

Esquemas Adaptados de Fusión para Autenticación Biométrica Multimodal

*(Adapted Fusion Schemes for
Multimodal Biometric Authentication)*

– TESIS DOCTORAL –

XXVII Premios “Ingenieros de Telecomunicación”: Premio
FUNDACIÓN FRANCE TELECOM ESPAÑA a la Mejor Tesis
Doctoral en **Convergencia Multimedia en Telecomunicaciones**.

Autor de la Tesis: Julián Fierrez Aguilar

ATVS Grupo de Reconocimiento Biométrico - Escuela Politécnica Superior
Universidad Autónoma de Madrid - Campus de Cantoblanco
C/ Francisco Tomás y Valiente 11, 28049 Madrid, Spain

Director de la Tesis: Javier Ortega García

ATVS Grupo de Reconocimiento Biométrico - Escuela Politécnica Superior
Universidad Autónoma de Madrid - Campus de Cantoblanco
C/ Francisco Tomás y Valiente 11, 28049 Madrid, Spain



La realización de la Tesis Doctoral ha sido financiada en parte por una beca FPI de la Consejería de Educación de la Comunidad de Madrid y el Fondo Social Europeo. La Tesis Doctoral se defendió con calificación “Sobresaliente Cum Laude por unanimidad” en la Universidad Politécnica de Madrid en Julio de 2006.

Índice

1. Resumen de la Tesis Doctoral	3
1.1. Introducción	3
1.2. Sistemas biométricos multimodales	4
1.3. Motivaciones para la Tesis Doctoral	4
1.4. La Tesis Doctoral	6
1.4.1. Verificación multi-algoritmo de firma escrita	7
1.4.2. Verificación multi-algoritmo de locutor	7
1.4.3. Verificación multi-algoritmo de huella dactilar	8
1.4.4. Verificación multimodal de firma escrita y huella dactilar	8
2. Contribuciones originales de la Tesis Doctoral	9
2.1. Contribuciones originales incluidas en la Disertación	9
2.2. Contribuciones originales no incluidas en la Disertación	10
3. Resultados	12
4. Aplicabilidad	15
4.1. Aplicaciones en reconocimiento biométrico	15
4.2. Aplicaciones en análisis de imágenes y reconocimiento de patrones	17

1. Resumen de la Tesis Doctoral

1.1. Introducción

Se denomina *reconocimiento biométrico* al proceso que permite asociar una identidad con un individuo de forma automática, mediante el uso de alguna característica personal física o del comportamiento que le sea inherente (Jain et al., 2004b). Aunque en el ámbito forense (judicial, policial y pericial), el análisis científico de evidencias biométricas se ha venido usando desde hace más de un siglo, el reconocimiento biométrico como medio automático de autenticación personal en aplicaciones comerciales o civiles es un área de investigación y desarrollo bastante más reciente.

Hoy en día el reconocimiento biométrico se puede considerar como un campo de investigación asentado, con libros de referencia (Jain et al., 1999; Ratha and Bolle, 2004; Wayman et al., 2005), conferencias específicas en el tema (Kittler and Nixon, 2003; Maltoni and Jain, 2004; Jain and Ratha, 2004), evaluaciones y pruebas comparativas (Phillips et al., 2000; Grother et al., 2003; Przybocki and Martin, 2004; Wilson et al., 2004; Maio et al., 2004; Yeung et al., 2004), proyectos internacionales (COST-275, 2005; BioSec, 2004; Biosecure, 2004), consorcios (EBF, 2005; BC, 2005), esfuerzos de estandarización (BioAPI, 2002; SC37, 2005), y un creciente interés tanto por parte de gobiernos (DoD, 2005) como del sector comercial (International Biometric Group, 2006).

Pese a la madurez de este campo de investigación, con trabajos que se remontan más de tres décadas en el tiempo (Kanade, 1973; Atal, 1976; Nagel and Rosenfeld, 1977), el reconocimiento biométrico sigue siendo un área muy activa de investigación, con numerosos problemas prácticos aún por solucionar (Jain et al., 2004a). Estos problemas prácticos han hecho que, pese al interés de las aplicaciones biométricas, la integración en el mercado de estas nuevas tecnologías sea más lenta de lo esperado.

Esta Tesis se centra en la combinación de varios rasgos biométricos para superar algunas de las limitaciones de rasgos individuales, en lo que se conoce como un *sistema biométrico de autenticación multimodal* (Jain and Ross, 2004). Por *autenticación* (o *verificación*) se entiende un problema uno-controuno, con una decisión de salida del sistema binaria (aceptado/rechazado) basada en la comparación del grado de similitud (en forma de puntuación o *score* entre la muestra biométrica de entrada y el modelo previamente registrado de usuario pretendido) respecto a un determinado umbral de decisión.

El modo de verificación comporta dos tipos posibles de errores: 1) Falso Rechazo (FR), que se produce cuando un usuario auténtico es rechazado por el sistema, y 2) Falsa Aceptación (FA), que sucede cuando un impostor es aceptado por el sistema como si fuera un usuario auténtico. Estos dos tipos de errores tienen relación inversa entre sí, pudiéndose obtener diversos puntos de funcionamiento del sistema en función del umbral de decisión elegido. El punto de trabajo en cada caso dependerá de cada aplicación en particular. Por esta razón la caracterización de los sistemas biométricos se realiza mediante las curvas

completas que relacionan ambos tipos de error (curvas ROC o curvas DET). Por esta razón también, en el caso de caracterizar el rendimiento de un sistema de verificación con tasas numéricas, se suele optar por el punto en donde coinciden ambas tasas, esto es, el punto de igual error (*Equal Error Rate* –EER).

Si se analiza el estado del arte de los sistemas basados en diferentes rasgos biométricos, podremos observar que no existe ningún rasgo individual que maximice todas las propiedades deseadas (universalidad, rendimiento, permanencia, usabilidad, etc.). Algunos rasgos biométricos son altamente distintivos pero son difícilmente mensurables (p.ej., el iris, con dispositivos caros y difíciles de utilizar), mientras que otros se adquieren fácilmente pero no son tan distintivos (p.ej., la cara). En esta Tesis se estudian experimentalmente los siguientes rasgos biométricos: firma escrita (*signature*), locutor (*speaker*), y huella dactilar (*fingerprint*). Especial atención se prestará a la combinación de la firma escrita y la huella dactilar, por encontrarse en algunas aplicaciones especialmente importantes como el DNIe (2006).

1.2. Sistemas biométricos multimodales

La mayoría de estrategias para la combinación de rasgos biométricos existentes en la literatura se basan en la fusión de las puntuaciones o medidas de similitud proporcionadas por sistemas individuales construidos sobre cada uno de los rasgos (Brunelli and Falavigna, 1995; Bigun et al., 1997a; Kittler et al., 1998; Hong and Jain, 1998; Ben-Yacoub et al., 1999; Chatzis et al., 1999; Verlinde et al., 2000). Estos esquemas se basan normalmente en reglas sencillas de combinación, como la suma o el producto (Kittler et al., 1998), o en clasificadores entrenados (Verlinde et al., 2000), como Redes Neuronales (*Neural Networks* –NN) o Máquinas de Vectores Soporte (*Support Vector Machines* –SVM). Los esquemas de fusión biométrica multimodal desarrollados en la presente Tesis se basan bien en marcos teóricos Bayesianos (Bigun et al., 1997b; Kittler et al., 1998), o en el uso de clasificadores SVM (Ben-Yacoub et al., 1999; Gutschoven and Verlinde, 2000).

En los trabajos mencionados anteriormente, el término *multimodal* se refería a la combinación de diferentes rasgos biométricos. En los sistemas biométricos se pueden combinar también otros tipos de información con objeto de mejorar ciertas propiedades. De acuerdo a recomendaciones en proceso de estandarización (SC37, 2005), los sistemas de reconocimiento personal que hacen uso de múltiples fuentes de información biométrica y no necesariamente diferentes rasgos se denominan sistemas multibiométricos (Ross et al., 2006), p.ej., fusión multi-sensor o multi-algoritmo sobre el mismo rasgo biométrico.

1.3. Motivaciones para la Tesis Doctoral

En la mayor parte de los trabajos de fusión biométrica multimodal se asume que los esquemas de combinación se mantienen fijos durante la etapa de verificación (Duin, 2002). Esta Tesis se centra en el estudio de esquemas adaptativos de fusión. Dicha propuesta se basa principalmente en tres observaciones

de la literatura.

La primera observación tiene su origen en Doddington et al. (1998), donde se analizó el comportamiento de diferentes locutores en la tarea de verificación propuesta por el Instituto Nacional de Estándares y Tecnología de los EEUU (*National Institute of Standards and Technology* –NIST) para la Evaluación de Reconocimiento de Locutor en 1998 (*Speaker Recognition Evaluation* –SRE). Este trabajo observó que ciertos locutores eran fácilmente aceptados por el sistema, mientras que otros eran rechazados sistemáticamente. Este hecho se ha venido compensando tradicionalmente con el uso de umbrales de decisión dependientes de usuario, sobre todo para el caso de rasgos biométricos conductuales como la voz o la firma escrita (Furui, 1981; Plamondon and Lorette, 1989). Más recientemente se suelen aplicar técnicas de normalización de puntuaciones que intentan alinear las distribuciones de puntuaciones de diferentes usuarios a un mismo rango (Bimbot et al., 2004). Este mismo comportamiento se ha notado tanto en ediciones sucesivas de NIST SRE (García-Romero et al., 2006; Ramos-Castro et al., 2006), como en la Primera Competición Internacional de Verificación de Firma (Yeung et al., 2004), en las cuales compitió el candidato.

La segunda observación está muy relacionada con la primera. Algunos autores han propuesto recientemente el uso de esquemas de fusión dependientes de usuario para autenticación biométrica multimodal (Jain and Ross, 2002; Toh et al., 2004). El objetivo de estos esquemas es compensar que algunos rasgos pueden no ser adecuados para determinados usuarios pese a tratarse de rasgos altamente discriminantes para el resto de la población, por lo que se pueden esperar mejoras en verificación al restar importancia en la fusión de puntuaciones a dichos rasgos para dichos sujetos.

La tercera observación que ha motivado esta Tesis es el efecto de la calidad de las señales biométricas de entrada en el rendimiento de los sistemas biométricos de verificación (Junqua and Noord, 2001; Simon-Zorita et al., 2003). En concreto, se sabe que cuanto peor es la calidad de las señales de entrada, peor es el rendimiento en verificación. Esto por ejemplo queda patente en los resultados de la última Competición Internacional de Verificación de Huella (*Fingerprint Verification Competition* –FVC) (Cappelli et al., 2006), en donde se utilizaron imágenes de huella de baja calidad intencionadamente. Como resultado las tasas de error de los mejores sistemas resultaron ser un orden de magnitud peor que en ediciones anteriores con imágenes de calidad más controlada. Este efecto de la calidad de imagen en verificación de huella está suscitando un creciente interés (BQW, 2006), y se estudiará en más detalle en la siguiente competición FVC (2006), en la que el doctorando colabora como organizador. Este efecto de degradación de un sistema individual con la calidad de la imagen se puede compensar en el caso de un sistema multimodal teniendo en cuenta que no todos los rasgos se ven afectados por la calidad de igual manera (Jain and Ross, 2004).

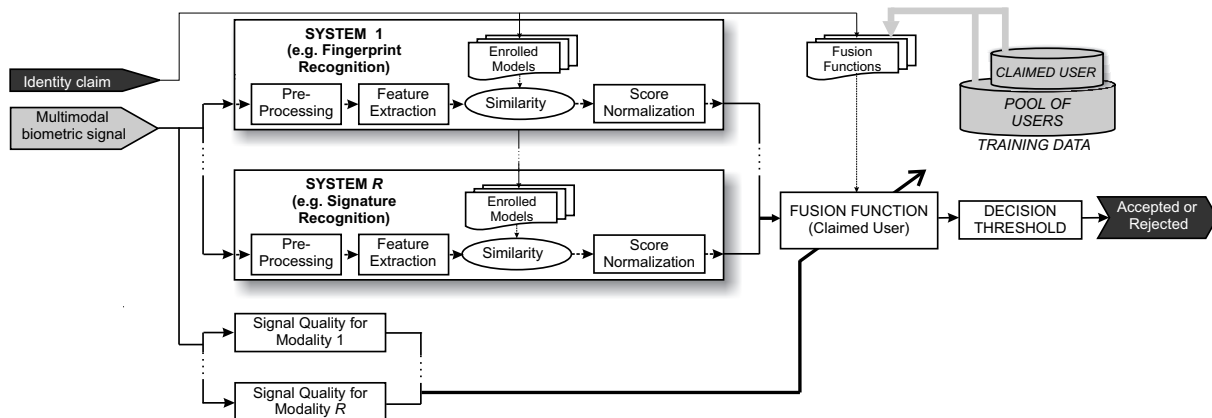


Figura 1: Arquitectura propuesta para autenticación biométrica multimodal adaptada al usuario y a la calidad de las señales biométricas de entrada.

1.4. La Tesis Doctoral

*En esta Tesis se plantean nuevas arquitecturas de fusión para autenticación biométrica adaptadas tanto a los diferentes usuarios registrados en el sistema, como a la calidad de las señales biométricas de entrada, resultando en **esquemas adaptados de fusión para autenticación biométrica multimodal** (ver Fig. 1). Dichos esquemas encuentran aplicación asimismo en otros escenarios que combinan diferentes fuentes de información biométrica y no necesariamente diferentes rasgos (Ross et al., 2006). Resultados experimentales de las técnicas propuestas se desarrollan para verificación multi-algoritmo de firma escrita, verificación multi-algoritmo de locutor, verificación multi-algoritmo de huella dactilar, y verificación multimodal de firma escrita con huella dactilar.*

El término *adaptado* en esta Tesis se refiere a esquemas entrenados utilizando información general, por ejemplo un conjunto de usuarios de referencia, y ajustados al considerar información específica bien del usuario que se trate o bien de la calidad de la muestra biométrica de entrada. En este sentido, los enfoques dependientes de usuario presentados en esta Tesis son originales. Los enfoques similares en la literatura o bien están entrenados únicamente con la información genérica (Bigun et al., 1997b; Kittler et al., 1998), o bien están entrenados con la información particular del usuario (Jain and Ross, 2002), pero no utilizan ambas simultáneamente. Respecto a la idea de la adaptación teniendo en cuenta la calidad biométrica, existen algunos trabajos previos pero que no han desarrollado la problemática de forma explícita (por ejemplo Chatzis et al. (1999) usó medidas de calidad en un esquema de fusión basado en lógica borrosa pero no para la adaptación de las funciones de fusión).

En el documento de Disertación de la Tesis Doctoral, en primer lugar se introducen los sistemas biométricos de forma general, las motivaciones de la Tesis, una expresión breve de la Tesis, la organización de la Disertación, y las contribuciones de investigación relacionadas con la Tesis. Después se resume el

estado del arte en fusión para autenticación biométrica multimodal. Acto seguido se introducen los esquemas adaptados propuestos, dependientes tanto de usuario como de la calidad de las señales biométricas de entrada. En la mayoría de los casos se presentan implementaciones basadas tanto en modelos estadísticos como en Máquinas de Vectores Soporte (SVM). A continuación se resumen las prácticas comunes para la evaluación de rendimiento en sistemas de autenticación multimodales, y se presentan las bases de datos biométricas utilizadas en la parte experimental de la Disertación.

La parte experimental de la Disertación comienza con la aplicación de las técnicas de fusión adaptada a tres problemas de autenticación biométrica unimodal multi-algoritmo basados en firma escrita, voz, y huella dactilar, respectivamente. Finalmente se realiza un estudio comparativo de los esquemas adaptados presentados en esta Tesis aplicados al problema de autenticación multimodal basada en firma escrita y huella dactilar.

1.4.1. Verificación multi-algoritmo de firma escrita

En este primer estudio se introducen dos nuevos sistemas de verificación de firma escrita dinámica. El primer sistema se basa en información local y Modelos Ocultos de Markov (*Hidden Markov Models – HMM*) (Rabiner, 1989; Yang et al., 1995), tratándose de una ampliación del trabajo previo (Ortega-Garcia et al., 2002). El segundo sistema es una aportación original basada en parámetros globales (Lee et al., 1996) y clasificación con ventanas de Parzen (*Parzen Windows Classification –PWC*) (Duda et al., 2001). Dicho sistema se desarrolló conjuntamente con Lopez-Pealba (2006). La aplicación de ambos sistemas a varias firmas de ejemplo se muestra en la Fig. 2.

Además de pruebas de ajuste de los sistemas individuales, se proporcionan resultados de la combinación de ambos usando reglas sencillas de fusión y umbrales de decisión dependientes de usuario (ver Tablas 1 y 2). El sistema global se comporta mejor que el local para pocas firmas de entrenamiento, lo que se puede justificar con la complejidad del modelado HMM, que necesita de un número elevado de firmas de entrenamiento para empezar a ser competitivo. El sistema global también resulta ser robusto al desalineamiento de las distribuciones de puntuaciones de diferentes usuarios. Se demuestra asimismo que los dos sistemas proporcionan información complementaria que se puede aprovechar con reglas simples de fusión. La combinación de ambos sistemas resulta en mejoras relativas respecto al mejor sistema individual del 44 % y del 75 % para falsificaciones entrenadas y aleatorias, respectivamente.

1.4.2. Verificación multi-algoritmo de locutor

Los sistemas individuales utilizados en este estudio fueron desarrollados en el Laboratorio Lincoln del MIT (Reynolds et al., 2005). Dicho grupo de trabajo ha sido tradicionalmente uno de los que mejores resultados han obtenido en las campañas de evaluación promovidas por el NIST (Przybocki and Martin,

2004). Pese a que el doctorando ha participado en dichas evaluaciones con buenos resultados desde el 2002 (Garcia-Romero et al., 2006; Ramos-Castro et al., 2006), en este segundo capítulo experimental se ha optado por usar sistemas de referencia de terceros. Este enfoque demuestra la aplicabilidad de las técnicas propuesta a sistemas diferentes de los desarrollados en el marco de trabajo de la Tesis.

En total se usan 7 sistemas basados en diferentes niveles de información del locutor en la señal de voz, a saber: acústico, fonético, prosódico y léxico. Se demuestra experimentalmente que la fusión adaptada a usuario propuesta en esta Tesis (ver Cuadro 3), supera los métodos tradicionales de fusión independiente de usuario (ver Cuadro 4).

1.4.3. Verificación multi-algoritmo de huella dactilar

El estudio comienza con un análisis del efecto de la calidad de imagen en el rendimiento de dos sistemas de verificación de huella, el primero basado en patrones de minucias y el segundo basado en información de textura. Para ello en primer lugar se resumen trabajos relacionados con la estimación de la calidad de imágenes de huella. A continuación se describe el método de estimación automática de la calidad usado en este estudio, basado en un análisis de energía en anillos concéntricos del espectro, según el método propuesto por Chen et al. (2005). A continuación se describen los sistemas de verificación de huella usados. El primero de ellos está desarrollado conjuntamente con Simn-Zorita (2004), ver Fig. 3 (a). El segundo de ellos se desarrolló en el marco de esta Tesis conjuntamente con Muoz-Serrano (2005), ver Fig. 3 (b).

De los resultados experimentales se extrae que el sistema basado en textura es más robusto que el de minucias para calidad de imagen baja (ver Fig. 4). Este hecho se explota con la fusión dependiente de calidad, dando más importancia al sistema basado en textura cuando se estima una imagen de huella de entrada de baja calidad. Dicho esquema dependiente de calidad proporciona resultados en verificación aproximadamente un 20% mejores que la fusión no adaptada de ambos sistemas.

1.4.4. Verificación multimodal de firma escrita y huella dactilar

En este último capítulo experimental se estudian los esquemas de fusión adaptada tanto a usuario como a la calidad de las señales de entrada en sus dos versiones propuestas, basadas en modelos estadísticos o en SVM. Se demuestra la superioridad de los esquemas adaptados a usuario frente a los métodos tradicionales independientes de usuario, o dependientes de usuario sin uso de información general. En el estudio comparativo se demuestra la superioridad del esquema basado en SVM cuando el número de muestras de entrenamiento es reducido, y la del enfoque estadístico cuando el número de muestras es elevado. En el caso de fusión dependiente de calidad se demuestra la mejora proporcionada al tener en cuenta la calidad en ambos enfoques, especialmente en el esquema basado en SVM.

2. Contribuciones originales de la Tesis Doctoral

2.1. Contribuciones originales incluidas en la Disertación

Las contribuciones de la Tesis se pueden clasificar como sigue a continuación (nótese que algunas publicaciones se repiten en puntos diferentes de la lista):

- *Revisiones del estado del arte.* 1) Esquemas de fusión a nivel de puntuaciones para biometría multimodal (Fierrez-Aguilar et al., 2003b,a) (premio al mejor póster). 2) Normalización de puntuaciones dependiente de usuario (Fierrez-Aguilar et al., 2004c, 2005h). 3) Fusión de puntuaciones dependiente de usuario (Fierrez-Aguilar et al., 2005b).
- *Marcos teóricos.* Marco teórico y taxonomía relacionada para métodos de normalización de puntuaciones (Fierrez-Aguilar et al., 2004c, 2005h).
- *Métodos originales.* 1) Nuevos métodos para normalización de puntuaciones dependientes de usuario (Fierrez-Aguilar et al., 2005h). 2) Nuevos métodos para fusión de puntuaciones dependientes de usuario basados en adaptación Bayesiana (Fierrez-Aguilar et al., 2005c,a) y en Máquinas de Vectores Soporte (Fierrez-Aguilar et al., 2004b, 2005b). 3) Nuevos métodos para fusión de puntuaciones dependiente de calidad basada en media ponderada (Fierrez-Aguilar et al., 2006) (premio a la mejor contribución de estudiante), teoría Bayesiana (Bigun et al., 2005, 2003) (discursos clave relacionados en MMUA (2003) e ICIAP (2003)), y SVM (Fierrez-Aguilar et al., 2004d, 2005i).
- *Nuevos sistemas biométricos.* 1) Dos nuevos sistemas de verificación de firma escrita dinámica (Ortega-García et al., 2003a; Fierrez-Aguilar et al., 2005f) basados en información local y global, respectivamente (ver Fig. 2). El sistema local surge como ampliación del trabajo previo (Ortega-García et al., 2002). Dicho sistema fue presentado a la Primera Competición Internacional de Verificación de Firma, obteniendo muy buenos resultados (Yeung et al., 2004): 1 para falsificaciones aleatorias, y 2 para falsificaciones entrenadas. El sistema basado en información global fue desarrollado conjuntamente con Lopez-Pealba (2006). 2) Dos nuevos sistemas de verificación de huella dactilar basados en información de minucias (desarrollado conjuntamente con Simon-Zorita et al. (2003)) y de textura (desarrollado conjuntamente con Muoz-Serrano (2005)), ver Fig. 3.
- *Nuevos datos biométricos.* Una nueva base de datos biométricos ha sido adquirida en el marco de trabajo de la Tesis incluyendo huella dactilar (12 impresiones de cada uno de los 10 dedos) y firma escrita (25 firmas reales y 25 falsificaciones por usuario) de 330 sujetos (Ortega-García et al., 2003b). La adquisición fue llevada a cabo por un consorcio de cuatro universidades: Universidad Politécnica de Madrid (UPM, coordinador), Universidad de Valladolid (UVA), Universidad del

País Vasco (EHU), y Escuela Universitaria Politécnica de Mataró (EUPMT). Dicha base de datos, denominada MCYT, se encuentra disponible públicamente en la actualidad, y está siendo usada por más de 50 grupos de investigación en todo el mundo (Richiardi and Drygajlo, 2003; Hongo et al., 2005; Igarza et al., 2005; Nanni and Lumini, 2006; Muramatsu et al., 2006). Varios ejemplos de firmas del corpus MCYT junto con sus funciones temporales y los mejores parámetros globales asociados se pueden encontrar en la Fig. 2. Ejemplos de huella dactilar se muestran en la Fig. 3.

- *Nuevos estudios experimentales.* 1) Normalización de puntuaciones en verificación de firma escrita (Fierrez-Aguilar et al., 2004c, 2005h). 2) Verificación de firma multi-algoritmo (Fierrez-Aguilar et al., 2005f). 3) Verificación de locutor multi-algoritmo (Fierrez-Aguilar et al., 2005a). 4) Estudio de los efectos de la calidad de imagen (estimación automática) en sistemas de verificación de huella basados en minucias y textura (Fierrez-Aguilar et al., 2005e). 5) Verificación de huella multi-algoritmo (Fierrez-Aguilar et al., 2006) (discurso invitado en BQW (2006)). 6) Fusión multimodal de huella y firma escrita (Fierrez-Aguilar et al., 2004b, 2005b,c, 2004d, 2005i).

2.2. Contribuciones originales no incluidas en la Disertación

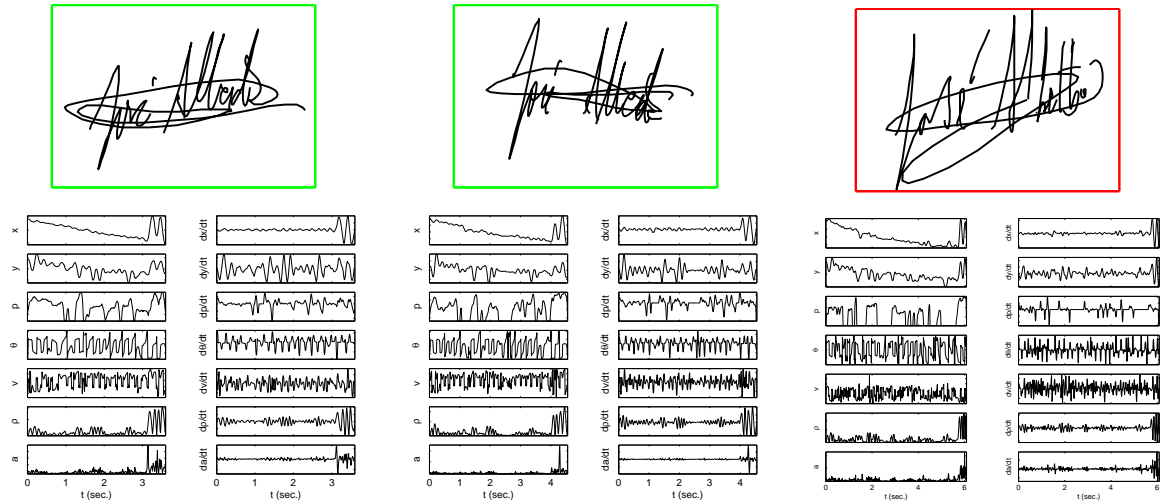
Otras contribuciones del doctorando relacionadas con la Tesis Doctoral no incluidas en el desarrollo de la Disertación incluyen:

- *Revisiones del estado del arte.* Métodos de cálculo de la calidad de imagen en huella dactilar (Alonso-Fernandez et al., 2005b).
- *Marcos teóricos.* Marco teórico para el uso de evidencias biométricas en informes forenses (Gonzalez-Rodriguez et al., 2005).
- *Métodos originales.* Normalización de puntuaciones rápida dependiente tanto de la entrada como del usuario (Ramos-Castro et al., 2006).
- *Nuevos sistemas biométricos.* Sistema de verificación de firma escrita estática, esto es, basado en imágenes (Fierrez-Aguilar et al., 2004a).
- *Nuevos datos biométricos.* 1) Una nueva base de datos de firma dinámica de 53 sujetos capturada con Tablet PC (Alonso-Fernandez et al., 2005a). 2) Una nueva base de datos incluyendo cara, iris, huella y voz de 250 sujetos en 4 sesiones capturada en el marco del proyecto integrado del 6 Programa Marco BioSec (Fierrez-Aguilar, 2005) (discurso invitado en ICB (2006)). Otros esfuerzos actuales en este ámbito que se pueden considerar contribución relacionada con esta Tesis incluyen la captura de nuevas bases de datos tanto en el proyecto coordinado del Plan Nacional de I+D+i

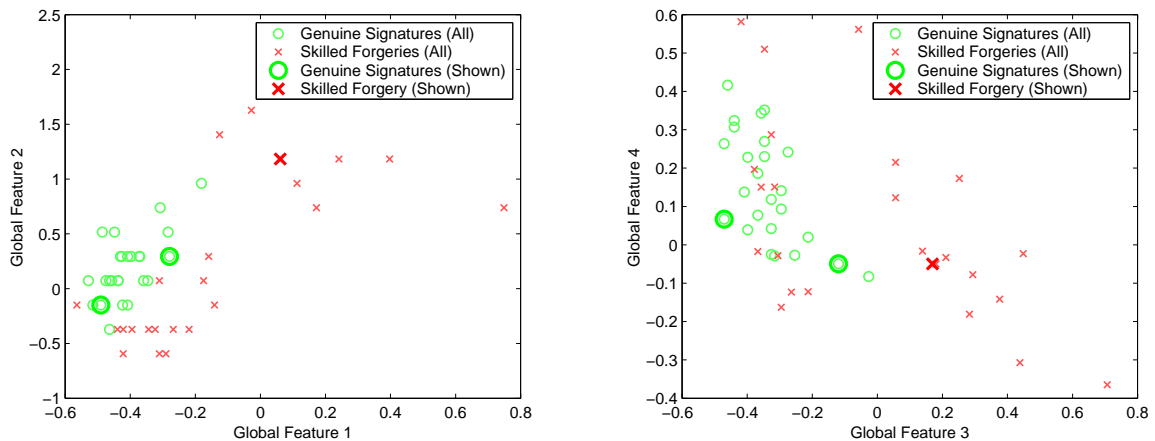
Biosecur ID (2003), como en la red de excelencia del 6 Programa Marco Biosecure (2004), ambas actividades de adquisición lideradas por el ATVS – Grupo de Reconocimiento Biométrico.

- *Nuevos estudios experimentales.* 1) Verificación de firma estática multi-algoritmo (Fierrez-Aguilar et al., 2004a). 2) Robustez de la verificación de firma dinámica en redes IP (Richiardi et al., 2004). 3) Verificación de firma dinámica multi-algoritmo combinando enfoques local y regional (Fierrez-Aguilar et al., 2005d). 4) Verificación de firma dinámica multi-algoritmo en el marco de la red de excelencia Biosecure (Garcia-Salicetti et al., 2006). 5) Normalización de puntuaciones dependiente de usuario en verificación de locutor (Garcia-Romero et al., 2003b). 6) Verificación de locutor multi-algoritmo usando voz conversacional en Español (Garcia-Romero et al., 2003a). 7) Verificación de locutor multi-algoritmo basada en calidad en el banco de pruebas de NIST (Garcia-Romero et al., 2004, 2006). 8) Normalización de puntuaciones en verificación de locutor dependiente de la entrada y del usuario (Ramos-Castro et al., 2006). 9) Estudio de los efectos de la calidad de imagen (estimación manual) y de la variabilidad de la posición en verificación de huella basada en minucias (Simon-Zorita et al., 2003). 10) Verificación de huella multi-algoritmo usando todos los sistemas participantes en FVC 2004 (Fierrez-Aguilar et al., 2005g). 11) Verificación de huella multi-algoritmo en el marco de la red de excelencia Biosecure (Alonso-Fernandez et al., 2006a). 12) Ataques a sistemas de verificación de huella dactilar (Galbally-Herrero et al., 2006). 13) Verificación de imagen facial usando representación global (Cruz-Llanas et al., 2003).

3. Resultados



(a) Dos firmas auténticas (izquierda y centro) y una imitación (derecha) para un firmante de la base de datos MCYT. Debajo de cada firma se muestran las funciones temporales utilizadas por el sistema local.



(b) Mejores parámetros globales: 1 frente 2 (izquierda), y 3 frente 4 (derecha); para todas las firmas auténticas e imitaciones del firmante mostrado arriba. Los parámetros asociados a las firmas mostradas arriba se han resaltado.

Figura 2: **Verificación multi-algoritmo de firma escrita.** Firmas de ejemplo la base de datos MCYT junto con sus funciones dinámicas y mejores parámetros globales.

Cuadro 1: **Verificación multi-algoritmo de firma escrita.** Resultados usando 5 firmas de entrenamiento. EER en %.

	imitaciones reales		imitaciones casuales	
	indep-usr	dep-usr	indep-usr	dep-usr
Local	9,39	2,51	4,86	0,59
Global	6,89	5,61	2,02	1,27
Combinado (MAX)	5,29	2,39	1,23	0,41
Combinado (SUM)	6,67	2,12	2,14	0,24

Cuadro 2: **Verificación multi-algoritmo de firma escrita.** Resultados usando 20 firmas de entrenamiento. EER en %.

	imitaciones reales		imitaciones casuales	
	indep-usr	dep-usr	indep-usr	dep-usr
Local	2,60	0,51	0,39	0,0041
Global	5,21	2,38	1,58	0,3180
Combinado (MAX)	2,30	0,53	0,33	0,0064
Combinado (SUM)	1,70	0,55	0,18	0,0005

Cuadro 3: **Verificación multi-algoritmo de locutor.** Resultados usando fusión adaptada al usuario. EER en %.

nivel de información	sistema	rendimiento individual	fusión uni-nivel	fusión multi-nivel		
				niveles	mejor/nivel	todos/nivel
1	MFCC_GMM	5.98	2.03	12	2.80	2.06
	MFCC_SVM	3.06		13	2.37	2.27
2	PHONE_SVM	10.31	8.70	14	2.49	1.20
	PHONE_NGM	18.32		123	2.77	2.11
3	PROSODY_SLOPE	22.14	15.65	124	2.92	1.68
	PROSODY_GMM	19.08		134	1.91	1.66
4	WORD_NGM	20.61		1234	2.42	1.32

Cuadro 4: **Verificación multi-algoritmo de locutor.** Resultados usando fusión independiente del usuario. EER en %.

nivel de información	sistema	rendimiento individual	fusión uni-nivel	fusión multi-nivel		
				niveles	mejor/nivel	todos/nivel
1	MFCC_GMM	5.98	3.56	12	3.69	3.06
	MFCC_SVM	3.06		13	4.32	3.56
2	PHONE_SVM	10.31	10.94	14	3.56	2.93
	PHONE_NGM	18.32		123	3.56	3.56
3	PROSODY_SLOPE	22.14	14.63	124	4.32	2.93
	PROSODY_GMM	19.08		134	3.06	2.93
4	WORD_NGM	20.61		1234	3.56	3.19



Figura 3: **Verificación multi-algoritmo de huella dactilar.** Sistemas de verificación de huella dactilar utilizados en la Tesis.

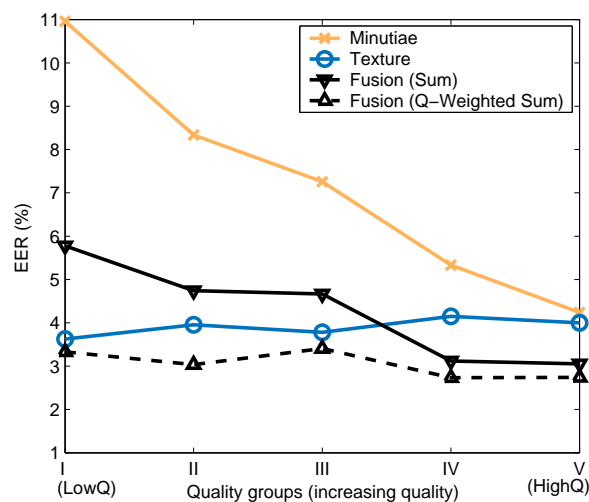


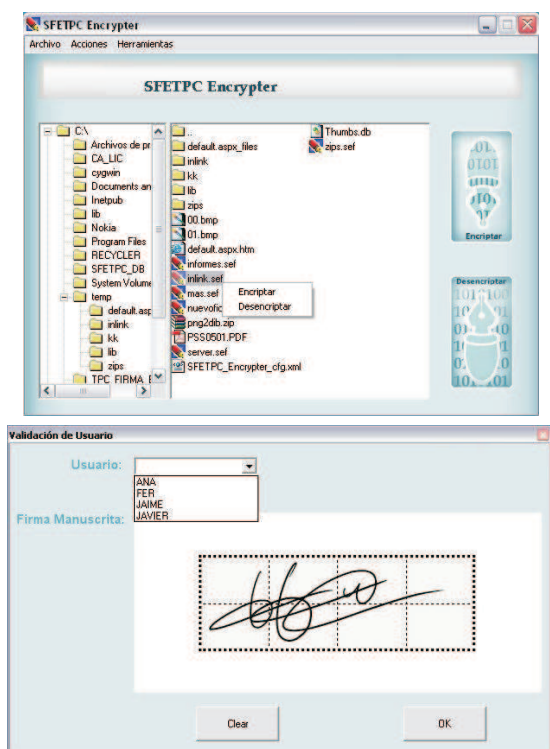
Figura 4: **Verificación multi-algoritmo de huella dactilar.** Rendimiento individual de los comparadores de huella dactilar usados en la Tesis, y combinación de ambos (tanto sencilla *Sum*, como adaptada a calidad *Q-Weighted Sum*) para nivel de calidad de imagen creciente (de izquierda a derecha).

4. Aplicabilidad

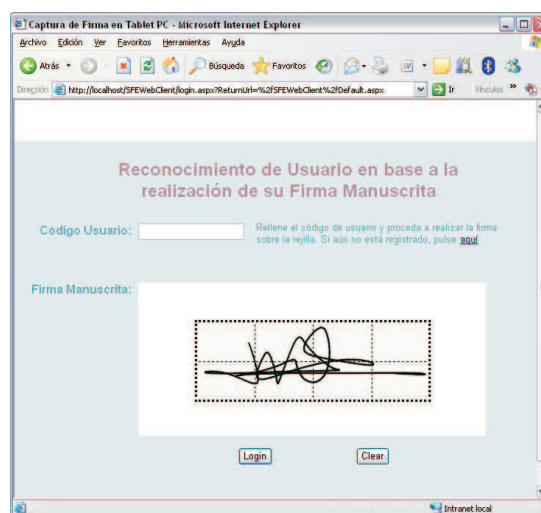
4.1. Aplicaciones en reconocimiento biométrico

Las aplicaciones más directas de los métodos desarrollados en la Tesis son las relacionadas con la identificación y verificación de personas haciendo uso de la firma escrita, la voz, la huella dactilar, y combinaciones de ellas. Existen multitud de aplicaciones de dichas tecnologías. A continuación se exponen algunas de ellas, con especial énfasis en algunas aplicaciones prácticas en las que el candidato ha participado activamente:

- Firma escrita. Las aplicaciones más importantes están en los sectores documental (autenticación de documentos) y bancario (procesamiento de cheques y tarjetas de crédito). Algunas aplicaciones incluyen:
 - Evaluación forense de evidencias manuscritas. Se trata de la aplicación más antigua del reconocimiento de firma escrita, basándose normalmente en imágenes de firmas. La evaluación forense de señales dinámicas de firmas manuscritas es un nuevo campo de investigación (Gonzalez-Rodriguez et al., 2005).
 - Verificación de firmas. Este tipo de aplicaciones incluye control de acceso a servicios, encriptación de documentos, acceso web, etc. Ejemplos prácticos de este tipo de aplicaciones, desarrollados en parte por el candidato, incluyen dos prototipos de autenticación sobre Tablet PC para acceso web y para encriptación de ficheros, respectivamente, ambos financiados por BBVA I+D (Alonso-Fernandez et al., 2005c, 2006b), ver Fig. 5.
 - Gestión y control de identidades. La comparación automática de firmas escritas se puede utilizar en sistemas de gestión de firmas para detectar identidades duplicadas u otro tipo de anomalías en entornos de uso intensivo de firmas escritas como: tarjetas de crédito en terminales punto de venta, recepción de paquetes en servicios de mensajería, etc.
 - Gestión de derechos de propiedad intelectual (Ortega-Garcia et al., 2004).
 - Criptosistemas biométricos. Actividades de investigación recientes han demostrado la factibilidad de la creación de claves criptográficas a partir de firmas manuscritas (Freire-Santos et al., 2006).
- Voz. Las aplicaciones más importantes están en la evaluación forense de evidencias vocales, y en el acceso seguro a servicios telefónicos.
 - Uso de verificación de locutor para acceso seguro a aplicaciones informáticas (login basado en PIN) (Garcia-Romero et al., 2003b). El candidato ha participado en el desarrollo de un



(a) Acceso seguro a ficheros encriptados



(b) Acceso seguro a servicios web

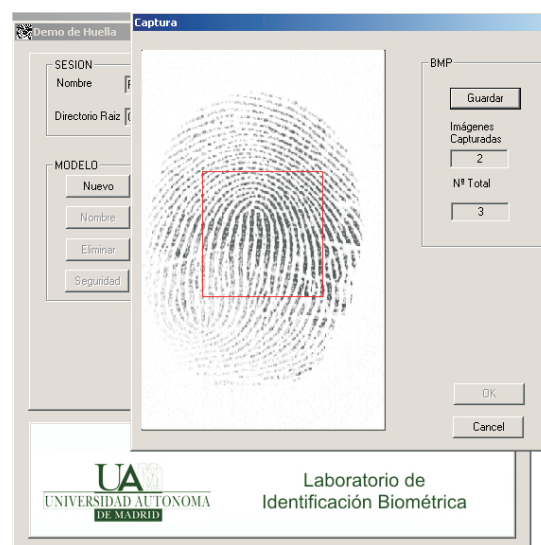
Figura 5: Capturas de pantalla de prototipos de verificación de firma escrita para Tablet PC financiados por BBVA I+D.

prototipo de este tipo financiado por Telefónica I+D, una captura del cual se muestra en la Fig. 6 (a).

- Uso de evidencias biométricas en informes forenses (Gonzalez-Rodriguez et al., 2002, 2003, 2005; Ramos-Castro et al., 2005). La tecnología de reconocimiento de voz del Grupo de Reconocimiento Biométrico ATVS (incluyendo los enfoques desarrollados en esta Tesis), han sido transferidos para su comercialización a la empresa spin-off Agnitio S.L. (<http://www.agnitio.es/>).
- Huella dactilar. Las aplicaciones principales están en el sector forense (AFIS policiales) y en el control físico de accesos. Un prototipo para el control de accesos ha sido desarrollado en parte por el candidato con la financiación de Telefónica I+D, ver Fig. 6 (b).
- Multimodalidad. La combinación de rasgos como la firma escrita y la huella dactilar aparecen en entornos tan importantes como el nuevo DNI electrónico.



(a) Verificación de locutor



(b) Verificación de huella dactilar

Figura 6: Capturas de pantalla de prototipos de verificación de voz y huella financiados por Telefónica I+D.

4.2. Aplicaciones en análisis de imágenes y reconocimiento de patrones

Las técnicas desarrolladas en la Tesis Doctoral son de aplicación a infinidad de problemas en donde se pretende interpretar información visual procesada digitalmente. Esto es así ya que en la investigación relacionada con los sistemas biométricos se han desarrollado métodos avanzados de análisis de señal e imagen. Igualmente, durante el desarrollo de las técnicas de fusión adaptada, se ha profundizado y avanzado en técnicas muy versátiles para el reconocimiento de patrones.

Un ejemplo de la versatilidad en la aplicación de las técnicas desarrolladas en esta Tesis se encuentra en un terreno muy diferente al de reconocimiento biométrico, en el que sin embargo se pueden aplicar con éxito las técnicas desarrolladas. En concreto, el candidato ha aplicado con éxito las técnicas desarrolladas al análisis de defectos en componentes mecánicos industriales haciendo uso de inspección por ultrasonidos y análisis semi-automático de imágenes. Este desarrollo se encuentra en proceso de ser patentado, y le ha servido al candidato para constituir una empresa spin-off (Flaw Evaluation Technologies S.L.), lo que le ha sido reconocido con numerosos premios al emprendedor universitario (véase CV del mismo).

Referencias

- Alonso-Fernandez, F., Fierrez-Aguilar, J., del Valle, F., Ortega-Garcia, J., September 2005a. On-line signature verification using Tablet PC. In: Proc. IEEE Intl. Symposium on Image and Signal Processing and Analysis, ISPA. Zagreb, Croatia, pp. 245–250.
- Alonso-Fernandez, F., Fierrez-Aguilar, J., Fronthaler, H., Kollreider, K., Ortega-Garcia, J., Gonzalez-Rodriguez, J., Bigun, J., 2006a. Combining multiple matchers for fingerprint verification: A case study in Biosecure Network of Excellence. *Annals of Telecommunications, Special Issue on Multimodal Biometrics* 61, (to appear).
- Alonso-Fernandez, F., Fierrez-Aguilar, J., Ortega-Garcia, J., October 2005b. A review of schemes for fingerprint image quality computation. In: Proc. of 3rd Workshop on Biometrics on the Internet, COST-275. Official Publisher of the European Communities, Hatfield, UK, pp. 3–6.
- Alonso-Fernandez, F., Fierrez-Aguilar, J., Ortega-Garcia, J., 2005c. Sensor interoperability and fusion in signature verification: A case study using Tablet PC. In: Li, S., et al. (Eds.), Proc. of International Workshop on Biometric Recognition Systems, IWBRIS. Springer LNCS-3781, pp. 180–187.
- Alonso-Fernandez, F., Fierrez-Aguilar, J., Ortega-Garcia, J., Gonzalez-Rodriguez, J., 2006b. A web-based secure access system using signature verification over Tablet PC. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine* 21, (to appear).
- Atal, B. S., 1976. Automatic recognition of speakers from their voices. *Proceedings of the IEEE* 64, 460–475.
- BC, 2005. Biometrics Consortium. (<http://www.biometrics.org/>).
- Ben-Yacoub, S., Abdeljaoued, Y., Mayoraz, E., 1999. Fusion of face and speech data for person identity verification. *IEEE Trans. on Neural Networks* 10 (5), 1065–1074.
- Bigun, E. S., Bigun, J., Duc, B., Fischer, S., 1997a. Expert conciliation for multi modal person authentication systems by Bayesian statistics. In: Bigun, J., Chollet, G., Borgefors, G. (Eds.), Proc. of IAPR Intl. Conf. on Audio- and Video-based Person Authentication, AVBPA. Springer LNCS-1206, pp. 291–300.
- Bigun, J., Chollet, G., Borgefors, G. (Eds.), 1997b. Proceedings of the First International Conference on Audio- and Video-Based Person Authentication, AVBPA. Vol. 1206 of Lecture Notes in Computer Science. Springer.
- Bigun, J., Fierrez-Aguilar, J., Ortega-Garcia, J., Gonzalez-Rodriguez, J., 2003. Multimodal biometric authentication using quality signals in mobile communications. In: Proc. of Intl. Conf. on Image Analysis and Processing, ICIAP. IEEE CS Press, pp. 2–13.
- Bigun, J., Fierrez-Aguilar, J., Ortega-Garcia, J., Gonzalez-Rodriguez, J., 2005. *Advanced Studies in Biometrics*. Vol. 3161 of Lecture Notes in Computer Science. Springer, Ch. Combining Biometric Evidence for Person Authentication, pp. 1–18.

- Bimbot, F., Bonastre, J. F., Fredouille, C., Gravier, G., Magrin-Chagnolleau, I., Meignier, S., Merlin, T., Ortega-Garcia, J., Petrovska-Delacretaz, D., Reynolds, D. A., 2004. A tutorial on text-independent speaker verification. *Journal on Applied Signal Processing* 2004:4, 430–451.
- BioAPI, 2002. ANSI INCITS 358-2002 - Information Technology - BioAPI Specification (Version 1.1).
- BioSec, 2004. Biometrics and Security, FP6 IP IST-2002-001766. (<http://www.biosec.org/>).
- Biosecur ID, 2003. Seguridad Multimodal basada en Autenticacin Biomtrica mediante Fusin de Expertos Unimodales, MCYT TIC2003-08382-C05.
- Biosecur, 2004. Biometrics for Secure Authentication, FP6 NoE IST-2002-507634. (<http://www.biosecure.info/>).
- BQW, March 2006. NIST Biometric Quality Workshop. Gaithersburg, MD, USA, (<http://www.itl.nist.gov/iad/894.03/quality/workshop/>).
- Brunelli, R., Falavigna, D., 1995. Person identification using multiple cues. *IEEE Trans. on Pattern Anal. and Machine Intell.* 17 (10), 955–966.
- Cappelli, R., Maio, D., Maltoni, D., Wayman, J. L., Jain, A. K., 2006. Performance evaluation of fingerprint verification systems. *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 28 (1), 3–18.
- Chatzis, V., Bors, A. G., Pitas, I., 1999. Multimodal decision-level fusion for person authentication. *IEEE Trans. on System, Man, and Cybernetics, part A* 29 (6), 674–680.
- Chen, Y., Dass, S., Jain, A., 2005. Fingerprint quality indices for predicting authentication performance. In: Kanade, T., Ratha, N., Jain, A. (Eds.), *Proc. of IAPR Intl. Conf. on Audio- and Video-based Person Authentication, AVBPA*. Springer LNCS-3546, pp. 160–170.
- COST-275, 2005. Biometrics-Based Recognition of People Over the Internet. (<http://www.fub.it/cost275/>).
- Cruz-Llanas, S., Fierrez-Aguilar, J., Ortega-Garcia, J., Gonzalez-Rodriguez, J., 2003. A comparative evaluation of global representation based schemes for face verification. In: *Proc. of the IEEE Intl. Conf. on Image Processing, ICIP*. Vol. 3. pp. 905–908.
- DNIe, March 16th 2006. El nuevo DNI electrnico llega a los ciudadanos. EL PAIS.es, (<http://www.elpais.es/>).
- DoD, 2005. Biometrics Management Office, Department of Defense, USA. (<http://www.biometrics.dod.mil/>).
- Doddington, G., Liggett, W., Martin, A., Przybocki, M., Reynolds, D., 1998. Sheeps, goats, lambs and wolves: A statistical analysis of speaker performance in the NIST 1998 Speaker Recognition Evaluation. In: *Proc. of Intl. Conf. on Speech and Language Processing, ICSLP*.
- Duda, R. O., Hart, P. E., Stork, D. G., 2001. *Pattern Classification*. Wiley.
- Duin, R. P. W., 2002. The combining classifier: to train or not to train? In: *Proc. of the IAPR Intl. Conf. on Pattern Recognition, ICPR*. IEEE CS Press, pp. 765–770.

- EBF, 2005. European Biometrics Forum. (<http://www.eubiometricforum.com/>).
- Fierrez-Aguilar, J., June 2005. Biometric databases: Modalities, privacy, and size. In: BioSec 3rd Workshop. Helsinki, Finland, (<http://www.biosec.org>).
- Fierrez-Aguilar, J., Alonso-Hermira, N., Moreno-Marquez, G., Ortega-Garcia, J., 2004a. An off-line signature verification system based on fusion of local and global information. In: Maltoni, D., Jain, A. K. (Eds.), Proc. of Intl. Workshop on Biometric Authentication, BIOAW. Springer LNCS-3087, pp. 295–306.
- Fierrez-Aguilar, J., Chen, Y., Ortega-Garcia, J., Jain, A., 2006. Incorporating image quality in multi-algorithm fingerprint verification. In: Zhang, D., Jain, A. K. (Eds.), Proc. of IAPR Intl. Conf. on Biometrics, ICB. Springer LNCS-3832, pp. 213–220.
- Fierrez-Aguilar, J., Garcia-Romero, D., Ortega-Garcia, J., Gonzalez-Rodriguez, J., 2005a. Speaker verification using adapted user-dependent multilevel fusion. In: Oza, N. C., Polikar, R., Kittler, J., Roli, F. (Eds.), Proc. of Intl. Workshop on Multiple Classifier Systems, MCS. Springer LNCS-3541, pp. 356–365.
- Fierrez-Aguilar, J., Garcia-Romero, D., Ortega-Garcia, J., Gonzalez-Rodriguez, J., 2004b. Exploiting general knowledge in user-dependent fusion strategies for multimodal biometric verification. In: Proc. of IEEE Intl. Conf. on Acoustics, Speech and Signal Processing, ICASSP. Vol. 5. pp. 617–620.
- Fierrez-Aguilar, J., Garcia-Romero, D., Ortega-Garcia, J., Gonzalez-Rodriguez, J., 2005b. Adapted user-dependent multimodal biometric authentication exploiting general information. *Pattern Recognition Letters* 26 (16), 2628–2639.
- Fierrez-Aguilar, J., Garcia-Romero, D., Ortega-Garcia, J., Gonzalez-Rodriguez, J., 2005c. Bayesian adaptation for user-dependent multimodal biometric authentication. *Pattern Recognition* 38 (8), 1317–1319.
- Fierrez-Aguilar, J., Krawczyk, S., Ortega-Garcia, J., Jain, A. K., 2005d. Fusion of local and regional approaches for on-line signature verification. In: Proc. of Intl. Workshop on Biometric Recognition Systems, IWBR. Springer LNCS-3781, pp. 188–196.
- Fierrez-Aguilar, J., Muoz-Serrano, L. M., Alonso-Fernandez, F., Ortega-Garcia, J., 2005e. On the effects of image quality on minutiae- and ridge-based automatic fingerprint recognition. In: Proc. of IEEE Intl. Carnahan Conf. on Security Technology, CARNAHAN. pp. 79–82.
- Fierrez-Aguilar, J., Nanni, L., Lopez-Penalba, J., Ortega-Garcia, J., Maltoni, D., 2005f. An on-line signature verification system based on fusion of local and global information. In: Proc. of IAPR Intl. Conf. on Audio- and Video-Based Biometric Person Authentication, AVBPA. Springer LNCS-3546, pp. 523–532.
- Fierrez-Aguilar, J., Nanni, L., Ortega-Garcia, J., Cappelli, R., Maltoni, D., 2005g. Combining multiple matchers for fingerprint verification: A case study in FVC2004. In: Roli, F., Vitulano, S. (Eds.), Proc. of Intl. Conf. on Image Analysis and Processing, ICIAP. Springer LNCS-3617, pp. 1035–1042.

- Fierrez-Aguilar, J., Ortega-Garcia, J., Garcia-Romero, D., Gonzalez-Rodriguez, J., 2003a. A comparative evaluation of fusion strategies for multimodal biometric verification. In: Kittler, J., Nixon, M. S. (Eds.), Proc. of IAPR Intl. Conf. on Audio- and Video-based Person Authentication, AVBPA. Springer LNCS-2688, pp. 830–837.
- Fierrez-Aguilar, J., Ortega-Garcia, J., Gonzalez-Rodriguez, J., 2003b. Fusion strategies in multimodal biometric verification. In: Proc. of IEEE Intl. Conf. on Multimedia and Expo, ICME. Vol. 3. pp. 5–8.
- Fierrez-Aguilar, J., Ortega-Garcia, J., Gonzalez-Rodriguez, J., 2004c. Target dependent score normalization techniques and their application to signature verification. In: Zhang, D., Jain, A. K. (Eds.), Proc. of Intl. Conf. on Biometric Authentication, ICBA. Springer LNCS-3072, pp. 498–504.
- Fierrez-Aguilar, J., Ortega-Garcia, J., Gonzalez-Rodriguez, J., 2005h. Target dependent score normalization techniques and their application to signature verification. IEEE Trans. on Systems, Man and Cybernetics, part C 35 (3), 418–425.
- Fierrez-Aguilar, J., Ortega-Garcia, J., Gonzalez-Rodriguez, J., Bigun, J., 2004d. Kernel-based multimodal biometric verification using quality signals. In: Jain, A. K., Ratha, N. K. (Eds.), Proc. of Intl. Conf. on Biometric Technologies for Human Identification, BTHI. Proc. SPIE-5404, pp. 544–554.
- Fierrez-Aguilar, J., Ortega-Garcia, J., Gonzalez-Rodriguez, J., Bigun, J., 2005i. Discriminative multimodal biometric authentication based on quality measures. Pattern Recognition 38 (5), 777–779.
- Freire-Santos, M., Fierrez-Aguilar, J., Ortega-Garcia, J., 2006. Cryptographic key generation using handwritten signature. In: Proc. of Intl. Conf. on Biometric Technologies for Human Identification, BTHI. Vol. 6202. Proc. of SPIE, pp. 225–231.
- Furui, S., 1981. Cepstral analysis technique for automatic speaker verification. IEEE Trans. Acoust. Speech, Signal Processing 29 (2), 254–272.
- FVC, 2006. Fingerprint Verification Competition. (<http://bias.csr.unibo.it/fvc2006>).
- Galbally-Herrero, J., Fierrez-Aguilar, J., Rodriguez-Gonzalez, J. D., Alonso-Fernandez, F., Ortega-Garcia, J., Tapiador, M., 2006. On the vulnerability of fingerprint verification systems to fake fingerprint attacks. In: Proc. IEEE Intl. Carnahan Conf. on Security Technology, CARNAHAN.
- Garcia-Romero, D., Fierrez-Aguilar, J., Gonzalez-Rodriguez, J., Ortega-Garcia, J., 2003a. Support Vector Machine fusion of idiolectal and acoustic speaker information in Spanish conversational speech. In: Proc. of the IEEE Intl. Conf. on Acoustics, Speech and Signal Processing, ICASSP. Vol. 2. pp. 229–232.
- Garcia-Romero, D., Fierrez-Aguilar, J., Gonzalez-Rodriguez, J., Ortega-Garcia, J., 2004. On the use of quality measures for text-independent speaker recognition. In: Ortega-Garcia, J., et al. (Eds.), ISCA Workshop on Speaker and Language Recognition, ODYSSEY. pp. 105–110.
- Garcia-Romero, D., Fierrez-Aguilar, J., Gonzalez-Rodriguez, J., Ortega-Garcia, J., 2006. Using quality measures for multilevel speaker recognition. Computer Speech and Language 20 (2-3), 192–209.

- Garcia-Romero, D., Gonzalez-Rodriguez, J., Fierrez-Aguilar, J., Ortega-Garcia, J., 2003b. U-norm likelihood normalization in PIN-based speaker verification systems. In: Proc. of IAPR Intl. Conf. on Audio- and Video-based Person Authentication, AVBPA. Springer LNCS-2688, pp. 208–213.
- Garcia-Salicetti, S., Fierrez-Aguilar, J., Alonso-Fernandez, F., Vielhauer, C., Guest, R., Allano, L., Trung, T. D., Scheidat, T., Van, B. L., Dittmann, J., Dorizzi, B., Ortega-Garcia, J., Gonzalez-Rodriguez, J., Castiglione, M. B., Fairhurst, M., 2006. Biosecure reference systems for on-line signature verification: A study of complementarity. *Annals of Telecommunications, Special Issue on Multimodal Biometrics* 61, (to appear).
- Gonzalez-Rodriguez, J., Fierrez-Aguilar, J., Ortega-Garcia, J., 2003. Forensic identification reporting using automatic speaker recognition systems. In: Proc. of IEEE Intl. Conf. on Acoustics, Speech and Signal Processing, ICASSP. Vol. 2. pp. 93–96.
- Gonzalez-Rodriguez, J., Fierrez-Aguilar, J., Ortega-Garcia, J., Lucena-Molina, J. J., 2002. Biometric identification in forensic cases according to the Bayesian approach. In: Proc. of Intl. Workshop on Biometric Authentication, BIOAW. Springer LNCS-2359, pp. 177–185.
- Gonzalez-Rodriguez, J., Fierrez-Aguilar, J., Ramos-Castro, D., Ortega-Garcia, J., 2005. Bayesian analysis of fingerprint, face and signature evidences with automatic biometric systems. *Forensic Science International* 155 (2-3), 126–140.
- Grother, P. J., Micheals, R. J., Phillips, P. J., 2003. Face recognition vendor test 2002 performance metrics. In: Proc. of IAPR Intl. Conf. on Audio- and Video-based Person Authentication, AVBPA. Springer LNCS-2688, pp. 937–945.
- Gutschoven, B., Verlinde, P., 2000. Multi-modal identity verification using Support Vector Machines (SVM). In: Proc. of Intl. Conf. on Information Fusion, FUSION. IEEE Press, pp. 3–8.
- Hong, L., Jain, A. K., 1998. Integrating faces and fingerprints for personal identification. *IEEE Trans. on Pattern Anal. and Machine Intell.* 20 (12), 1295–1307.
- Hongo, Y., Muramatsu, D., Matsumoto, T., 2005. Adaboost-based on-line signature verifier. In: Jain, A. K., Ratha, N. K. (Eds.), Proc. of Intl. Conf. on Biometric Technologies for Human Identification, BTHI. Vol. 5779. Proc. of SPIE, pp. 373–380.
- ICB, 2006. IAPR Intl. Conf. on Biometrics, Hong Kong, Jan. 2006. (<http://www4.comp.polyu.edu.hk/icba/>).
- ICIAP, 2003. Intl. Conf. on Image Analysis and Processing, Mantova, Italy, Sept. 2003. (<http://iciap2003.unipv.it/>).
- Igarza, J., Hernaez, I., Goirizelaia, I., Espinosa, K., Escolar, J., 2005. Off-line signature recognition based on dynamic methods. In: Jain, A. K., Ratha, N. K. (Eds.), Proc. of SPIE, Biometric Technologies for Human Identification II. Vol. 5779. pp. 336–343.

- International Biometric Group, 2006. Biometrics market and industry report 2006-2010. (<http://www.biometricgroup.com/>).
- Jain, A. K., Bolle, R., Pankanti, S., 1999. Biometrics - Personal Identification in a Networked Society. Kluwer.
- Jain, A. K., Pankanti, S., Prabhakar, S., Hong, L., Ross, A., Wayman, J. L., 2004a. Biometrics: A grand challenge. In: Proc. of the IAPR Intl. Conf. on Pattern Recognition, ICPR. Vol. 2. IEEE CS Press, pp. 935–942.
- Jain, A. K., Ratha, N. K. (Eds.), 2004. Biometric Technology for Human Identification, First International Workshop. Vol. 5404 of Proc. of SPIE.
- Jain, A. K., Ross, A., 2002. Learning user-specific parameters in a multibiometric system. In: Proc. of IEEE Intl. Conf. on Image Processing, ICIP. Vol. 1. pp. 57–60.
- Jain, A. K., Ross, A., 2004. Multibiometric systems. *Communications of the ACM* 47 (1), 34–40.
- Jain, A. K., Ross, A., Prabhakar, S., 2004b. An introduction to biometric recognition. *IEEE Trans. on Circuits and Systems for Video Technology* 14 (1), 4–20.
- Junqua, J. C., Noord, G. V. (Eds.), 2001. Robustness in Language and Speech Technology. Kluwer Academic Publishers.
- Kanade, T., 1973. Picture processing system by computer complex and recognition of human faces. Ph.D. thesis, Kyoto University.
- Kittler, J., Hatef, M., Duin, R., Matas, J., 1998. On combining classifiers. *IEEE Trans. on Pattern Anal. and Machine Intell.* 20 (3), 226–239.
- Kittler, J., Nixon, M. S. (Eds.), 2003. Audio- and Video-Based Biometric Person Authentication, Fourth International Conference. Vol. 2688 of Lecture Notes on Computer Science. Springer.
- Lee, L. L., Berger, T., Aviczer, E., 1996. Reliable on-line human signature verification systems. *IEEE Trans. on Pattern Anal. and Machine Intell.* 18 (6), 643–647.
- Lopez-Pealba, J., 2006. Sistema automatico de reconocimiento de firma escrita on-line basado en extraccin y seleccin de caractersticas discriminatorias. Master’s thesis, ETSI Telecomunicacin, Universidad Politcnica de Madrid.
- Maiorani, D., Maltoni, D., Cappelli, R., Wayman, J. L., Jain, A. K., 2004. FVC2004: Third Fingerprint Verification Competition. In: Zhang, D., Jain, A. K. (Eds.), Proc. of Intl. Conf. on Biometric Authentication, ICBA. Springer LNCS-3072, pp. 1–7.
- Maltoni, D., Jain, A. K. (Eds.), 2004. Biometric Authentication, Second International Workshop. Vol. 3087 of Lecture Notes on Computer Science. Springer.
- MMUA, 2003. Workshop on Multimodal User Authentication, Santa Barbara CA, USA, Dec. 2003. (<http://mmua.cs.ucsb.edu/>).

- Muoz-Serrano, L. M., 2005. Sistema automatico de reconocimiento de huella dactilar basado en informacin de textura. Master's thesis, ETSI Telecomunicacin, Universidad Politcnica de Madrid.
- Muramatsu, D., Kondo, M., Sasaki, M., Tachibana, S., Matsumoto, T., 2006. A Markov chain Monte Carlo algorithm for Bayesian dynamic signature verification. *IEEE Trans. on Information Forensics and Security* 1 (1), 22–34.
- Nagel, R., Rosenfeld, A., 1977. Computer detection of freehand forgeries. *IEEE Trans. on Computers* 26 (9), 895–905.
- Nanni, L., Lumini, A., 2006. Advanced methods for two-class problem formulation for on-line signature verification. *Neurocomputing* 69, 854–857.
- Ortega-Garcia, J., Bigun, J., Reynolds, D., Gonzalez-Rodriguez, J., 2004. Authentication gets personal with biometrics. *IEEE Signal Processing Magazine* 21 (2), 50–62.
- Ortega-Garcia, J., Fierrez-Aguilar, J., Martin-Rello, J., Gonzalez-Rodriguez, J., 2003a. Complete signal modeling and score normalization for function-based dynamic signature verification. In: *Proc. of IAPR Intl. Conf. on Audio- and Video-Based Biometric Person Authentication, AVBPA*. Springer LNCS-2688, pp. 658–667.
- Ortega-Garcia, J., Fierrez-Aguilar, J., Simon, D., Gonzalez, J., Faundez-Zanuy, M., Espinosa, V., Satue, A., Hernaez, I., Igarza, J.-J., Vivaracho, C., Escudero, C., Moro, Q.-I., December 2003b. MCYT baseline corpus: a bimodal biometric database. *IEE Proc. Vision, Image and Signal Processing* 150 (6), 391–401.
- Ortega-Garcia, J., Gonzalez-Rodriguez, J., Simon-Zorita, D., Cruz-Llanas, S., 2002. Biometric Solutions For Authentication In An E-World. Kluwer Academic Publishers, Ch. From Biometrics Technology to Applications Regarding Face, Voice, Signature and Fingerprint Recognition Systems, pp. 289–337.
- Phillips, P. J., Moon, H., Rauss, P. J., Rizvi, S., 2000. The FERET evaluation methodology for face recognition algorithms. *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 22 (10), 1090–1104.
- Plamondon, R., Lorette, G., 1989. Automatic signature verification and writer identification: The state of the art. *Pattern Recognition* 22 (2), 107–131.
- Przybocki, M., Martin, A., 2004. NIST Speaker Recognition Evaluation chronicles. In: Ortega-Garcia, J., et al. (Eds.), *ISCA Workshop on Speaker and Language Recognition, ODYSSEY*. pp. 15–22.
- Rabiner, L. R., 1989. A tutorial on Hidden Markov Models and selected applications in speech recognition. *Proceedings of the IEEE* 77 (2), 257–286.
- Ramos-Castro, D., Fierrez-Aguilar, J., Gonzalez-Rodriguez, J., Ortega-Garcia, J., 2006. Speaker verification using speaker- and test-dependent fast score normalization. *Pattern Recognition Letters* 27, (to appear).
- Ramos-Castro, D., Gonzalez-Rodriguez, J., Champod, C., Fierrez-Aguilar, J., Ortega-Garcia, J., 2005. Between-sources modelling for likelihood ratio computation in forensic biometric recognition. In: Kanade, T., Jain, A. K.,

- Ratha, N. K. (Eds.), Proc. of IAPR Intl. Conf. on Audio- and Video-Based Biometric Person Authentication, AVBPA. Springer LNCS-3546, pp. 1080–1089.
- Ratha, N., Bolle, R. (Eds.), 2004. Automatic Fingerprint Recognition Systems. Springer.
- Reynolds, D. A., Campbell, W., Gleason, T. T., Quillen, C., Sturim, D., Torres-Carrasquillo, P., Adami, A., 2005. The 2004 MIT Lincoln Laboratory speaker recognition system. In: Proc. of IEEE Intl. Conf. on Acoustics, Speech, and Signal Processing, ICASSP. Vol. 1. pp. 177–180.
- Richiardi, J., Drygajlo, A., 2003. Gaussian Mixture Models for on-line signature verification. In: Proc. of ACM SIGMM Workshop on Biometric Methods and Applications, WBMA. pp. 115–122.
- Richiardi, J., Fierrez-Aguilar, J., Ortega-Garcia, J., Drygajlo, A., March 2004. On-line signature verification resilience to packet loss in IP networks. In: Proc. of 2nd Workshop on Biometrics on the Internet, COST-275. Vigo, Spain, pp. 11–16.
- Ross, A., Nandakumar, K., Jain, A. K., 2006. Handbook of Multibiometrics. Springer.
- SC37, 2005. ISO/IEC JTC 1/SC 37 . (<http://www.jtc1.org/sc37/>).
- Simn-Zorita, D., 2004. Reconocimiento automatico mediante patrones biomtricos de huella dactilar. Ph.D. thesis, ETSI Telecomunicacin, Universidad Politecnica de Madrid.
- Simon-Zorita, D., Ortega-Garcia, J., Fierrez-Aguilar, J., Gonzalez-Rodriguez, J., 2003. Image quality and position variability assessment in minutiae-based fingerprint verification. IEE Proceedings Vision, Image and Signal Processing 150 (6), 402–408.
- Toh, K. A., Jiang, X., Yau, W. Y., 2004. Exploiting local and global decisions for multimodal biometrics verification. IEEE Trans. on Signal Processing 52, 3059–3072.
- Verlinde, P., Chollet, G., Acheroy, M., 2000. Multi-modal identity verification using expert fusion. Information Fusion 1 (1), 17–33.
- Wayman, J., Jain, A., Maltoni, D., Maio, D. (Eds.), 2005. Biometric Systems: Technology, Design and Performance Evaluation. Springer.
- Wilson, C., et al., June 2004. FpVTE2003: Fingerprint Vendor Technology Evaluation 2003. NIST Research Report NISTIR 7123 (<http://fpvte.nist.gov/>).
- Yang, L., Widjaja, B. K., Prasad, R., 1995. Application of Hidden Markov Models for signature verification. Pattern Recognition 28 (2), 161–170.
- Yeung, D. Y., Chang, H., Xiong, Y., George, S., Kashi, R., Matsumoto, T., Rigoll, G., 2004. SVC2004: First International Signature Verification Competition. In: Zhang, D., Jain, A. K. (Eds.), Proc. of Intl. Conf. on Biometric Authentication, ICBA. Springer LNCS-3072, pp. 16–22.