, and J. Santamaría. An experimental study on the applicability of evolutionary algorithms to craniofacial superimposition in forensic identification. *Information Science*, 2009.

[ICDS11] O. Ibáñez, O. Cordón, and S. Damas, and J. Santamaría. Modeling the skull-face overlay uncertainty using fuzzy sets. *IEEE Transactions Fuzzy Systems*, 2011.

[CGMG+13] M. Cummaudo, M. Guerzoni, L. Marasciuolo, D. Gibelli, A. Cigada, Z. Obertová, Z. Ratnayake, P. Poppa, P. Gabriel, S. Ritz-Timme, et al. Pitfalls at the root of facial assessment on photographs: a quantitative study of accuracy in positioning facial landmarks. *International Journal of Legal Medicine*, 2013.

[Zad96] L. A. Zadeh. *Fuzzy Sets, Fuzzy Logic, and Fuzzy Systems: Selected Papers by Lofti A. Zadeh*, volume 6 of *Advances in fuzzy systems : applications and theory*. World Scientific, River Edge, NJ, 1996.

[SS08i] C. N. Stephan and E. K. Simpson. Facial soft tissue depths in craniofacial identification (part i): an analytical review of the published adult data. *Journal of Forensic Science*, 2008.

[SS08ii] C. N. Stephan and E. K. Simpson. Facial soft tissue depths in craniofacial identification (part ii): an analytical review of the published sub-adult data. *Journal of Forensic Science*, 2008.

[HB97] D. Hearn and M. P. Baker. *Computer graphics. C version*. Prentice-Hall, Upper Saddle River, NJ, 2nd edition, 1997.

[FHS08] T. W. Fenton, A. N. Heard, and N. J. Sauer. Skull-photo superimposition and border deaths: Identification through exclusion and the failure to exclude. *Journal of Forensic Science*, 2008.

[ARP07] A. M. Albert, K. Ricanek, and E. Patterson. A review of the literature on the aging adult skull and face: Implications for forensic science research and applications. *Forensic Science International*, 2007.

- [CAM17] C. Campomanes. Automation of the assessment of craniofacial superimposition using soft computing and computer vision, 2017
- [KS10] D. M. Kahn and R. B. Shaw. Overview of current thoughts on facial volume and aging. *Facial Plastic Surgery*, 2010.
- [ASM94] D. Austin-Smith and W. R. Maples. The reliability of skull/photograph superimposition in individual identification. *Journal of Forensic Science*, 1994.
- [YIMS95] M. Yoshino, K. Imaizumi, S. Miyasaka, and S. Seta. Evaluation of anatomical consistency in craniofacial superimposition images. *Forensic Science International*, 1995.
- [JJPP03] John Jason Payne-James. History and development of forensic medicine and pathology. *Healthcare in police custody*, 2003.
- [MA09] Muhammad Ayub. Choquet and Sugeno integrals. *Blekinge Institute of Technology*, 2009.
- [PPG89] Pierre-François Puech, Bernard Puech y Gottfried Tichy. *Identification of the cranium of W.A. Mozart*, 1989.
- [PJM09] Pablo Gonzalez-Moreno, Juan D. Delgado, Monserrat Vilà. *Una visión a escala de paisaje de las invasiones biológicas*, 2009.
- [VE94] V. Pesce Delfino y E. Vacca. *Report of an archaic human skeleton discovered at altamura (Bari), in the “Lamalunga” district*, 1994.