

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE MADRID

ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR



PROYECTO FIN DE CARRERA

**DESARROLLO DE HERRAMIENTAS
DE APOYO PARA COMPARACIÓN
FORENSE DE FIRMAS
MANUSCRITAS**

Ingeniería de Telecomunicación

Alejandro Acién Ayala
Marzo 2015

DESARROLLO DE HERRAMIENTAS DE APOYO PARA COMPARACIÓN FORENSE DE FIRMAS MANUSCRITAS

AUTOR: Alejandro Acién Ayala
TUTOR: Julián Fierrez Aguilar

Grupo de Reconocimiento Biométrico ATVS
Dpto. de Ingeniería de Telecomunicaciones
Escuela Politécnica Superior
Universidad Autónoma de Madrid
Marzo 2015



Resumen

En este proyecto se estudia y desarrolla una aplicación software que incluye herramientas de apoyo forense para el cotejo de firmas manuscritas capturadas con dispositivos digitales. Concretamente se diseñan herramientas con funcionalidades que aprovechan la información capturada por dichos dispositivos (p.ej presión, velocidad, inclinación, etc), ofreciendo una gran ayuda para los peritos a la hora de realizar el cotejo pericial.

La primera parte del proyecto se dedica a revisar la literatura para familiarizarse con los distintos recursos y herramientas de los que se dispone actualmente para el análisis biométrico en general y de firmas en particular. A continuación se estudia la metodología seguida tradicionalmente por los peritos forenses para el análisis de firmas manuscritas en papel, con el objetivo de implementar de la manera más fidedigna posible herramientas software que emulen estas metodologías para firmas digitales, incluso mejorarlas e implementar nuevas.

Para la elaboración de las herramientas de apoyo se hace uso de la interfaz gráfica GUI (del inglés Graphical User Interface) de Matlab. El proyecto consta de una aplicación visual multiventana, en la que se programan las diferentes funcionalidades resumidas a continuación:

- La primera ventana permite visualizar varias firmas de forma simultánea sobre un mismo centro de representación, así como los desplazamientos en X e Y , y la variación de la presión con el tiempo. También se pueden realizar diversas operaciones sobre las firmas para poder permitir una comparación más sencilla como son rotar, normalizar, interpolar, etc.
- Una vez escogida una de las firmas, ésta se puede analizar de forma individual en la segunda ventana en la cual se pueden ver otras funcionalidades como son la de reproducir la ejecución de la firma, observar el trazado de la misma al vuelo (conjunto de muestras capturadas cuando el estilete no está apoyado), observar la firma con diferentes escalas de colores según la presión ejercida, etc. Por último, se podrán escoger trazos aislados de la firma para realizar un análisis más exhaustivo o trazos de dos firmas diferentes para poder compararlos en la última ventana.
- En la tercera ventana se pueden visualizar otras funcionalidades temporales de los trazos escogidos como la velocidad, aceleración, desplazamiento en X e Y , y la presión. También es posible calcular ángulos y distancias sobre los trazos con respecto al eje horizontal, activar zoom, visualizar las muestras del trazo, calcular el área que ocupa tanto en pulgadas como en centímetros, rotar y desplazar. Finalmente se incluyen las funcionalidades de fluidez temporal, temblor espacial, velocidad y aceleración media, y duración que servirán como una ayuda más a los peritos para determinar la autenticidad de la firma, obteniendo para ello una puntuación entre [0-10] y unas estadísticas poblacionales que indicarán si la puntuación obtenida pertenece a una firma genuina o falsa. Para ello se han desarrollado una serie de algoritmos en Matlab, cuyos resultados variarán según unos parámetros de

entrada que serán necesarios optimizar para que puedan discernir de la mejor manera posible entre firmas falsas y genuinas. Para poder obtener los parámetros óptimos, se hace uso de diferentes bases de datos así como de firmas capturadas con distintos dispositivos, a saber:

- Wacom STU-500
- Wacom STU-530
- Wacom DTU-1031
- Tablet Samsung Galaxy Note 10.1
- Tablet Samsung Ativ 7

Todos los dispositivos capturan para cada muestra la posición X e Y , el tiempo entre muestras y la presión ejercida con el estilete.

Una vez implementadas las herramientas se realiza un pequeño estudio para comprobar el potencial de las mismas, usando para este fin una base de datos con firmas tanto genuinas como falsificadas de todos los dispositivos mencionados anteriormente. Para esta parte experimental del proyecto se hace uso de la base de datos obtenida por el ATVS e-BioFirma y la base de datos Biosecure DS2.

Palabras Clave

Biometría, firmas manuscritas, perito forense, dispositivos móviles, herramientas de apoyo, aplicación visual multiventana, cotejo de firmas, firmas genuinas y falsificadas.

Abstract

In this project, an application software based on forensic tools is studied and developed to support the comparison of handwriting signature done by digital devices. Mainly, tools with the ability to benefit from the information taken from these devices (ex. pressure, velocity, inclination, etc) are designed, which offers a great help for the forensic handwriting examiners (FHE's) when they analyze the expert comparison.

The first part of the project is dedicated to review the literature to become familiar with the different resources and tools that are available nowadays for the biometrics analysis in general and particularly for signatures. In the second part, the methodology that FHE's traditionally use to analyze handwritten signatures on paper is studied, with the objective of implementing the most reliable software tools that simulate these methodologies for digital signatures, or even improve and implement new methodologies.

For the implementation of the support tools the Graphical User Interface (application from Matlab) is used. The project consists of a visual application with multiple windows, in which we analyse the different functionalities that will now be reviewed:

- The first window allows visualization of many signatures simultaneously on the same representation centre, as well as the movements of X and Y , and the temporal pressure variation. Also, numerous operations on signatures can be done to allow a simpler comparison such as rotation, normalization, interpolation, etc.
- Once a signature is chosen, it can be analysed individually in the second window in which you can find other functionalities like reproducing the signature, observing the samples acquired when the pen is not touching the device, viewing the signature with different colour scales according to the pressure applied, etc. Lastly, isolated strokes from the signature can be chosen and be exhaustively analysed or strokes from two different signatures can be compared in the last window.
- In the third window we can visualize other temporal functionalities of the chosen strokes such as velocity, acceleration, movements in X and Y , and pressure. It is also possible to calculate angles and distances of the strokes considering the horizontal axe, to activate zoom, to visualize the sample strokes, to calculate the area that it occupies in inches or centimetres, to rotate and displace. Finally, functionalities such as temporal fluency, spatial tremor, average velocity and acceleration, and the duration will be included. These five functionalities will assist the FHE's to conclude the authenticity of the signature, this way obtaining a score between [0-10] and population statistics that will estimate if the calculated score belongs to a genuine or forged signature. In order to do this, a series of algorithms from Matlab have been developed, the results from these algorithms can vary depending on initial parameters that will be optimised in order to distinguish between genuine and forged signatures. To estimate these optimal parameters, different databases with signatures acquired from several devices are used, these are:
 - Wacom STU-500
 - Wacom STU-530
 - Wacom DTU-1031
 - Tablet Samsung Galaxy Note 10.1
 - Tablet Samsung Ativ 7

All the devices acquire the position X and Y for each sample, the time between them and the pressure applied on the pen.

Once the tools are developed a study will be carried out to verify their usefulness, using for this purpose a database containing genuine and forged signatures from all the devices previously mentioned. For this experimental part of the project a database obtained through ATVS e-BioFirma and Biosecure DS2 were used.

Key words

Biometrics, handwritten signatures, forensic handwriting examiners, mobile devices, support tools, multiple window visual application, data base ATVS, matching signatures, genuine and forged signatures.

Agradecimientos

Quiero agradecer en primer lugar a Javier Ortega, por brindarme la oportunidad de trabajar en un lugar tan magnífico como es el ATVS en el que he aprendido bastante sobre biometría, que hasta entonces era un mundo casi completamente desconocido para mí.

También quiero agradecer toda la ayuda y el esfuerzo dedicado por parte de mi tutor Julián Fierrez, con el que he podido contar en todo momento, quién a pesar de sus múltiples ocupaciones me ha ido guiando a lo largo de todo el proyecto y sin su ayuda nunca hubiera llegado tan lejos. Debo reconocer también la gran ayuda aportada por Rubén Vera, la cual ha sido fundamental para llevar a cabo gran parte de este proyecto.

También quiero agradecerlo enormemente a mis dos compañeras de carrera Ana y Elena, ya que sin el apoyo constante y paciencia infinita que han tenido conmigo no hubiera conseguido superar estos cinco duros años de carrera. Por último quiero agradecer todo el apoyo prestado por mi familia, animándome en los momentos más difíciles y ayudándome en todo lo que podían y cuando más lo necesitaba.

Sin todos ellos nada de esto hubiera sido posible, muchísimas gracias.

Alejandro Acién Ayala

Marzo 2015

Índice general

Índice general	IX
Índice de figuras	XI
Índice de figuras	XI
Índice de cuadros	XIV
Índice de cuadros	XV
1. Introducción	1
1.1. Motivación del proyecto	1
1.2. Objetivos y enfoque	2
1.3. Organización de la memoria	2
2. Introducción a la biometría	5
2.1. Rasgos biométricos	6
2.2. Rendimiento y calidad de los sistemas biométricos	7
2.2.1. Medidas generales de rendimiento	7
2.2.2. Calidad	9
2.3. Sistemas biométricos basados en firma manuscrita	10
2.3.1. Sistemas de verificación de firma <i>on-line</i>	11
2.3.2. Aplicaciones	18
3. Estudio del análisis pericial de firma manuscrita	19
3.1. Introducción	19
3.2. Cotejo de firmas manuscritas	20
3.2.1. Muestras para el examen de firmas	20
3.2.2. Análisis de firmas indubitadas y dubitadas	22
3.2.3. Información característica de interés	22
3.2.4. Comparación de firmas	24
3.3. Análisis estadístico de las tasas de error del cotejo pericial	25
3.3.1. Análisis estadístico sobre el poder discriminativo de la información dinámica	26

4. Selección de rasgos identificativos	29
4.1. Selección de rasgos identificativos para la herramienta de análisis forense	29
5. Diseño de la herramienta forense	37
5.1. Breve descripción del software de programación empleado	37
5.2. Diseño global de la herramienta	38
5.3. Descripción funcional	40
5.3.1. Primera ventana: carga de firmas	40
5.3.2. Segunda ventana: selección de trazos	43
5.3.3. Tercera ventana: análisis de trazos	48
6. Bases de datos y experimentos realizados	55
6.1. Bases de datos	55
6.1.1. Biosecure DS2	55
6.1.2. e-BioFirma	57
6.2. Experimentos	58
6.2.1. Fluidez temporal	58
6.2.2. Temblor espacial	61
7. Conclusiones y trabajo futuro	65
7.1. Conclusiones	65
7.2. Trabajo futuro	66
Anexos	70
A. Presupuesto	71
B. Pliego de condiciones	73

Índice de figuras

2.1. Ejemplos de rasgos biométricos que pueden ser usados para identificar a un individuo. Rasgos físicos son la huella dactilar, iris, cara y geometría de la mano, mientras que los de comportamiento incluyen firma, la dinámica de tecleo y la manera de caminar.	5
2.2. Umbral de decisión para determinar la autenticidad del vector de muestras.	8
2.3. Ejemplo de curva ROC (del inglés Receiver Operating Characteristic).	9
2.4. Ejemplo de EER obtenido en función del tamaño del vector de características para una PDA y una Pen Tablet. Figura extraída de [M. Martínez, 2008]	9
2.5. Ejemplo de curva DET (del inglés Detection Error Tradeoff) de un mismo sistema utilizando firmas falsificadas por impostores expertos y casuales, se aprecia como el rendimiento del sistemas baja (aumento de la EER) para las falsificaciones de impostores expertos (skilled forgeries). Figura extraída de [M. Martínez, 2008]	10
2.6. Arquitectura adoptada por la mayoría de los sistemas de verificación de firmas on-line. Figura extraída de [Fierrez and Ortega-Garcia, 2007]	11
2.7. (a) Firma capturada con una Wacom. (b) Funciones temporales de la misma, se aprecia que el dispositivo detecta los pen-ups correspondientes a las muestras con presión 0.	12
2.8. Firma capturada con una Pen Tablet, se aprecia que la coordenada y presenta una mayor variación que la x. Figura extraída de [Fierrez and Ortega, 2008]	15
2.9. Ejemplo de prealineamiento de dos firmas. (a) Firmas alineadas por el centro de masas. (b) Firmas alineadas por el centro geométrico.	15
2.10. (a) Ejemplo de factores de peso simétrico w_k en DTW. (b) Ejemplo de correspondencia punto a punto entre dos firmas genuinas usando DTW. Figura extraída de [J. Fierrez, 2006]	17
2.11. Representación gráfica de una topología Bakis de HMMs.	18
3.1. Examen grafonómico realizado por un perito forense en el cotejo de dos firmas, presuntamente del mismo individuo. (a) Firma auténtica. (b) Posible falsificación. Extraído de [Uz, 2013]	20
3.2. Ejemplos cuerpo de firmas realizado por un único sujeto. Extraído de [Uz, 2013]	21
3.3. Se aprecian los temblores propios de las firmas imitadas así como una menor fluidez del trazo. Extraído de [Uz, 2013]	23
3.4. (a) y (c) ejemplos de firmas genuinas. (b) Firma simulada clasificada como imitada por al menos un perito forense. (d) Firma simulada clasificada como genuina por al menos un perito forense. Extraído de [Uz, 2013]	24

3.5. <i>Ejemplo del análisis grafonómico llevado a cabo sobre la letra ‘n’ de una firma, se observa que la inclinación es la misma pero la ejecución del trazado es diferente. Extraído de [Uz, 2013]</i>	24
3.6. <i>Histogramas de los resultados obtenidos de la base de datos SIGMA. Figura adaptada de [S. M. S. Ahmad et al., 2013]</i>	27
4.1. <i>(a) Ejemplo de firma genuina. (b) y (c) Velocidades en el eje X e Y respectivamente.</i>	31
4.2. <i>(a) Ejemplo de firma imitada. (b) y (c) Velocidades en el eje X e Y respectivamente.</i>	32
4.3. <i>Distribución poblacional para la fluidez de la firma sobre la base de datos e-BioFirma. Las firmas del ejemplo de las Figuras 4.1 y 4.2 se incorporan a dicha distribución con línea punteada azul y roja para los casos de firma genuina e imitación respectivamente.</i>	33
4.4. <i>(a) Ejemplo de firma genuina original y suavizada. (b) Ejemplo de firma imitada original y suavizada.</i>	34
4.5. <i>Distribución poblacional para el temblor de la firma sobre la base de datos e-BioFirma. Las firmas del ejemplo de la Figura 4.4 se incorporan a dicha distribución con línea punteada azul y roja para los casos de firma genuina e imitación respectivamente.</i>	35
5.1. <i>Primera ventana de la herramienta Sign-Analyzer.</i>	38
5.2. <i>Segunda ventana de la herramienta Sign-Analyzer.</i>	39
5.3. <i>Tercera ventana de la herramienta Sign-Analyzer con trazos pertenecientes a la misma firma.</i>	39
5.4. <i>Tercera ventana de la herramienta Sign-Analyzer con trazos pertenecientes a dos firmas diferentes.</i>	40
5.5. <i>Ejemplo del formato de fichero permitido.</i>	41
5.6. <i>Ejemplo de representación de varias firmas simultáneas, la firma en negro esta seleccionada.</i>	41
5.7. <i>Diferentes centros de representación, las funciones temporales también se ven alteradas por la elección del centro aunque no se muestren. (a) Centro de masas. (b) Centro geométrico. (c) Origen de la firma.</i>	43
5.8. <i>Normalización de dos firmas de tamaño diferente, nuevamente las funciones temporales también se ven alteradas por la normalización aunque no se muestren. (a) Sin normalizar. (b) Con normalización.</i>	44
5.9. <i>Alineación temporal de dos firmas de diferente duración. (a) Sin alinear. (b) Con alineamiento.</i>	44
5.10. <i>Firma en color según la presión ejercida. (a) Representación espacial. (b) Representación temporal.</i>	45
5.11. <i>Los pen-ups aparecen enumerados según el orden en el que se realizarón.</i>	45
5.12. <i>Las muestras que representan el vuelo de la firma aparecen coloreadas en morado.</i>	46
5.13. <i>Ejemplo de uso de la selección de trazos por muestras.</i>	47
5.14. <i>El botón elegir punto permanecerá en rojo para indicar que no se puede realizar otra opción hasta que no esté fijado, la cruz muestra el punto escogido.</i>	47

5.15. El botón permanecerá en rojo para indicar que no se puede realizar otra opción hasta que no estén fijados ambos puntos.	48
5.16. Velocidad y aceleración de dos trazos de una misma firma, los segmentos en azul indican los trazos seleccionados y en rojo aparece la firma completa.	49
5.17. Ejemplos de cálculos de segmento, el ángulo se calcula con respecto a la horizontal. (a) Segmento libre. (b) Segmento en trayectoria.	50
5.18. Ejemplo de visualización de las muestras de dos trazos.	50
5.19. Ejemplo de cálculo del Área del trazo, la caja negra indica el área en la que está contenida.	51
5.20. Estadísticas poblacionales de todas las características, en verde se muestran las de genuinos y en rojo la de impostores, la línea indica la puntuación obtenida de una firma.	52
5.21. Selección de dos trazos de dos firmas diferentes, si las opciones ver muestras y/o calcular área están activadas éstas se hallan sobre la firma seleccionada.	53
6.1. Distribución de edades para los tres conjuntos de Biosecure.	56
6.2. Wacom Intuos 3 A6. Las firmas fueron tomadas colocando un papel encima de la Wacom, de manera que se capturarán tanto en papel como en digital.	57
6.3. Histograma de la distribución de edades de e-BioFirma.	57
6.4. Dispositivos empleados en la captura en e-BioFirma: (a) Wacom STU-500 (b) Wacom STU-530 (c) Wacom DTU-1031 (d) Tablet Samsung Galaxy Note 10.1 (e) Tablet Samsung Ativ 7	59
6.5. EER para diferentes valores del umbral V_0 . Los puntos en rojo son los medidos y la recta representa la interpolación del resto de valores.	60
6.6. Curva DET para la fluidez con un umbral óptimo V_0 de dos.	60
6.7. Filtro Gaussiano a diferentes frecuencias de corte, para valores de σ : 20 azul, 25 rojo, 30 verde, 50 negro, 70 amarillo y 100 magenta.	61
6.8. EER para diferentes valores de σ . Los puntos en rojo son los medidos y la recta representa la interpolación del resto de valores.	62
6.9. EER para diferentes valores de σ . Los puntos en rojo son los medidos y la recta representa la interpolación del resto de valores.	62
6.10. Curva DET para el temblor con una σ óptima de 25.	63

Índice de cuadros

2.1.	<i>Comparativa entre las características de distintos rasgos biométricos. Los niveles cuantitativos se representan por: $A \rightarrow$ Alto, $M \rightarrow$ Medio y $B \rightarrow$ Bajo.</i>	7
2.2.	<i>Set de características globales. T denota intervalo de tiempo, t denota instante de tiempo, N número de eventos y θ el ángulo. Tabla adaptada de [Fierrez-Aguilar et al., 2005]</i>	13
2.3.	<i>Cuadro de funciones temporales. La notación del punto superior (p.ej \dot{x}_n) indica derivada con respecto al tiempo. Tabla adaptada de [Fierrez-Aguilar et al., 2005] .</i>	14
3.1.	<i>Nivel de complejidad de tres ejemplos de firmas según cuatro expertos forenses. El nivel de complejidad de la firma está en el rango entre 0 (muy simple) y 100 (muy compleja). Cuadro extraído de [L. Alewijnse, 2013]</i>	25
3.2.	<i>Tasas de acierto, error y resultados inconclusivos sobre los resultados de cotejos forenses de firmas por parte de expertos periciales. Cuadro extraído de [C. Bird et al., 2010]</i>	25
6.1.	<i>Distribuciones de los usuarios de la base de datos Biosecure.</i>	56
6.2.	<i>Distribuciones de los usuarios de la base de datos e-BioFirma.</i>	58

1

Introducción

1.1. Motivación del proyecto

El auge que han tenido los dispositivos móviles de las últimas décadas ha impulsado un gran avance en el campo de las tecnologías táctiles, como son las PDAs o las Tablet PC. Esto ha hecho posible la proliferación de sistemas de reconocimiento biométrico basados en escritura y firma manuscrita entre otros [Fiérrez and Ortega, 2008].

La firma es un rasgo que siempre ha tenido una gran aceptación social y ha sido muy utilizada para realizar transacciones legales de todo tipo durante cientos de años [Fiérrez and Ortega, 2008]. De esta manera el estudio de los rasgos biométricos de las firmas adquiere una gran importancia sobre todo en el ámbito jurídico, donde saber discernir entre firmas auténticas e imitaciones es clave. La firma también es el segundo rasgo biométrico de comportamiento (después de la voz) que más uso tiene en el ámbito comercial, con aproximadamente 1.7% de la cuota de mercado. Además el mercado de los sistemas basados en firma manuscrita está creciendo a un ritmo mayor que el resto de los rasgos biométricos, debido especialmente al aumento de los dispositivos táctiles.

Existen múltiples desafíos a los que tienen que hacer frente los sistemas de reconocimiento biométrico de firmas manuscritas, entre los más importantes destacan:

- **Baja universalidad:** ya que no todas las personas son capaces de realizar una firma.
- **Alta variabilidad:** firmas del mismo sujeto pueden variar debido a diversos factores como pueden ser el estado de ánimo, salud, etc.
- **Baja permanencia:** debido a que el estilo de escritura de la firma tiende a cambiar con el paso de los años.
- **Falsificaciones:** provenientes del mismo sujeto (firmas simuladas) o por un falsificador, éstas se clasifican en falsificadores aleatorios, aquellos que no tienen ninguna información de la firma objetivo a priori, y los falsificadores profesionales que si tienen alguna información como la ejecución del trazado (, pág 189).

Aunque los peritos forenses llevan décadas en el cotejo pericial, la inclusión de firmas dinámicas al mercado es bastante reciente y los peritos no cuentan con herramientas potentes que les

permitan tratar con este tipo de firmas de forma adecuada. Por este motivo, el presente proyecto pretende solventar esta necesidad cada vez mayor debido al auge de las tecnologías táctiles.

1.2. Objetivos y enfoque

El principal objetivo de este proyecto es, desarrollar e implementar una serie de herramientas software que sirvan de ayuda a los peritos para el cotejo de firmas dinámicas, donde la información adicional capturada por los dispositivos móviles (presión, velocidad, inclinación, etc [Fiérrez and Ortega, 2008]) sería de una gran ayuda a la hora de realizar el análisis detallado de éstas.

Otro de los objetivos de este trabajo es conseguir la mejor interoperabilidad posible entre los diferentes dispositivos móviles, para que la información obtenida del análisis de la firma pueda ser independiente al dispositivo empleado para su captura. La necesidad de interoperabilidad nace de la diversidad subyacente en los parámetros de captura de los diferentes dispositivos, como pueden ser la frecuencia de muestreo, los niveles de presión empleados o el tamaño de la firma debido a diferencias en los tamaños de las pantallas.

Aparte de la implementación de estas herramientas software, se pretenderá hacer un estudio sobre la posible adición de nuevos métodos de análisis de firmas, más exactamente a lo referente al temblor espacial y la fluidez temporal. Herramientas cuya implementación solo se puede desarrollar vía software debido a la necesidad del uso de datos grafísticos cuya obtención solo es posible con los dispositivos móviles, y cuyo objetivo es mejorar la capacidad de análisis y cotejo de firmas.

Para todo ello se desarrollará una serie de algoritmos en Matlab, cuyos resultados variarán según unos parámetros de entrada que serán necesarios optimizar para que puedan discernir de la mejor manera posible entre firmas falsas y auténticas. Para obtener los parámetros óptimos, será necesario el uso de firmas manuscritas capturadas con distintos dispositivos, a saber:

- Wacom STU-500
- Wacom STU-530
- Wacom DTU-1031
- Tablet Samsung Galaxy Note 10.1
- Tablet Samsung Ativ 7

Una vez implementada las herramientas se pretende realizar un pequeño estudio para comprobar el potencial de la misma, usando para ello diferentes bases de datos con firmas obtenidas de los dispositivos anteriormente mencionados, tanto genuinas como falsificadas.

1.3. Organización de la memoria

Este documento está estructurado en siete capítulos que se resumen a continuación.

Capítulo 1: Introducción. En este capítulo se detallan los motivos que han impulsado el desarrollo de este proyecto así como los objetivos que se pretenden alcanzar.

Capítulo 2: Introducción a la biometría. Conceptos básicos de biometría: tipos de rasgos biométricos, características deseables de un rasgo biométrico, etc. En este capítulo también se tratan las características principales de las firmas dinámicas: historia y aplicaciones, sistemas de verificación, evaluación del rendimiento y medidas de calidad.

Capítulo 3: Estudio del análisis pericial de firma manuscrita. Revisión del estado del arte en todos los temas relacionados con el ámbito forense de cotejo de firmas manuscritas realizados por peritos. Desde un análisis general sobre la identificación característica de interés para firmas indubitadas y dubitadas, hasta un análisis en detalle del método empleado para la comparación de firmas. Finalmente se expondrá un pequeño análisis estadístico sobre las tasas de errores de los peritos forenses a la hora de determinar la autenticidad de las firmas.

Capítulo 4: Selección de rasgos identificativos. En este capítulo se pretende fusionar los métodos tradicionales empleados por los peritos forenses en el cotejo de firmas con las técnicas biométricas de autenticación de firma existentes con el objetivo de plantear la nuevas funcionalidades que tendrá la herramienta de análisis forense.

Capítulo 5: Diseño de la herramienta forense. El quinto capítulo describe detalladamente todos los aspectos del diseño de la aplicación software desarrollada, así como un análisis en detalle de la estructura y funcionalidades de cada una de sus ventanas. También se detallarán algunos de los aspectos más relevantes empleados en la programación de la aplicación.

Capítulo 6: Bases de datos y experimentos realizados. En este capítulo se describen los experimentos realizados en este proyecto, así como los sistemas y bases de datos utilizados para este fin. Posteriormente, se presentan los resultados obtenidos de las bases de datos empleadas y se analizan minuciosamente para poder extraer conclusiones útiles que permitan optimizar algunos de los algoritmos empleados y con ello mejorar el rendimiento final de la aplicación.

Capítulo 7: Conclusiones y trabajo futuro.

2

Introducción a la biometría

La biometría es una ciencia que consiste en identificar la identidad de un individuo, de manera automática, basándose en algunas de sus características fisiológicas o de comportamiento [Jain and Ross, 2008]. La importancia de la biometría en la sociedad moderna se ha visto reforzada por la necesidad de conseguir sistemas de identificación a gran escala, cuya funcionalidad depende de la precisión para identificar a un individuo en el contexto de diferentes aplicaciones. Ejemplos de estas aplicaciones incluyen desde permitir el acceso a instalaciones nucleares, embarcar en vuelos comerciales o realizar transacciones financieras. Algunos de los rasgos biométricos más utilizados son: huella dactilar, iris, geometría de la mano, cara, firma, voz, etc. (ver Figura 2.1)



Figura 2.1: Ejemplos de rasgos biométricos que pueden ser usados para identificar a un individuo. Rasgos físicos son la huella dactilar, iris, cara y geometría de la mano, mientras que los de comportamiento incluyen firma, la dinámica de tecleo y la manera de caminar.

Una de las mayores ventajas de la biometría es la posibilidad de establecer una identificación basándose en *quién eres* en vez de *qué posees* (p.ej tarjetas ID) o *qué recuerdas* (p.ej. claves, contraseñas, etc). Debido a que los rasgos biométricos de una persona son intransferibles a otra, la seguridad de estos sistemas es considerablemente mayor. Actualmente en muchas aplicaciones la biometría se usa para complementar a las tarjetas ID y a las contraseñas, aumentando así la seguridad del sistema.

Gracias a ello, la biometría ofrece otras muchas posibilidades, como el reconocimiento negativo o no repudio [S. Prabhakar *et al.*, 2003]. En el reconocimiento negativo el sistema reconoce si un individuo se ha inscrito ya en la base de datos aunque lo niegue, esto es especialmente crítico en aplicaciones tales como operaciones bancarias, donde un impostor podría acceder a múltiples beneficios bajo diferentes nombres. Mientras que el no repudio es una manera de garantizar que si un individuo que accede al sistema, no puede negar haberlo hecho más tarde alegando que un impostor se ha hecho pasar por él bajo falsos credenciales.

2.1. Rasgos biométricos

Un gran número de rasgos biométricos son usados para diferentes aplicaciones. Cada una tiene sus ventajas y desventajas, por lo que la elección del rasgo biométrico usado es uno de los puntos más críticos en el desarrollo del sistema. Existen siete características fundamentales en un rasgo biométrico que determinan su utilización para una determinada aplicación [Jain *et al.*, 1999]. Éstos son:

- **Universalidad:** el rasgo biométrico debe estar presente en todas las personas.
- **Unicidad:** dicho rasgo debe ser suficientemente distintivo de la persona que lo posee y no debería ser parecido al de otro individuo.
- **Permanencia:** es deseable que el rasgo biométrico permanezca invariante durante largos periodos de tiempo. Si el rasgo varía significativamente a corto plazo no es útil.
- **Mensurabilidad:** el rasgo debe ser accesible por un sensor para poder ser capturado y procesado adecuadamente. Además, este proceso de adquisición no debe ser molesto para el usuario.
- **Aceptabilidad:** la población que va a utilizar el sistema biométrico debe ser receptiva a presentar su rasgo identificativo ante el sensor.
- **Rendimiento:** la tasa de identificación que se alcanza con el rasgo biométrico debe ser lo suficientemente alta para superar el margen impuesto por la aplicación.
- **Facilidad de imitación:** es conveniente que el rasgo sea difícilmente imitable para evitar la entrada de impostores en el sistema haciéndose pasar por otro usuario.

Ninguno de los rasgos biométricos conocidos en la actualidad reúne todas estas características simultáneamente (ver Cuadro 2.1) por lo que será interesante utilizar el rasgo que mejor cumpla los requisitos impuestos por la aplicación para el que va a ser utilizado. Por ejemplo, para una prueba forense será imprescindible que el rasgo biométrico tenga un alto grado de unicidad (p.ej. huella dactilar) mientras que para un control de accesos a una fábrica es preferible una aceptación alta por parte de los usuarios manteniendo un cierto nivel de rendimiento (p.ej. geometría de la mano).

		Característica							
		Universalidad	Unicidad	Permanencia	Mensurabilidad	Rendimiento	Aceptabilidad	Facilidad de imitación	
Rasgos fisiológicos	Cara	A	B	M	A	B	A	A	
	Huella dactilar	M	A	A	M	A	M	M	
	Mano	Geometría	M	M	M	A	A	M	M
		Huella palmar	M	A	A	M	A	M	M
		Venas	M	M	M	M	M	M	B
	Iris	A	A	A	M	A	B	B	
Oreja	M	M	A	M	M	A	M		
Rasgos de comportamiento	Firma	B	B	B	A	B	A	A	
	Voz	M	B	B	M	B	A	A	
	Dinámica de tecleo	B	B	B	M	B	M	M	
	Manera de caminar	M	B	B	A	B	A	M	

Cuadro 2.1: Comparativa entre las características de distintos rasgos biométricos. Los niveles cuantitativos se representan por: $A \rightarrow$ Alto, $M \rightarrow$ Medio y $B \rightarrow$ Bajo.

2.2. Rendimiento y calidad de los sistemas biométricos

Mientras que en los sistemas basados en claves, donde se necesita que la contraseña introducida por el usuario sea exactamente la misma que la del sistema, en los sistemas basados en biometría una perfecta similitud entre el vector de muestras adquiridas y el vector a comparar almacenado en la base de datos no suele darse. Esto es debido a la variabilidad intrínseca que posee el rasgo biométrico como consecuencia de múltiples factores: unas malas condiciones de detección (p.ej. huella dactilar ruidosa debido a un mal funcionamiento del sensor), alteraciones en las características biométricas del usuario, cambios en las condiciones ambientales (p.ej. niveles de iluminación diferentes en el reconocimiento facial), etc.

Todos estos factores hacen que dos vectores de muestras obtenidas del mismo usuario muy rara vez sean iguales, de hecho, dos vectores exactamente iguales podría indicar que un posible ataque se está llevando a cabo contra el sistema. La variabilidad propia de un rasgo biométrico perteneciente a un mismo individuo se denomina variación *intra-clase*, mientras que la variabilidad que se observa entre dos vectores de muestras de dos usuarios diferentes se denomina variación *inter-clase*. Un rasgo biométrico útil el cual ofreciera un alto rendimiento sería aquel que tuviera una variación *intra-clase* muy pequeña (muestras adquiridas del mismo individuo produjera vectores de muestras similares) y alta *inter-clase* (diferentes individuos produjeran vectores de muestras muy diferentes), y de esta manera poder discernir con la mayor fiabilidad posible entre usuarios e impostores [Jain and Ross, 2008].

2.2.1. Medidas generales de rendimiento

El grado de similitud entre dos vectores de muestras biométricas viene determinado por una puntuación. Si la puntuación supera un cierto umbral τ significa que el vector de muestras a

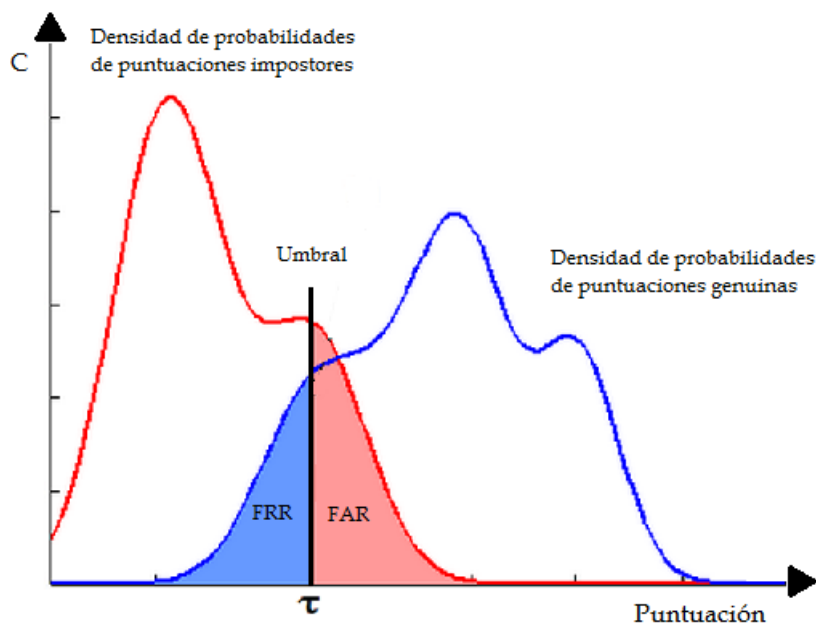


Figura 2.2: Umbral de decisión para determinar la autenticidad del vector de muestras.

comparar es genuino, mientras que en el caso contrario el vector de muestras pertenece a un impostor.

En la Figura 2.2 se observan las densidades de probabilidad de las puntuaciones de impostores así como la de los genuinos, y ambas se solapan en mayor o menor medida. Este solape da lugar a que en algunas ocasiones la puntuación obtenida por un impostor supere el umbral establecido τ , produciendo así una falsa aceptación. Por consiguiente, el área bajo la curva de densidad de probabilidad de puntuaciones de impostores que supera el umbral se denomina tasa de falsa aceptación *FAR* (del inglés *False Accept Rate*). Del mismo modo el área bajo la curva de densidad de probabilidad de puntuaciones de genuinos que se encuentra por debajo del umbral se denomina tasa de falso rechazo *FRR* (del inglés *False Reject Rate*), que ocurriría cuando un usuario genuino es rechazado considerándole impostor.

Ambos errores se miden en porcentajes y se pueden variar regulando el umbral τ , pero para un sistema biométrico dado, no es posible disminuir los dos a la vez, y quedará a elección del diseñador el error que se prefiera reducir. En la Figura 2.3 se aprecia que al intentar bajar el *FRR*, el *FAR* aumenta y viceversa. De ésta manera en aquellos sistemas en los que se precise un alto grado de seguridad, será necesario diseñarlos con una tasa de falsa aceptación *FAR* baja para evitar intrusiones, mientras que en aquellos sistemas en los que el número de usuarios que acceden a él por segundo es muy alto y no precisa de mucha seguridad será más conveniente una tasa de falso rechazo *FRR* baja para evitar que el sistema se ralentice, o en aplicaciones forenses donde se podría rechazar a un posible criminal.

Existe un único umbral llamado τ_{EER} para el cual la tasa de falso rechazo es igual a la tasa de falsa aceptación, esto es $FAR=FRR$. El valor de *FRR* y *FAR* alcanzado en dicho punto se define como *EER* (del inglés *Equal Error Rate*) y a menudo es utilizado para comparar el rendimiento de varios sistemas biométricos sobre un conjunto dado de muestras.

En la Figura 2.3 se representa *FRR* frente a la *FAR* para distintos valores del umbral de decisión τ , esta forma de representación se denomina *ROC* (del inglés *Receiver Operating Characteristic*) y es la manera más común de evaluar el rendimiento de un sistema biométrico, por tanto, una *EER* baja indica un mejor rendimiento [A. Martin *et al*, 1997].

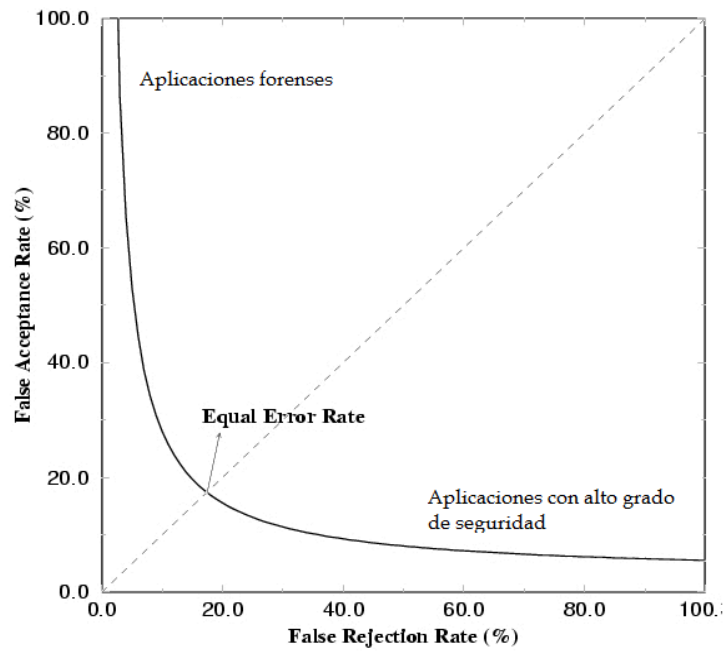


Figura 2.3: Ejemplo de curva ROC (del inglés Receiver Operating Characteristic).

2.2.2. Calidad

La calidad de los datos capturados en un sistema biométrico suele ser uno de los principales responsables del rendimiento final de éste, por lo que contar con un buen dispositivo de captura es imprescindible para minimizar el error producido debido a la distorsión que introduce. En ocasiones, recurrir a diferentes dispositivos de captura para un sistema biométrico es inevitable, como podría ser el caso de los sistemas biométricos basados en firmas manuscritas.

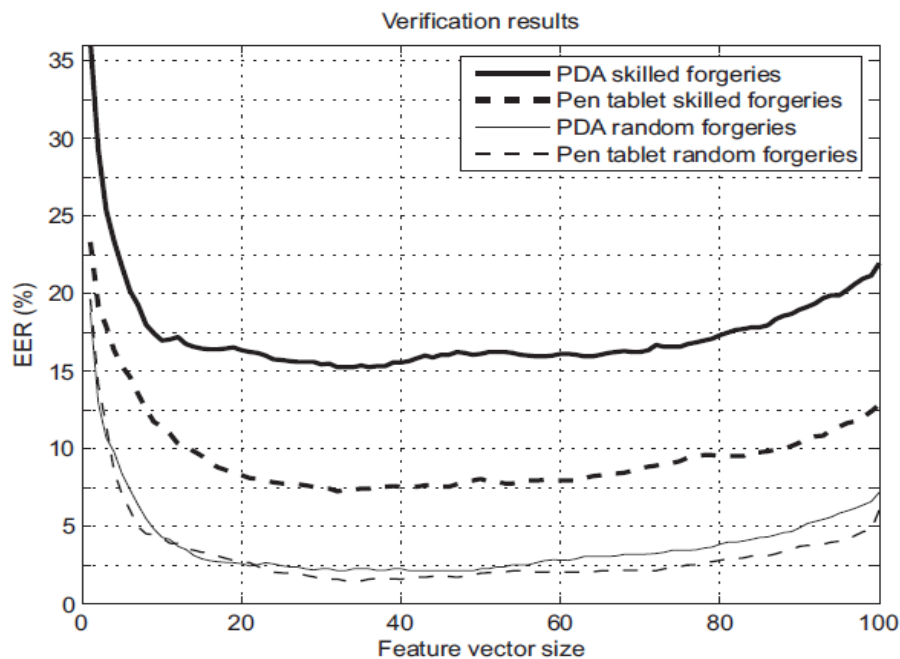


Figura 2.4: Ejemplo de EER obtenido en función del tamaño del vector de características para una PDA y una Pen Tablet. Figura extraída de [M. Martínez, 2008]

En ellos, las firmas capturadas con diferentes dispositivos suele ocurrir y ofrecen calidades diferentes debido a sus características físicas, ya sea por tener una frecuencia de muestreo o una resolución de pantalla distinta.

En la Figura 2.4 se aprecia como el valor EER varía muy significativamente entre dos dispositivos de ejemplo [M. Martínez, 2008]. Cuando esto sucede, es necesario la implementación de algoritmos que consigan buenas tasas de reconocimiento independientemente del dispositivo de captura utilizado. Para ello se suele recurrir a la normalización de los datos de entrada, normalización de las puntuaciones del sistema, etc.

2.3. Sistemas biométricos basados en firma manuscrita

La firma manuscrita es un rasgo biométrico muy antiguo y muy utilizado a lo largo de la historia [R. Plamondon and G. Lorette, 1989; R. Plamondon and S. N. Srihari, 2000]. El estudio de los rasgos biométricos de las firmas adquiere una gran importancia sobre todo en el ámbito jurídico, en el cual demostrar la autoría de una firma es una cuestión clave.

Los sistemas basados en verificación automática de firmas manuscritas suponen aún un gran desafío, debido principalmente a la alta variabilidad que hay entre las firmas de un mismo individuo o el alto grado de falsificadores, que debido a su naturaleza impredecible no es posible modelarlos durante el diseño del sistema de verificación. Similar a otros rasgos biométricos, los impostores pueden saber alguna información sobre el sujeto a suplantar (p.ej. el recorrido del trazo, ver Figura 2.5) y degradan significativamente el rendimiento cuando esta información es usada para discernir. Como resultado, los impostores se suelen agrupar en dos clases: impostores casuales (en inglés *random forgeries*) que no conocen ninguna información del sujeto al que falsifican y los impostores expertos (en inglés *skilled forgeries*) que sí tienen información al respecto.

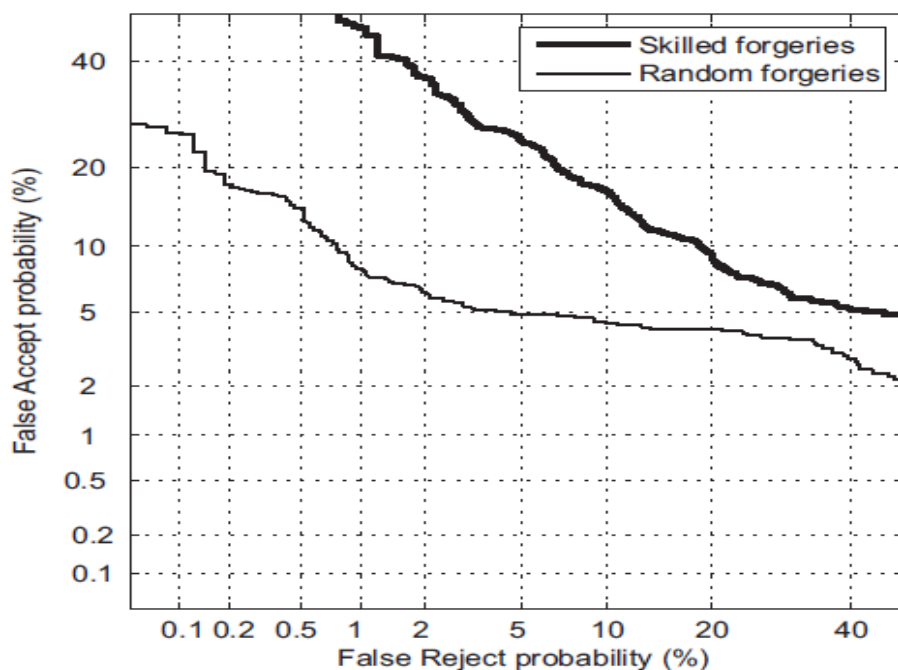


Figura 2.5: Ejemplo de curva DET (del inglés *Detection Error Tradeoff*) de un mismo sistema utilizando firmas falsificadas por impostores expertos y casuales, se aprecia como el rendimiento del sistemas baja (aumento de la EER) para las falsificaciones de impostores expertos (*skilled forgeries*). Figura extraída de [M. Martínez, 2008]

Otro de los desafíos que presentan los sistemas basados en firma manuscrita es la baja universalidad, ya que no todo el mundo es capaz de realizar una firma, o la baja permanencia, debido a que ésta suele variar con los años.

Los sistemas de verificación de firmas se clasifican en dos grandes grupos, según como se hayan obtenido los datos de entrada:

- **Sistemas *off-line*:** cuando la información de la firma se obtiene a partir de una imagen estática [R. Plamondon and S. N. Srihari, 2000].
- **Sistemas *on-line*:** cuando la información de las funciones temporales de la firma (p.ej. trayectoria, posición x e y y presión) están disponibles, gracias a que éstas han sido capturadas con dispositivos digitales como pantallas táctiles o tabletas PC.

En este proyecto se hará referencia a los sistemas *on-line*, en los que la información capturada por los dispositivos permite un mejor análisis de las firmas y un aumento significativo del rendimiento.

2.3.1. Sistemas de verificación de firma *on-line*

Los sistemas basados en verificación de firmas *on-line* generalmente comparten una misma arquitectura. La arquitectura típica adoptada por estos sistemas es la que se presenta en la siguiente Figura 2.6. En general, estos sistemas realizan los siguientes pasos [Fierrez and Ortega-García, 2007]:

Adquisición de datos y preprocesado

La adquisición *on-line* de las funciones temporales de las firmas manuscritas son capturadas en su mayoría por dispositivos tales como tabletas digitales (WACOM) o pantallas táctiles (Tablet PCs y PDAs). Todos los dispositivos capturan la posición del estilete en cada punto (posición horizontal x y vertical y), la presión y, en algunos casos, el ángulo e inclinación del mismo.

Otros dispositivos de captura *on-line* de firmas incorporan un hardware especial que permite capturar información relativa a la velocidad y aceleración, así como la posición del estilete cuando no está apoyado sobre el dispositivo (*pen-ups*, ver Figura 2.7).

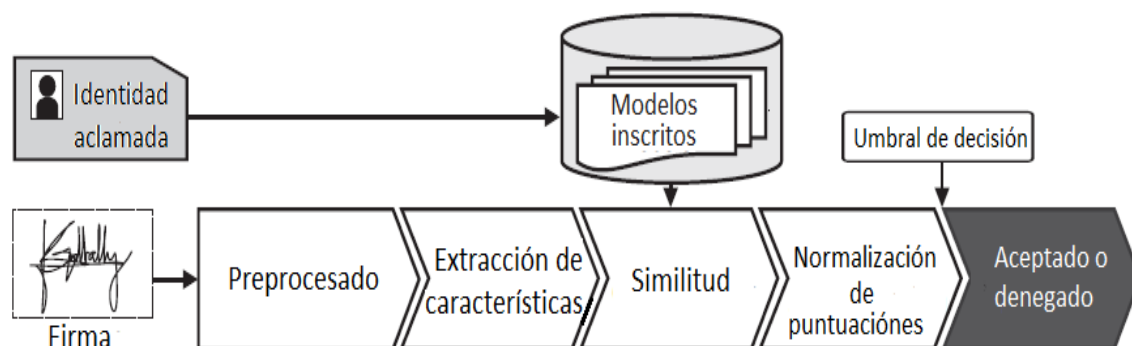


Figura 2.6: Arquitectura adoptada por la mayoría de los sistemas de verificación de firmas *on-line*. Figura extraída de [Fierrez and Ortega-García, 2007]

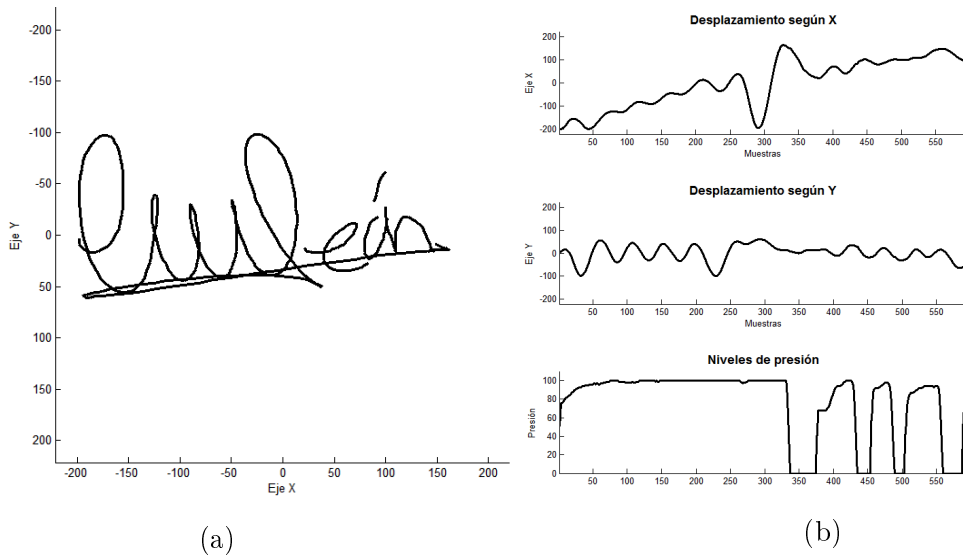


Figura 2.7: (a) Firma capturada con una Wacom. (b) Funciones temporales de la misma, se aprecia que el dispositivo detecta los pen-ups correspondientes a las muestras con presión 0.

Los dispositivos de captura suelen operar a una frecuencia de muestreo comprendida entre los 100 y 200 Hz. Teniendo en cuenta que la frecuencia máxima de las funciones temporales de firma manuscrita están comprendidas entre los 20-30 Hz y el criterio de Nyquist (la frecuencia de muestreo mínima para que no se produzca *aliasing* debe ser mayor o igual a dos veces la frecuencia máxima de la señal), la frecuencia de muestreo de los dispositivos táctiles ofrecen una buena resolución temporal [R. Plamondon and G. Lorette, 1989]. Después de la adquisición de datos, algoritmos de preprocesado son comúnmente implementados para mejorar la calidad de las muestras obtenidas; destacan el filtrado del ruido (p.ej. filtrado con ventana Gaussiana), remuestreo, interpolación de muestras perdidas y extracción de muestras duplicadas.

Extracción de características

Un gran número de aproximaciones han sido consideradas a la hora de extraer información discriminante de la firma *on-line*. Los métodos existentes se dividen en dos clases: **basados en características**, en los cuales los sistemas extraen características globales de las firmas para obtener un vector de características holístico [Lee *et al.*, 1996], y **basados en funciones**.

En el Cuadro 2.2 se muestra como ejemplo el conjunto de características globales propuesto en [Fierrez-Aguilar *et al.*, 2005], que estudia cien características de cuatro tipos:

- **Tiempo (casillas sin colorear):** relacionadas con la duración total de la firma, la sucesión de eventos como *pen-ups* o máximos locales.
- **Velocidad y aceleración (casillas en amarillo):** procedentes de la primera y segunda derivada de las funciones temporales de posición, así como la velocidad media y máxima.
- **Dirección (casillas en verde):** extraídas de la trayectoria del trazo, como la dirección inicial o la dirección media entre *pen-ups*.
- **Geometría (casillas en gris):** asociadas con el trazado o la relación de aspecto de la firma.

Ranking	Feature Description	Ranking	Feature Description
1	signature total duration T_s	2	N(pen-ups)
3	N(sign changes of dx/dt and dy/dt)	4	average jerk \bar{j}
5	standard deviation of a_y	6	standard deviation of v_y
7	(standard deviation of y)/ Δ_y	8	N(local maxima in x)
9	standard deviation of a_x	10	standard deviation of v_x
11	\bar{j}_{rms}	12	N(local maxima in y)
13	$t(2nd\ pen-down)/T_s$	14	(average velocity $\bar{v})/v_{x,max}$
15	$\frac{A_{min}=(y_{max}-y_{min})(x_{max}-x_{min})}{(\Delta_x=\sum_{i=1}^{pen-downs}(x_{max i}-x_{min i})\Delta_y)}$	16	$(x_{last\ pen-up} - x_{max})/\Delta_x$
17	$(x_{1st\ pen-down} - x_{min})/\Delta_x$	18	$(y_{last\ pen-up} - y_{min})/\Delta_y$
19	$(y_{1st\ pen-down} - y_{min})/y$	20	$(T_w \bar{v})/(y_{max} - y_{min})$
21	$(T_w \bar{v})/(x_{max} - x_{min})$	22	(pen-down duration $T_w)/T_s$
23	$\bar{v}/v_{y,max}$	24	$(y_{last\ pen-up} - y_{max})/\Delta_y$
25	$\frac{T((dy/dt)/(dx/dt)>0)}{T((dy/dt)/(dx/dt)<0)}$	26	\bar{v}/v_{max}
27	$(y_{1st\ pen-down} - y_{max})/\Delta_y$	28	$(x_{last\ pen-up} - x_{min})/\Delta_x$
29	(velocity rms v)/ v_{max}	30	$\frac{(x_{max}-x_{min})\Delta_y}{(y_{max}-y_{min})\Delta_x}$
31	(velocity correlation $v_{x,y})/v_{max}^2$	32	$T(v_y > 0 pen-up)/T_w$
33	N($v_x = 0$)	34	direction histogram s_1
35	$(y_{2nd\ local\ max} - y_{1st\ pen-down})/\Delta_y$	36	$(x_{max} - x_{min})/x_{acquisition\ range}$
37	$(x_{1st\ pen-down} - x_{max})/\Delta_x$	38	$T(curvature > Threshold_{curv})/T_w$
39	(integrated abs. centr. acc. $a_{Ic})/a_{max}$	40	$T(v_x > 0)/T_w$
41	$T(v_x < 0 pen-up)/T_w$	42	$T(v_x > 0 pen-up)/T_w$
43	$(x_{3rd\ local\ max} - x_{1st\ pen-down})/\Delta_x$	44	N($v_y = 0$)
45	(acceleration rms a)/ a_{max}	46	(standard deviation of x)/ Δ_x
47	$\frac{T((dx/dt)/(dy/dt)>0)}{T((dx/dt)/(dy/dt)<0)}$	48	(tangential acceleration rms $a_t)/a_{max}$
49	$(x_{2nd\ local\ max} - x_{1st\ pen-down})/\Delta_x$	50	$T(v_y < 0 pen-up)/T_w$
51	direction histogram s_2	52	$t(3rd\ pen-down)/T_s$
53	(max distance between points)/ A_{min}	54	$(y_{3rd\ local\ max} - y_{1st\ pen-down})/\Delta_y$
55	$(\bar{x}-x_{min})/\bar{x}$	56	direction histogram s_5
57	direction histogram s_3	58	$T(v_x < 0)/T_w$
59	$T(v_y > 0)/T_w$	60	$T(v_y < 0)/T_w$
61	direction histogram s_8	62	$(1st\ t(v_{x,min}))/T_w$
63	direction histogram s_6	64	$T(1st\ pen-up)/T_w$
65	spatial histogram t_4	66	direction histogram s_4
67	$(y_{max} - y_{min})/y_{acquisition\ range}$	68	$(1st\ t(v_{x,max}))/T_w$
69	(centripetal acceleration rms $a_c)/a_{max}$	70	spatial histogram t_1
71	$\theta(1st\ to\ 2nd\ pen-down)$	72	$\theta(1st\ pen-down\ to\ 2nd\ pen-up)$
73	direction histogram s_7	74	$t(j_{x,max})/T_w$
75	spatial histogram t_2	76	$j_{x,max}$
77	$\theta(1st\ pen-down\ to\ last\ pen-up)$	78	$\theta(1st\ pen-down\ to\ 1st\ pen-up)$
79	$(1st\ t(x_{max}))/T_w$	80	j_x
81	$T(2nd\ pen-up)/T_w$	82	$(1st\ t(v_{max}))/T_w$
83	$j_{y,max}$	84	$\theta(2nd\ pen-down\ to\ 2nd\ pen-up)$
85	j_{max}	86	spatial histogram t_3
87	$(1st\ t(v_{y,min}))/T_w$	88	$(2nd\ t(x_{max}))/T_w$
89	$(3rd\ t(x_{max}))/T_w$	90	$(1st\ t(v_{y,max}))/T_w$
91	$t(j_{max})/T_w$	92	$t(j_{y,max})/T_w$
93	direction change histogram c_2	94	$(3rd\ t(y_{max}))/T_w$
95	direction change histogram c_4	96	j_y
97	direction change histogram c_3	98	$\theta(initial\ direction)$
99	$\theta(before\ last\ pen-up)$	100	$(2nd\ t(y_{max}))/T_w$

Cuadro 2.2: Set de características globales. T denota intervalo de tiempo, t denota instante de tiempo, N número de eventos y θ el ángulo. Tabla adaptada de [Fierrez-Aguilar et al., 2005]

Por otra parte los sistemas basados en funciones, extraen las funciones temporales de la firma para su verificación, como las que se muestran en el Cuadro 2.3.

Aunque recientes estudios han demostrado que los sistemas basados en características pueden llegar a rendir igual de bien que los basados en funciones globales en algunos escenarios, tradicionalmente estos últimos ofrecen un mejor rendimiento [Fierrez-Aguilar et al., 2005a; Kholmatov and Yanikoglu, 2005]. Sobre todo la función temporal de la coordenada y y las que se derivan de ella; esto es debido a que casi todas las firmas (sobre todo las occidentales) se escriben de izquierda a derecha, de manera que la coordenada x tiene normalmente menos poder discriminativo. (Ver Figura 2.8)

#	Features	Description
1	x-coordinate	x_n
2	y-coordinate	y_n
3	Pen-pressure	z_n
4	Path-tangent angle	$\theta_n = \arctan(y_n/x_n)$
5	Path velocity magnitude	$v_n = \sqrt{\dot{x}_n^2 + \dot{y}_n^2}$
6	Log curvature radius	$\rho_n = \log(1/k_n) = \log(v_n/\theta_n)$, where k_n is the curvature of the position trajectory
7	Total aceleration magnitude	$a_n = \sqrt{t_n^2 + c_n^2} = \sqrt{v_n^2 + v_n^2 \theta_n}$, where t_n and c_n are respectively the tangential and centripetal acceleration components of the pen motion.
7-14	First-order derivative of features 1-7	$\dot{x}_n, \dot{y}_n, \dot{z}_n, \dot{\theta}_n, \dot{v}_n, \dot{\rho}_n, \dot{a}_n$
15	Pen azimuth	γ_n
16	Pen altitude	ϕ_n
17-18	First-order derivative of features 15-16	$\dot{\gamma}_n, \dot{\phi}_n$
19-20	Second-order derivative of features 1-2	\ddot{x}_n, \ddot{y}_n
21	Ratio of the minimum over the maximum speed over a window of 5 samples	$v_n^r = \min(v_{n-4}, \dots, v_n) / \max(v_{n-4}, \dots, v_n)$
22-23	Angle of consecutive samples and first order difference	$\alpha_n = \arctan(y_n - y_{n-1} / x_n - x_{n-1})$ $\dot{\alpha}_n$
24	Sine	$s_n = \sin(\alpha_n)$
25	Cosine	$c_n = \cos(\alpha_n)$
26	Stroke length to width ratio over a window of 5 samples	$r_n^5 = \frac{\sum_{k=n-4}^{k=n} \sqrt{(x_k - x_{k-1})^2 + (y_k - y_{k-1})^2}}{\max(x_{n-4}, \dots, x_n) - \min(x_{n-4}, \dots, x_n)}$
27	Stroke length to width ratio over a window of 7 samples	$r_n^7 = \frac{\sum_{k=n-6}^{k=n} \sqrt{(x_k - x_{k-1})^2 + (y_k - y_{k-1})^2}}{\max(x_{n-6}, \dots, x_n) - \min(x_{n-6}, \dots, x_n)}$

Cuadro 2.3: Cuadro de funciones temporales. La notación del punto superior (p.ej \dot{x}_n) indica derivada con respecto al tiempo. Tabla adaptada de [Fierrez-Aguilar et al., 2005]

Registro

Dependiendo de la estrategia de autenticación a emplear, la etapa registro se divide en dos clases: basado en referencias y basado en modelos.

En los registros basados en referencias, las características extraídas del conjunto de firmas de entrenamiento son almacenadas como plantillas. En el momento de la autenticación, se compara la firma de entrada con todas las plantillas de referencia almacenadas [Nanni and Lumini, 2005; Richiardi and Drygajlo, 2003]. En los registros basados en modelos se computan modelos estadísticos de cada usuario usando para ello el conjunto de firmas de entrenamiento, los cuales serán usados para futuras comparaciones en la etapa de autenticación [Lei and Govindaraju, 2005].

Los registros basados en referencias suelen ser más apropiados que los basados en modelos cuando el conjunto de firmas de entrenamiento es pequeño. Esto se debe a que los modelos usados para la verificación de firma (típicamente HMMs) requieren al menos de 4 a 6 firmas de entrenamiento para un rendimiento razonable [Fierrez and Ortega, 2008].

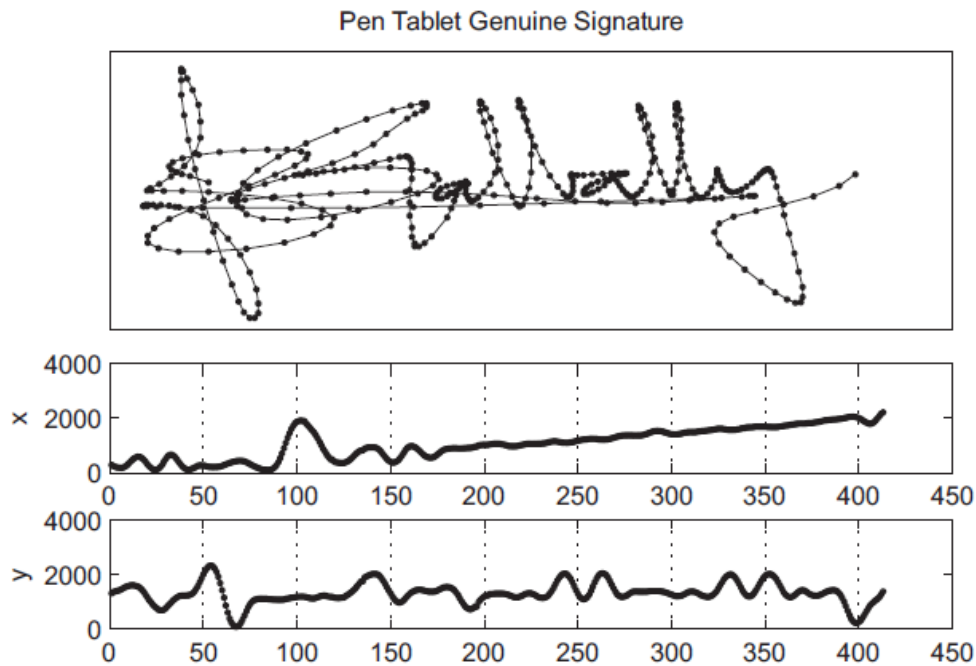


Figura 2.8: Firma capturada con una Pen Tablet, se aprecia que la coordenada y presenta una mayor variación que la x . Figura extraída de [Fiérrez and Ortega, 2008]

Autenticación

La etapa de autenticación es generalmente precedida por un prealineamiento entre las firmas de entrada y las plantillas/modelos registrados. En el caso de los registros basados en referencias, el prealineamiento se realiza antes de la extracción de características, y se basan solamente en la forma de la firma [Jain and Ross, 2008]. Las técnicas que persiguen estas aproximaciones incluyen alineamiento del centro (p.ej. centro geométrico, centro de masas o inicio de la misma, ver Figura 2.9) y la inclinación (firmas del mismo usuario pueden estar inclinadas).

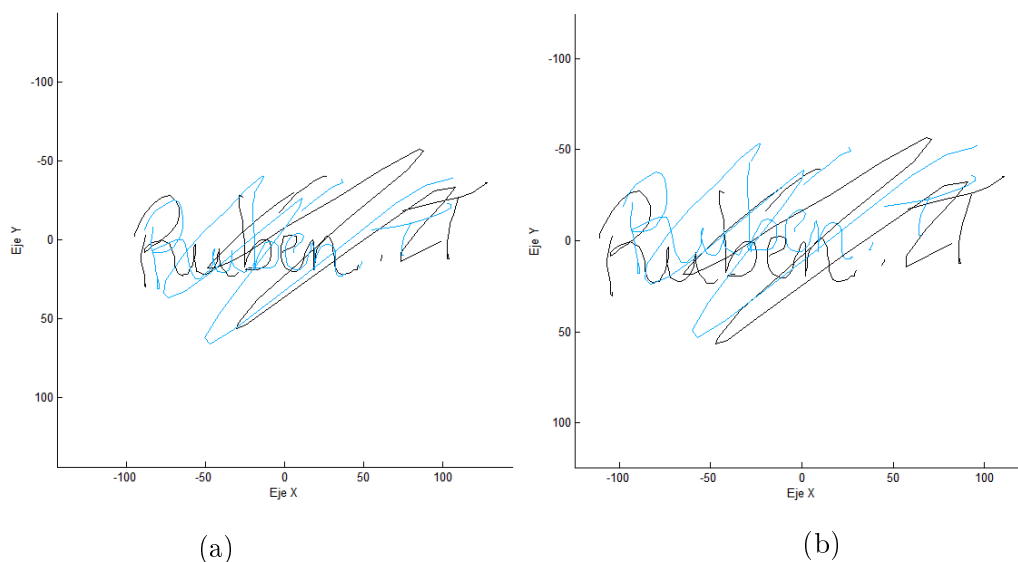


Figura 2.9: Ejemplo de prealineamiento de dos firmas. (a) Firmas alineadas por el centro de masas. (b) Firmas alineadas por el centro geométrico.

En el caso de los registros basados en modelos, el prealineamiento normalmente consiste en la aplicación de un sistema común de referencia, por ejemplo; trayectorias con respecto a un punto inicial o al centro de masas, escalado a un tamaño de marco fijado, etc [R. Phelps, 1982].

En los sistemas basados en características, la autenticación se obtiene empleando algún tipo de medida de distancia entre el vector de características y la plantilla de la firma. Las medidas de distancia comúnmente usadas son la distancia Euclídea, distancia Euclídea ponderada y distancia Mahalanobis [Jain and Ross, 2008]. Mientras que los sistemas basados en modelos se clasifican según la estrategia de autenticación empleada:

- **Locales:** en las aproximaciones locales, las funciones temporales de diferentes firmas son directamente comparadas usando algoritmos de medida de distancia *elástica*, el más común es DTW (del inglés *Dynamic Time Warping*). El objetivo de DTW es realizar un alineamiento *elástico* de dos secuencias de muestras dadas X e Y (p.ej. funciones temporales de las firmas a comparar) que minimice la distancia medida entre ambas.

El algoritmo se resume a continuación [Sakoe and Chiba, 1978], en primer lugar se definen las dos secuencias a comparar

$$\begin{aligned} X &= x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_I \\ Y &= y_1, y_2, \dots, y_j, \dots, y_J \end{aligned} \quad (2.1)$$

y una medida de distancia

$$d(i, j) = \|x_i - y_j\| \quad (2.2)$$

entre las secuencias de muestra. A continuación, el camino de alineamiento se define como

$$C = c_1, c_2, \dots, c_k, \dots, c_K \quad (2.3)$$

donde cada c_k representa la correspondencia (i, j) entre muestras de las secuencias X e Y . La condición inicial del algoritmo se establece

$$g_1 = g(1, 1) = d(1, 1) \cdot w(1) \quad (2.4)$$

donde g_k representa la distancia acumulada después de k pasos y $w(k)$ es un factor de peso que debe ser definido. En cada iteración, g_k es estimada como

$$g_k = g(i, j) = \min_{c_{k-1}} [g_{k-1} + d(c_k) \cdot w(k)] \quad (2.5)$$

hasta que la muestra I -ésima y J -ésima son alcanzadas respectivamente. El resultado de normalizar la distancia es

$$D(X, Y) = \frac{g_K}{\sum_{k=1}^K w(k)} \quad (2.6)$$

Los factores de peso w_k son definidos con el fin de restringir qué correspondencias son permitidas entre las muestras de ambas secuencias. En la Figura 2.10.a, se indica una posible definición de w_k . En ese caso, se permiten sólo tres transiciones en la estimación de g_k .

En consecuencia, la Eq. 2.5 se convierte en

$$g_k = g(i, j) = \min \begin{bmatrix} g(i, j-1) + d(i, j) \\ g(i-1, j-1) + 2d(i, j) \\ g(i-1, j) + d(i, j) \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

siendo ésta una de las implementaciones más comunes encontradas de DTW en la literatura. En la Figura 2.10.b, se muestra un ejemplo visual de la correspondencia entre dos firmas empleando el alineamiento elástico. Aunque DTW ha sido reemplazado por herramientas más poderosas como HMMs o SVMs para aplicaciones de habla, sigue siendo muy efectiva para herramientas de autenticación de firmas, ya que el es más indicado cuando se parte de un conjunto pequeño de datos de entrenamiento, como es el caso en firma manuscrita.

- **Regionales:** en las aproximaciones regionales, las funciones temporales se convierten en secuencias de vectores de características u observaciones, cada uno describiendo propiedades regionales de un segmento de la firma. Una de las aproximaciones regionales más populares empleadas es el método basado en HMMs (del inglés *Hidden Markov Models*). Aunque los HMMs han sido utilizados normalmente en el reconocimiento del habla [Rabiner, 1989], también tienen muchas aplicaciones en el reconocimiento de firma manuscrita [Dolfing, 1998]. Un HMM representa un proceso estocástico doble, regido por una cadena de Markov subyacente, con un número finito de estados y un conjunto de funciones aleatorias que generan símbolos observables asociados a cada estado [Yang et al., 1995]. La estructura básica de un HMMs es la siguiente:

- Número de estados N .
- El número de símbolos observables M en cada estado.
- La matriz de probabilidades de transición entre estados $A = \{i, j\}$, la cual describe la probabilidad de pasar del estado i al estado j .
- La distribución de probabilidad de observación asociado al estado j , $B = \{b_j(k)\}$.

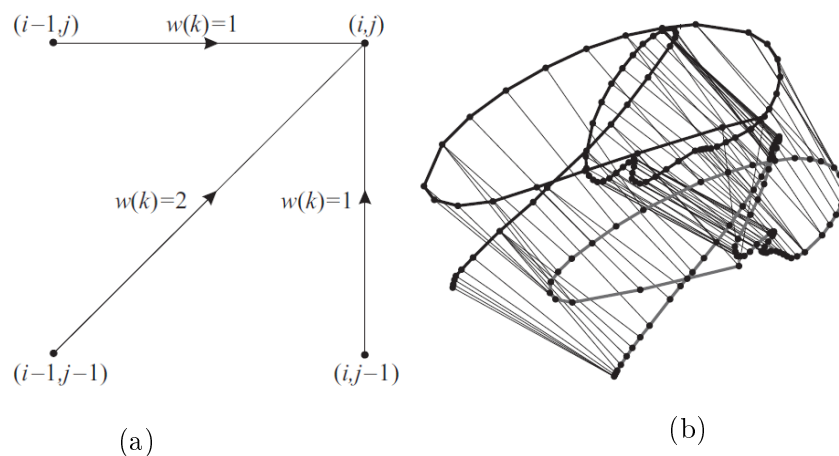


Figura 2.10: (a) Ejemplo de factores de peso simétrico w_k en DTW. (b) Ejemplo de correspondencia punto a punto entre dos firmas genuinas usando DTW. Figura extraída de [J. Fierrez, 2006]

Encontrar HMMs robustos para la autenticación de firmas no es una tarea trivial. Mientras que HMMs demasiado simples puede que no permitan modelar adecuadamente las firmas de los usuarios, modelos complejos pueden que no sean capaces de modelar las realizaciones futuras debido a un sobreajuste de parámetros (en inglés *overfitting*).

Por otro lado, como los modelos simples tienen menos parámetros que estimar, su estimación puede ser más robusta que en modelos complejos. Dos parámetros principales se suelen considerar durante la selección de la estructura para conseguir un modelo óptimo: el número de estados N y el número de observables por estado M [Fierrez-Aguilar *et al.*, 2007]. La mayoría de los sistemas propuestos consideran una configuración de izquierda a derecha con una única sucesión de estados, también conocidos como topología Bakis (ver Figura 2.11).

Normalización de puntuaciones

Las puntuaciones obtenidas al comparar la firma de entrada con la plantilla o el modelo registrado suele normalizarse entre por rangos, normalmente entre $[0, 1]$ antes de pasarlos por el umbral de decisión τ . La etapa de normalización es crucial cuando se combinan varios sistemas de comparación en una aproximación multibiométrica [Ross *et al.*, 2006].

2.3.2. Aplicaciones

Las aplicaciones más importantes de los sistemas basados en biometría de firmas *on-line* se encuentran en el ámbito legal (autenticación de documentos), médico (protección de expediente), y bancario (procesamiento de cheques y tarjetas de crédito). Las principales aplicaciones incluyen:

- **Firma forense:** esta es la aplicación más antigua de las firmas manuscritas, comúnmente aplicada a imágenes *off-line* capturadas de la misma. Las aplicaciones forenses para el análisis de firmas *on-line* están ahora en desarrollo, siendo el objetivo de este proyecto.
- **Autenticación de firmas:** este tipo de aplicaciones incluye sistemas de acceso basadas en firma, encriptación de documentos, acceso a páginas web, etc [F. Alonso-Fernandez *et al.*, 2007].

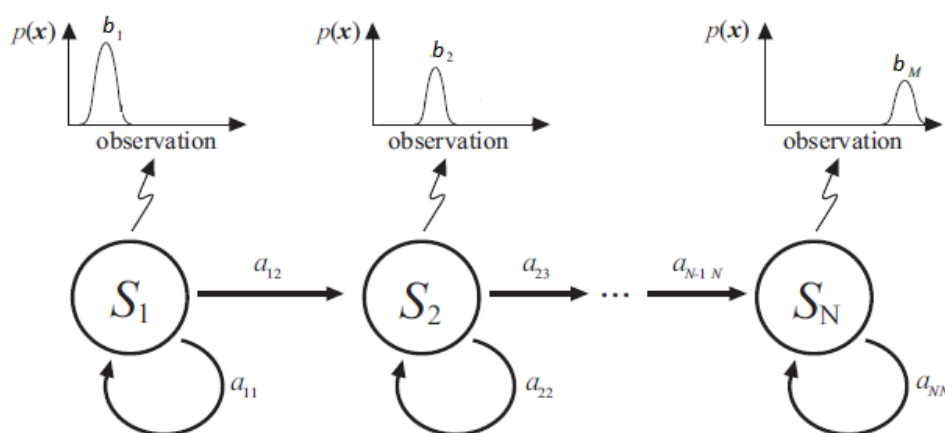


Figura 2.11: Representación gráfica de una topología Bakis de HMMs.

3

Estudio del análisis pericial de firma manuscrita

En el Capítulo 2 se realizó un pequeño análisis de los sistemas biométricos en general y de firma manuscrita en particular. Prestando especial atención a los sistemas de verificación de firma *on-line*, en los cuales la información capturada por los dispositivos proporcionaba un mayor poder discriminativo entre firmas auténticas y falsificadas, aumentando con ello el rendimiento del sistema global.

En el presente capítulo se realiza un estudio de la metodología empleada por los peritos forenses en el cotejo de firmas manuscritas, con objeto de poder adaptar las herramientas disponibles de los sistemas de verificación de firmas *on-line* al escenario pericial en capítulos posteriores.

3.1. Introducción

En el campo de la ciencia forense, los peritos forenses realizan estudios sobre la autoría de firmas manuscritas para casos judiciales desde hace más de 100 años [R. A. Huber and A. M. Headrick, 1999]. En la actualidad, los peritos forenses aprenden las habilidades necesarias para poder analizar y comparar firmas manuscritas principalmente a través de mentores, cursos, manuales de grafística, artículos, pruebas de testeo y de la experiencia en la práctica [B. Found and D. Rogers, 2008; C. Bird *et al.*, 2010; Uz, 2013].

A lo largo de la historia se han desarrollado diversos métodos para llevar a cabo el análisis y cotejo de firmas, siendo el examen grafonómico el más utilizado en la actualidad. Dicho examen grafonómico incluye todos los parámetros del método grafométrico tradicional desde el punto de vista de los cálculos de cada detalle gráfico, además del análisis de la información dinámica del grafismo. (ver Figura 3.1)

En la grafonomía se observa el conjunto del escrito, las líneas, las palabras y letras, teniendo en cuenta el ritmo escritural del autor, la gestualidad específica, no conformándose con la apreciación estática de las formas o de sus dimensiones aisladas, sino obteniendo la homogeneidad o convalidación de las variables por la síntesis comparada de sus valores más esenciales y repetitivos y, al mismo tiempo, de los detalles más personales que destacan o se apartan de los aspectos generales de la escritura, captando lo más discriminativo o peculiar de cada grafía [Uz, 2013].

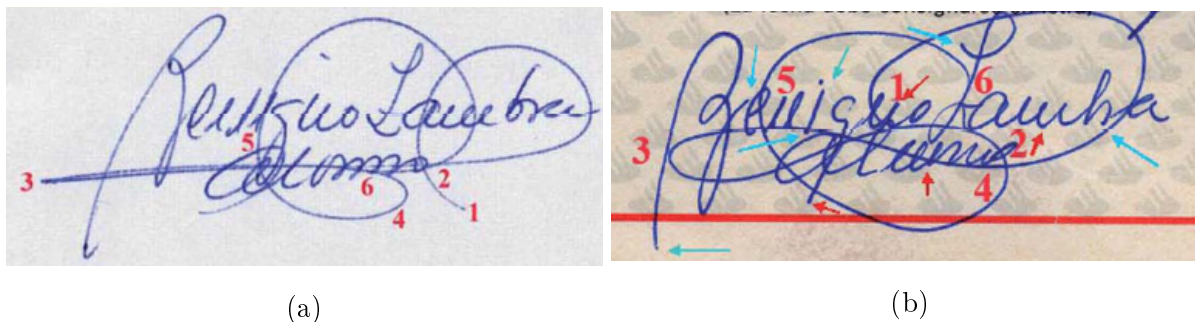


Figura 3.1: Examen grafonómico realizado por un perito forense en el cotejo de dos firmas, presuntamente del mismo individuo. (a) Firma auténtica. (b) Posible falsificación. Extraído de [Uz, 2013]

3.2. Cotejo de firmas manuscritas

Se define como firmas *dubitadas* aquellas firmas que presentan dudas sobre su autor, y por tanto son objeto de un cotejo de firmas forense. Por otro lado las *firmas indubitadas* se definen como aquellas firmas en las que no hay duda de su autoría (p.ej. la firma del DNI, ya que se ha realizado delante de un agente policial). En un cotejo pericial de firmas manuscritas se compara la firma o firmas dubitadas frente un conjunto de firmas indubitadas. A su vez las firmas dubitadas se clasifican en tres grupos, según quién y con qué objetivo se realizó:

- **Firmas genuinas:** son realizadas por el mismo autor que las firmas indubitadas.
- **Firmas falsificadas:** son realizadas por un autor diferente al de las firmas indubitadas a comparar, y son llevadas a cabo con la intención de suplantar la identidad de otra persona. Dentro de las firmas falsificadas podemos distinguir entre las firmas inventadas, que no presentan ningún rasgo común con las auténticas y por tanto son muy fáciles de ser detectadas por parte de los peritos forenses; y por otro lado, las firmas imitadas, que se realizan a semejanza de uno o varios ejemplos de firmas genuinas por parte del imitador. Dentro de las firmas imitadas puede haber varios niveles respecto a la calidad de la imitación, que pueden ir desde la imitación visualizando solamente el grafo de la firma, hasta la imitación que dispusiera de un video de la persona realizando la firma o repetición de la firma capturada por una tableta de firma digital, en la que se dispondría incluso de información de la presión realizada en el tiempo.
- **Firmas simuladas:** son aquellas realizadas por el mismo autor que las firmas indubitadas bajo estudio, pero son deformadas con el objetivo de negar su autoría en un determinado momento.

3.2.1. Muestras para el examen de firmas

El primer requisito indispensable para realizar un cotejo pericial es disponer de un conjunto de firmas adecuado para poder llevar a cabo dicho cotejo, ya que lo contrario impide llegar a conclusiones fiables [B. Found and D. Rogers, 1999; L. Alewijnse, 2013]. Por tanto, la persona a la que se supone que imitaron la firma debe realizar un *cuerpo* de ellas, al menos, con la misma composición que presenta la dubitada, aunque lo ideal sería que grafiara todas las formas, desde la más completa a la más abreviada. (ver Figura 3.2)

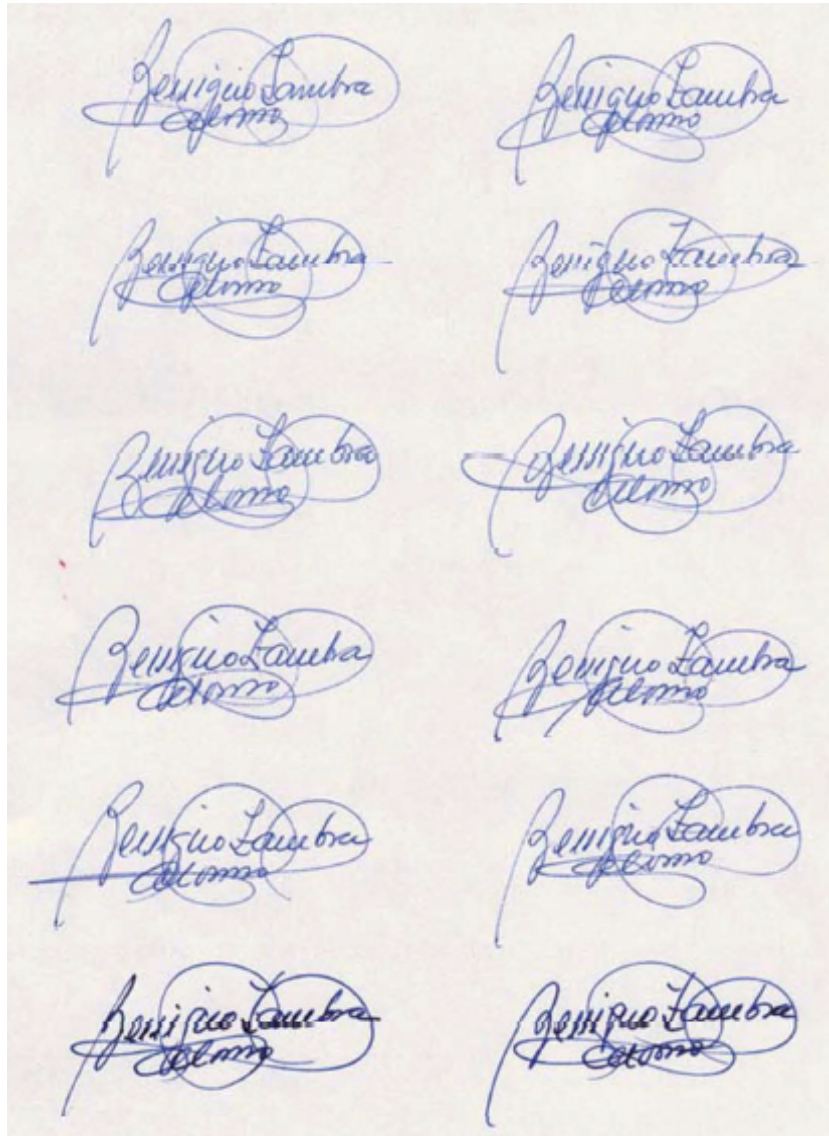


Figura 3.2: Ejemplos cuerpo de firmas realizado por un único sujeto. Extraído de [Uz, 2013]

El número de firmas de la persona que hace la prueba ha de realizar, puede ser variable, pero debe hacerse en número suficiente hasta conseguir que la realice con espontaneidad.

También sería aconsejable que entre cada toma de muestras se dejen transcurrir unos minutos, para impedir que el autor de las firmas pueda coger un ritmo de escritura con la realización de gestos que no sean habituales.

Cuando la firma dubitada se ha realizado en un tiempo considerablemente anterior al de la toma de las muestras, se tratará de conseguir firmas auténticas coetáneas con aquélla, debido a que la firma va evolucionando con el paso del tiempo y con la práctica, los trazos se van abreviando y en ocasiones hasta tal punto, que los caracteres pueden llegar a ser totalmente ilegibles. Siempre debe acompañar a las muestras realizadas, una fotocopia clara de las firmas obrantes en el DNI de los intervinientes, o bien de otro documento de identidad, tal como el pasaporte, el permiso de conducir, etc., con objeto de contar, al menos, con alguna firma realizada de forma espontánea.

3.2.2. Análisis de firmas indubitadas y dubitadas

Una vez se tienen las muestras indubitadas necesarias para realizar el cotejo grafonómico con las dubitadas, se sigue el siguiente análisis para cada grupo de firmas (indubitadas y dubitadas) a comparar:

- **Composición:** se analiza si la parte escrita, si existe, la cual está formada por el nombre, por el apellido o apellidos, si éstos son legibles o ilegibles, si están completos o abreviados, así como si la firma tiene rúbrica o no.
- **Ubicación con respecto al texto escrito:** aquí se estudia si la firma está próxima al final del texto escrito, si lo invade, si está algo separada o muy alejada de él. También en este campo se estudia si la firma está desplazada hacia la izquierda, centrada o desplazada hacia la derecha con respecto al margen lateral izquierdo.
- **Dirección:** en este caso no solo se estudia la dirección de la parte escrita (p.ej. ascendente, descendente, sinuosa, etc.), sino también la dirección del eje de simetría de la rúbrica.
- **Descripción de la parte escrita:** se describe la caja de escritura, si la hay, así como la parte inicial de la firma propiamente dicha, la parte intermedia y la final.
- **Descripción de la rúbrica:** se examinan los puntos de inicio, dirección, finales e idea de trazado de la misma.
- **Velocidad de trazado y presión:** por lo que respecta a la presión se analiza ésta, a ser posible, bajo los tres aspectos: anchura del trazo, sentido de la presión y profundidad del surco, así como el tipo de velocidad con que fue grafiada.

Es conveniente tener en cuenta que, en muchas ocasiones, la profundidad del surco en escritos realizados por una misma persona, puede variar teniendo en cuenta el soporte donde se realiza la firma, el útil empleado, la postura a la hora de firmar, el estado anímico en ese momento, etc. por lo que este tipo de presión puede llegar a no tener ningún valor identificativo [Uz, 2013].

3.2.3. Información característica de interés

En general, las firmas de un mismo individuo deben guardar entre sí una serie de características similares o iguales, como son: la forma, la composición, proporción de trazos, posición determinada, etc. Además de esto hay que tener en cuenta que existen ciertos factores que en mayor o menor grado influyen sobre la persona en el momento de firmar: unos son de naturaleza intrínseca, como pueden ser la edad, el estado físico y psíquico, etc [Uz, 2013; L. Alewijnse, 2013]. Otros de naturaleza extrínseca, tales como el útil, la postura, el soporte, la temperatura ambiental, etc. En general toda firma, salvo excepciones, presenta dos partes perfectamente definidas: la firma propiamente dicha, en la que figura el nombre y los apellidos, y la rúbrica, que es el trazo que la adorna o envuelve. Según varias fuentes de análisis de cotejos de firmas falsas, las principales características que se utilizan para distinguir entre firmas genuinas e imitaciones son las siguientes:

1. Las firmas falsas tienden a reproducir fielmente las formas de algún modelo auténtico, lo mejor que permite la habilidad del autor.
2. Suelen aparecer temblores, trazos indecisos, defectos de presión, presión monótona, interrupciones, enganches y cualquier otro signo de falta de seguridad en el trazado.

(a) Firmas genuinas

(b) Firmas falsas

Figura 3.3: Se aprecian los temblores propios de las firmas imitadas así como una menor fluidez del trazo. Extraído de [Uz, 2013]

En general las imitaciones suelen tener similitudes con las firmas indubitadas en cuanto a la forma global, pero suelen tener discrepancias respecto a los detalles del proceso de escritura (temblores, diferencias en tamaño, proporción o inclinación) así como poca calidad de la línea y poca fluidez del trazo, como se aprecia en el ejemplo de la Figura 3.3. Normalmente el imitador sólo es capaz de centrarse en uno de los dos principales requisitos para obtener una buena imitación que son: precisión en la creación de la firma (tamaño, proporción y forma), y la fluidez en el trazo de la línea. En la mayoría de casos, los signos de una imitación son claramente observables e identificables como tal. Estas afirmaciones están corroboradas por la baja tasa de errores respecto a la autoría de firmas imitadas (3 %) por parte de expertos forenses [C. Bird *et al.*, 2010].

Una característica de las firmas genuinas es que muestran cambios de velocidad en los distintos segmentos, mientras que en las imitaciones no suelen existir dichos cambios de velocidad. Otras características de interés que suelen presentar las firmas imitadas son levantamientos del lápiz poco naturales, inicios y finales muy directos o bruscos, correcciones, escritura en distinta escala, excesiva atención a ciertos detalles, dirección del movimiento incorrecta, etc [L. Alewijnse, 2013]. (ver Figura 3.3)

Respecto a las firmas simuladas, también suelen mostrar similitudes con respecto a las firmas indubitadas [B. Found and D. Rogers, 1999; C. Bird *et al.*, 2010]. A menudo las diferencias se producen en las características más obvias, mientras que los detalles finos de fluidez y realización de la firma se mantienen intactos. En algunos casos puede pasar que el individuo realice una firma simulada usando las técnicas empleadas por imitadores, es decir, intentar hacer su firma pero de forma lenta y con trazos dudosos, lo que daría lugar a errores por parte de los expertos forenses en cuanto a la autoría de la firma. La Figura 3.4 muestra firmas genuinas y simuladas. Las características que usualmente se ven afectadas estadísticamente en los casos de firmas simuladas son: alteración en letras mayúsculas (14 %), menor velocidad de escritura (13 %), alteración en la construcción de letras (13 %), alteración en rúbrica final (9 %), alteración en la forma de la firma (8 %), alteración del estilo caligráfico (8 %), alteración de la inclinación (7.7 %), mayor altura de las letras (5.5 %), añaden letras al nombre (5.5 %), omiten letras del nombre (5.5 %) [L. Alewijnse, 2013].

Un aspecto adicional a tener en cuenta es la complejidad de las firmas bajo análisis. Existen estudios que demuestran que las firmas que tienen una mayor complejidad son más difíciles de ser imitadas.

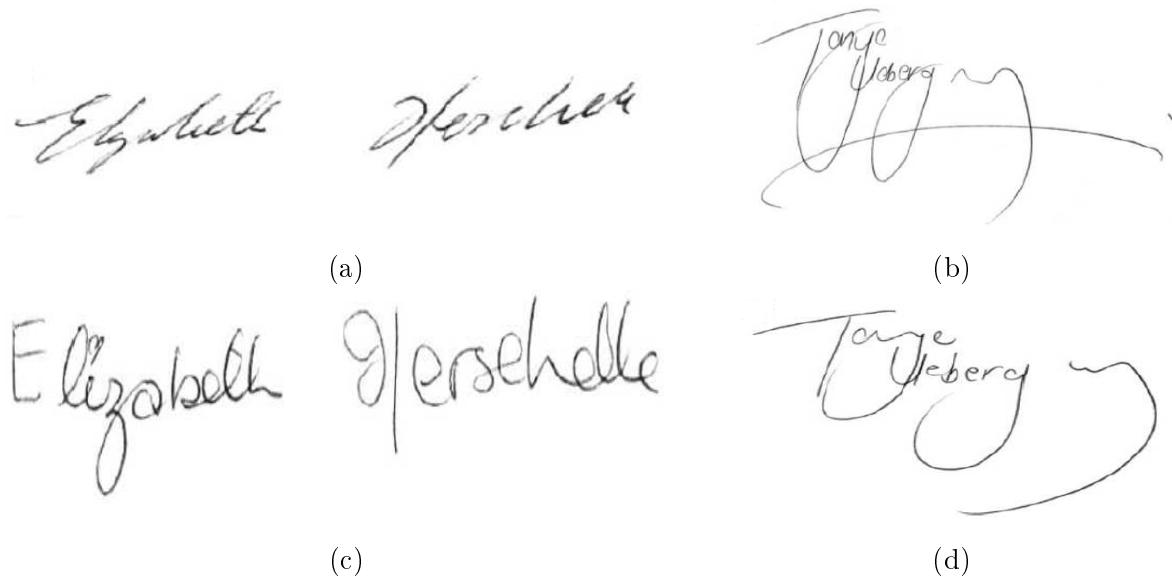


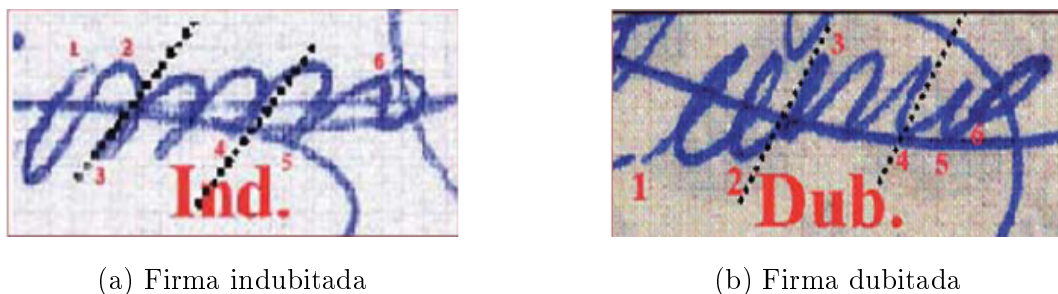
Figura 3.4: (a) y (c) ejemplos de firmas genuinas. (b) Firma simulada clasificada como imitada por al menos un perito forense. (d) Firma simulada clasificada como genuina por al menos un perito forense. Extraído de [Uz, 2013]

Dado que los expertos forenses pueden dar niveles subjetivos de complejidad de las firmas (ver Cuadro 3.1), se han desarrollado modelos matemáticos para obtener un valor de la complejidad de una firma [L. Alewijnse, 2013].

3.2.4. Comparación de firmas

Llegados a este punto se lleva a cabo el cotejo grafonómico de los caracteres y de la rúbrica, contrastando las similitudes y las diferencias de valor encontradas en los análisis de firmas realizados anteriormente. Si no existen caracteres en la firma, el examen se realiza sólo de los grafismos que los sustituyen. Se tienen en cuenta los siguientes aspectos: dirección, inclinación, descripción de la parte escrita, descripción de la rúbrica y velocidad del trazado y la presión ejercida.

Dicha comparación se lleva a cabo de forma global, teniendo en cuenta la firma en su conjunto, y posteriormente de forma local comparando cada una de las letras y rúbrica de las firmas bajo



(a) Firma indubitada

(b) Firma dubitada

Figura 3.5: Ejemplo del análisis grafonómico llevado a cabo sobre la letra 'n' de una firma, se observa que la inclinación es la misma pero la ejecución del trazado es diferente. Extraído de [Uz, 2013]



Experto 1	93.5	65.5	67.5
Experto 2	24.0	1.0	47.0
Experto 3	83.5	37.5	55.0
Experto 4	85.0	4.5	33.0

Cuadro 3.1: Nivel de complejidad de tres ejemplos de firmas según cuatro expertos forenses. El nivel de complejidad de la firma está en el rango entre 0 (muy simple) y 100 (muy compleja). Cuadro extraído de [L. Alewijnse, 2013]

estudio (ver Figura 3.5). Finalmente se realiza un informe resumiendo de forma clara y breve los resultados a los que se llega en el examen grafonómico realizado con anterioridad. También es común que el cotejo se realice por dos expertos para contrastar opiniones.

Adicionalmente, cabe destacar que en la práctica no se utiliza ningún análisis estadístico de datos poblacionales para analizar cómo de común o raras son las similitudes o diferencias que se dan entre las firmas de una población dada. Sólo se tiene en cuenta la variabilidad de las firmas presente en el cuerpo de firmas indubitadas que se tiene para realizar el análisis. Este es un punto a añadir en la herramienta de visualización forense del presente proyecto.

3.3. Análisis estadístico de las tasas de error del cotejo pericial

Una vez descrito el método usual seguido en la práctica para realizar los cotejos de firmas manuscritas, ahora se describe los resultados de un extenso análisis estadístico sobre las tasas de acierto y error que obtuvieron un grupo de peritos forenses del Centro de Servicios Forenses del estado de Victoria en Australia [B. Found and D. Rogers, 1999; C. Bird *et al.*, 2010]. Estos resultados están basados en un estudio llevado a cabo durante cuatro años (entre 2002 y 2005) por un total de 84 examinadores de escritura forense del citado centro. La base de datos de la que se extrajeron dichos resultados estaba compuesta por un total de 45 firmas indubitadas, 599 firmas dubitadas, y en total se obtuvieron 19.361 opiniones de la autoría por parte de los expertos forenses. El conjunto de firmas dubitadas estaba compuesto de 266 firmas genuinas, 59 firmas simuladas y 274 firmas imitadas. En el Cuadro 3.2 se detallan las tasas de acierto, error y de resultados inconclusivos para el estudio realizado. Los resultados muestran que hay muy buenas tasas de acierto por parte de los expertos forenses para distinguir entre firmas genuinas/no genuinas. Sin embargo, para la determinación entre firmas simuladas e imitaciones los expertos son mucho más conservadores, dando lugar a tasas de resultados inconclusivos bastante altas (63,3 % para las simuladas y 50,5 % para las imitaciones).

Resultados	Genuinas	Simuladas	Imitaciones
% Acierto	83,6	24,3	46,6
% Error	2,3	12,3	2,9
% Inconclusivos	14,2	63,3	50,5

Cuadro 3.2: Tasas de acierto, error y resultados inconclusivos sobre los resultados de cotejos forenses de firmas por parte de expertos periciales. Cuadro extraído de [C. Bird *et al.*, 2010]

Del Cuadro 3.2 se concluye que la mayor parte de la población no es capaz de simular su firma con éxito, sino que realizan firmas que en general están en el rango de variación normal de sus firmas genuinas, modificando ciertas características obvias como la forma de las letras o su inclinación, pero retienen los atributos de la estructura fina de las firmas [L. Michel, 1978]. De esta forma se explica el error cometido en las firmas simuladas del 12.3 %, ya que en la mayoría de esos casos los expertos forenses tomaron la decisión de que eran firmas genuinas.

3.3.1. Análisis estadístico sobre el poder discriminativo de la información dinámica

Las secciones previas tratan sobre el trabajo del perito forense al analizar firmas *off-line*. El uso de firma dinámica en el ámbito forense es muy reciente y no hay trabajos publicados sobre la metodología a seguir por los expertos en esos casos. Ahora se describen los resultados de un estudio reciente sobre el análisis estadístico de la distribución de varias características dinámicas de la firma para una base de datos (SIGMA) compuesta por 6000 firmas, de las cuales 3000 eran genuinas y las 3000 restantes eran imitaciones [S. M. S. Ahmad *et al.*, 2013].

Dicho estudio se llevó a cabo analizando la distribución de ciertas características dinámicas sobre los conjuntos de firmas genuinas e imitaciones. Para obtener los resultados se realizaron varios test de índole estadística. Los principales resultados obtenidos se resumen a continuación:

- **Duración media de pen ups (levantamientos):** una firma es imitación con un 99,5 % de probabilidad si la duración media de pen ups es mayor a 1 segundo. (ver Figura 3.6.a)
- **Duración media de pen downs (segmentos temporales con escritura continua en el papel):** en general las firmas genuinas suelen tener menor duración de pen downs en comparación con las imitaciones. (ver Figura 3.6.b)
- **Mediana de duraciones individuales de pen ups:** una firma es imitación con un 99,4 % de probabilidad si la mediana de duraciones individuales de pen ups es mayor a 0.25 segundos. (ver Figura 3.6.c)
- **Mediana de duraciones individuales de pen downs:** una firma es imitación con un 88,8 % de probabilidad si la mediana de duraciones individuales de pen downs es mayor a 1 segundo. (ver Figura 3.6.d)
- **Mediana de la velocidad:** una firma es genuina con un 88,8 % de probabilidad si la mediana de la velocidad es mayor a 2 unidades de distancia por unidad de tiempo. (ver Figura 3.6.e)
- **Presión mediana de la firma:** las imitaciones de firmas tienden a tener una menor presión en comparación con firmas genuinas. En concreto, una firma es imitación con un 96,8 % de probabilidad si la presión mediana de la misma es menor que un nivel de sensibilidad de presión 200 según la base de datos SIGMA bajo estudio. (ver Figura 3.6.f)
- **Número de pen ups:** es una característica que es interesante para obtener el grado de legibilidad y complejidad de una firma. Según el estudio las firmas imitadas suelen tener un menor número de pen ups, aunque la separación entre las dos clases no es significativa estadísticamente. (ver Figura 3.6.g)

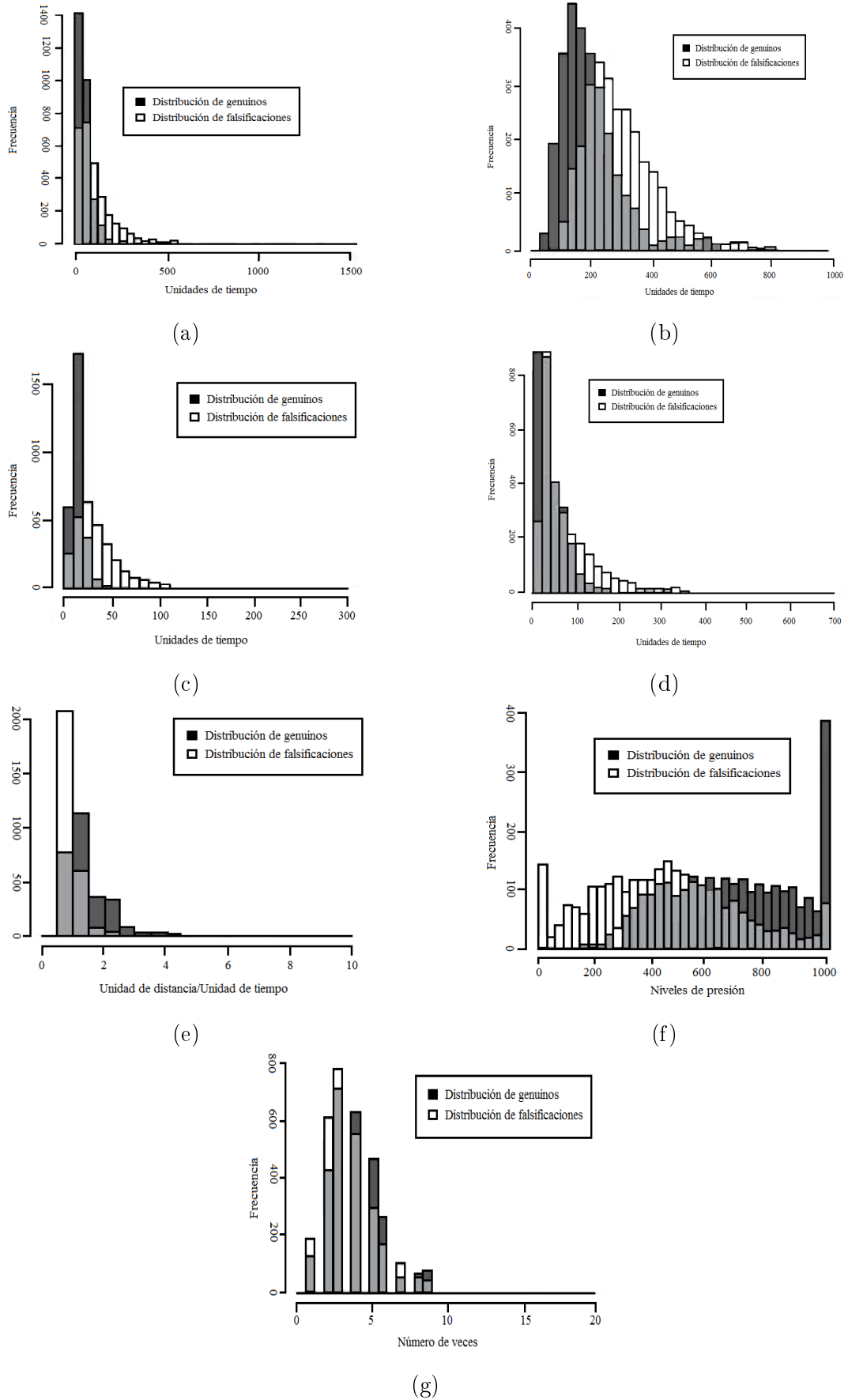


Figura 3.6: Histogramas de los resultados obtenidos de la base de datos SIGMA. Figura adaptada de [S. M. S. Ahmad et al., 2013]

4

Selección de rasgos identificativos

En el Capítulo 3 se describieron los métodos empleados por los peritos forenses en el cotejo de firmas manuscritas en su objetivo por averiguar la autoría de las mismas. Se analizó el procedimiento estándar a seguir así como la descripción de todos los detalles en los que se fijan en el momento del análisis.

También se detalló que los peritos forenses obtienen buenas tasas de acierto respecto a la autoría de la gran mayoría de las firmas dubitadas genuinas (84 % de acierto en el estudio a gran escala). Sin embargo, presentan una alta tasa de resultados inconclusivos para los casos de firmas dubitadas imitadas y simuladas. Estos resultados muestran que los expertos forenses no pueden distinguir correctamente estas dos clases de firmas dubitadas.

En este capítulo se pretende combinar algunas de las funciones de los sistemas de verificación de firmas *on-line* descritos en el Capítulo 2 con la metodología seguida por los peritos para poder desarrollar finalmente una herramienta de análisis forense que les sirva de apoyo de cara a mejorar, en la medida de lo posible, su trabajo de peritaje.

4.1. Selección de rasgos identificativos para la herramienta de análisis forense

En el Capítulo 3 se presentó una relación de rasgos identificativos de las firmas que se usan en la práctica por varios laboratorios forenses (Dirección General de la Guardia Civil, Netherlands Forensic Institute o el Centro de Servicios Forenses del Estado de Victoria en Australia) para poder detectar tanto firmas imitadas como firmas simuladas. Lo ideal es poder extraer información de todas o la mayoría de dichas características para facilitar el trabajo del perito forense. En base a ello, y otras pautas similares tomadas del trabajo diario no documentado de otras fuentes con las que mantiene relación directa el grupo ATVS (Área de tratamiento de voz y señales), se han decidido una serie de características distintivas de las firmas.

A continuación se presenta dicha lista de las principales características que proponen para nuestro desarrollo software, y se describe para cada una de ellas las funcionalidades que incorporará la herramienta de análisis para poder analizar o medir cada rasgo:

1. **Precisión en la forma pero lentas en su realización, o imprecisas pero fluidas.**

Para realizar una buena imitación la información en ambas dimensiones debe ser coincidente, lo cual es muy difícil de llevar a cabo.

La precisión/imprecisión de la forma se podrá analizar mediante la visualización de las coordenadas X e Y de las firmas. Se incorporará una nueva funcionalidad a la herramienta de análisis que permitirá superponer espacialmente varias firmas y alinear su forma en tamaño y ángulo. Adicionalmente se podrán analizar partes o trazos de las firmas seleccionadas, donde también se podrán medir ángulos de inclinación y distancias entre puntos.

Respecto a la duración y rapidez en la realización, se podrá visualizar el tiempo total de duración de cada firma, se podrá analizar la dinámica de las coordenadas X , Y y Presión en el tiempo, y también se proporcionará un valor de la velocidad y aceleración media de cada firma.

2. **Fluidez del trazo:** se define como firmas fluidas aquellas que presentan pocas interrupciones, es decir, presentan una realización de la misma con velocidades distintas de cero en su mayoría. Por el contrario, las firmas poco fluidas sí presentarán tramos con velocidades iguales o muy próximas a cero. La fluidez se calculará con la siguiente fórmula:

$$Fluidez = -(N_{V_x} + N_{V_y}) \quad (4.1)$$

donde N_{V_x} , N_{V_y} son características obtenidas del Cuadro 2.2 (características número 33 y 44), las cuales corresponden respectivamente al número de muestras con velocidad en X o en Y (V_x o V_y) menor o igual que un determinado umbral (V_0) que se puede ajustar para obtener un resultado óptimo. Cabe destacar que N_{V_x} y N_{V_y} están normalizados por el número de muestras de cada firma para eliminar la dependencia con la duración de la firma. El valor calculado dará valores menores a firmas con poca fluidez y valores mayores a firmas con mayor fluidez. Finalmente dichos valores obtenidos son normalizados en el rango $[0,10]$ mediante el método de la tangente hiperbólica [Jain, Nandakumar and Ross, 2005] usando la siguiente ecuación:

$$Fluidez' = \frac{10}{2} \left\{ \tanh\left(1,5 \left(\frac{Fluidez - \mu}{\sigma} \right)\right) + 1 \right\} \quad (4.2)$$

donde μ y σ son la media y desviación típica respectivamente de un conjunto de firmas utilizadas en exclusiva para llevar a cabo la normalización de los datos (en los ejemplos que se muestran en esta sección se han utilizado firmas genuinas de 70 usuarios de la base de datos e-BioFirma proporcionada por la UAM).

La Figura 4.1 muestra un ejemplo de firma genuina obtenida de la base de datos e-BioFirma así como las velocidades en los ejes X e Y respectivamente. Del mismo modo, la Figura 4.2 muestra la misma representación para un ejemplo de firma imitada. Sobre estos ejemplos se ha calculado el valor de la fluidez temporal utilizando un valor de umbral de velocidad igual a 1. En este caso los resultados de fluidez fueron de 9,1 para la firma genuina y de 3,4 para la firma imitada.

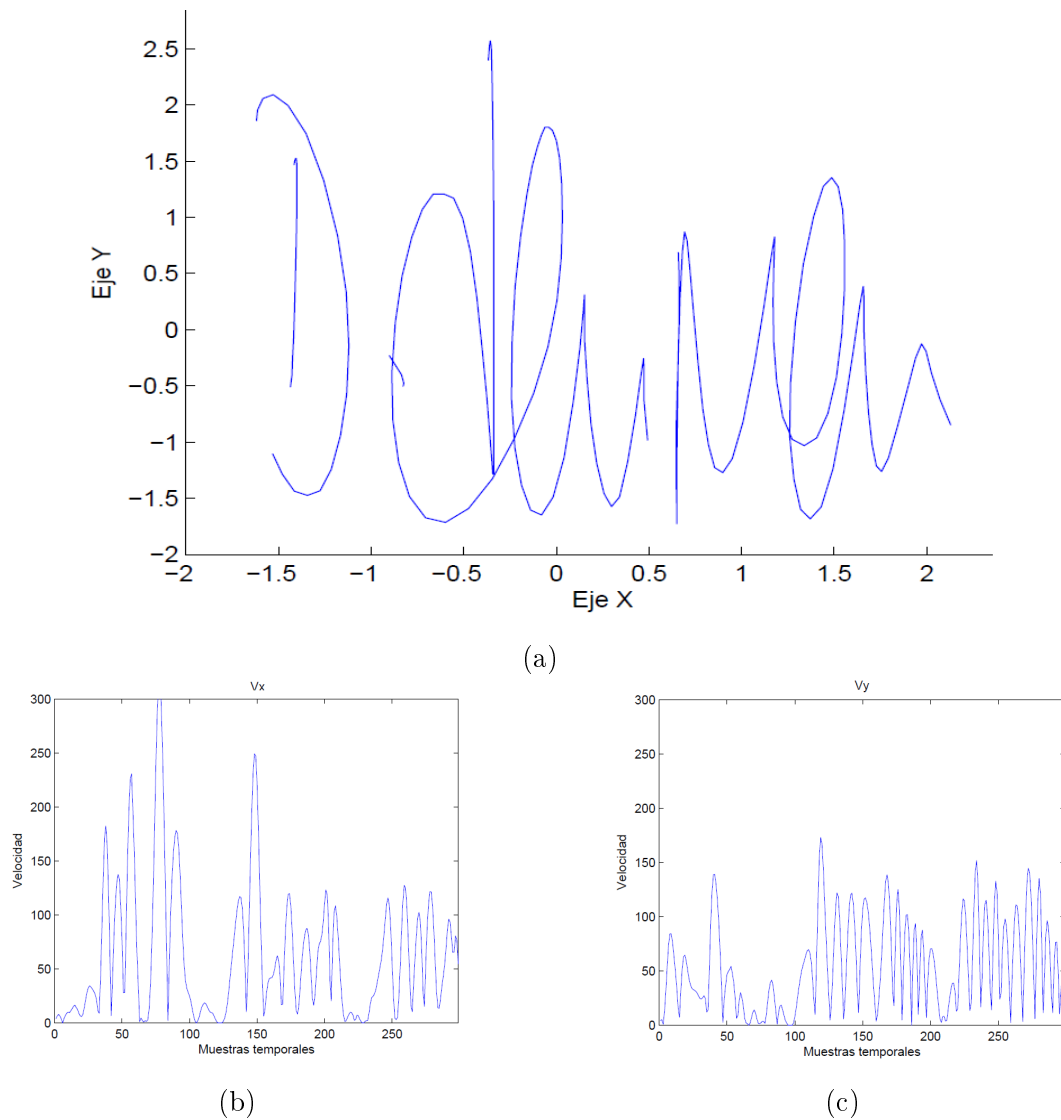


Figura 4.1: (a) Ejemplo de firma genuina. (b) y (c) Velocidades en el eje X e Y respectivamente.

Una funcionalidad adicional de la herramienta de análisis forense será la incorporación de estadísticas poblacionales de ciertos rasgos, como son la fluidez, el temblor, la duración, la velocidad y aceleración media. Para poder representar la distribución poblacional de la fluidez se utilizó la misma base de datos e-BioFirma, calculando para ello el parámetro de la fluidez para las firmas genuinas y las imitadas. La Figura 4.3 muestra la distribución poblacional de la fluidez y adicionalmente muestra dónde se sitúan las firmas de ejemplo dentro de dicha distribución. Como se puede observar la firma genuina con valor de la fluidez de 9,1 se posiciona en una zona con alta densidad de firmas genuinas. Por el contrario, la firma imitada del ejemplo se posiciona en una zona en la que es más difícil discernir entre genuina y falsificada.

3. **Temblor:** se define el temblor como el efecto que produce pequeñas sacudidas de poca amplitud, rápidas y frecuentes en el trazado de la firma. Dicho temblor puede ser debido a poca seguridad en el trazo de la firma de un imitador, pero también podrían ser debidas a enfermedades de tipo Párkinson, o a estados de nerviosismo o estrés.

El nivel de temblor de una firma se calculará mediante la distancia Euclídea entre las coordenadas X e Y de la firma a analizar y una versión suavizada de la misma. La versión

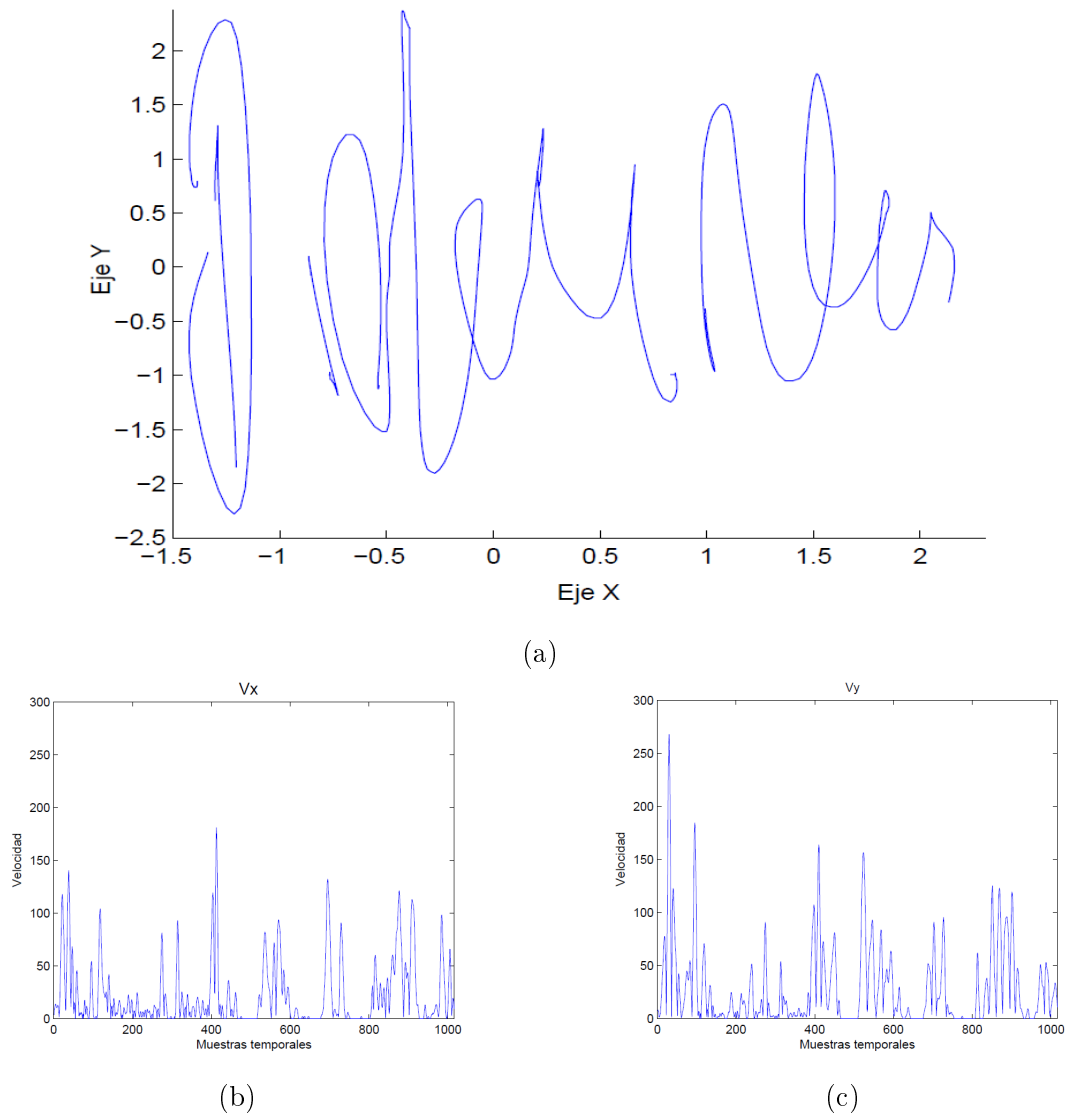


Figura 4.2: (a) Ejemplo de firma imitada. (b) y (c) Velocidades en el eje X e Y respectivamente.

suavizada de la misma se obtendrá mediante la aplicación de un filtro Gaussiano. El valor de la desviación típica de dicho filtro Gaussiano a utilizar será un parámetro que habrá que ajustar para obtener resultados óptimos. Finalmente los valores de distancia Euclídea obtenidos son normalizados al rango $[0,10]$ de la misma forma que se llevó a cabo para el caso de la fluidez de la firma.

La Figura 4.4 muestra los ejemplos de firma genuina e imitada con su versión suavizada mediante el filtro paso bajo superpuesta. Se puede observar cómo utilizando el mismo suavizado en ambos casos, la firma genuina está mucho más próxima a la suavizada que en el caso de la imitación, por lo tanto presenta un nivel de temblor menor. En concreto, el valor resultante normalizado del temblor para la firma genuina es de 4, mientras que para la firma imitada es de 7,7. La Figura 4.5 muestra la distribución poblacional del temblor en la base de datos e-BioFirma y además posiciona las dos firmas del ejemplo en dicha población (con líneas punteadas). Se puede observar claramente cómo la firma genuina se sitúa en una zona mucho más probable de pertenecer a la distribución de firmas genuinas, que tienen menor valor de temblor.

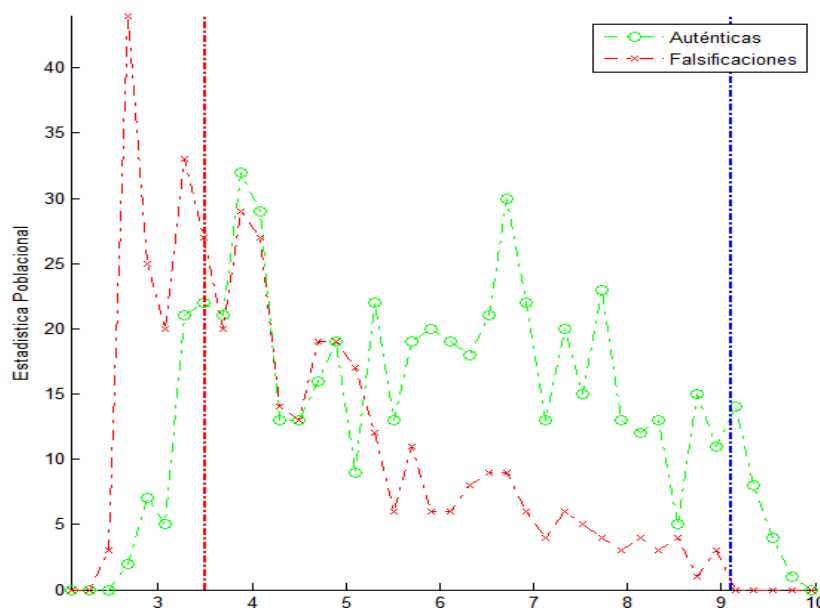
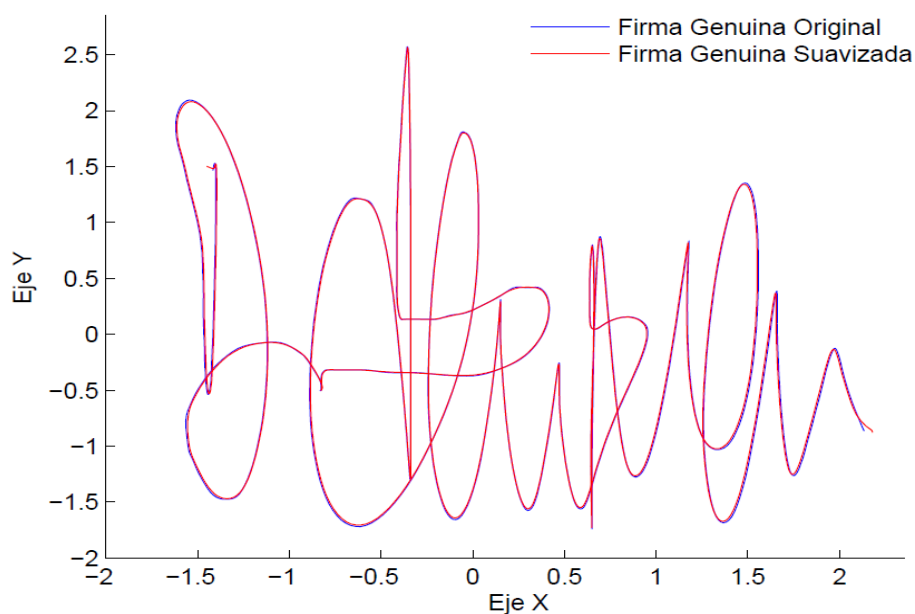
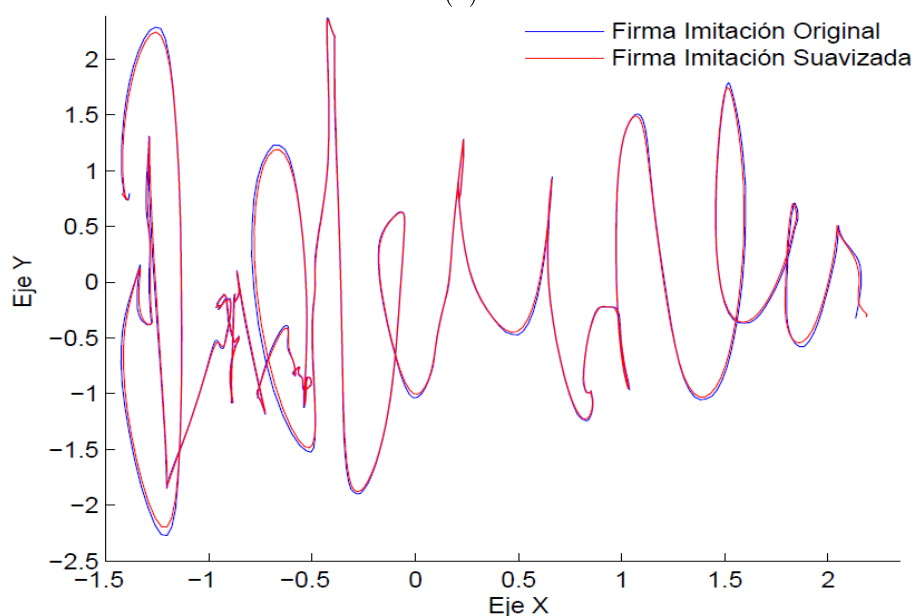


Figura 4.3: Distribución poblacional para la fluidez de la firma sobre la base de datos e-BioFirma. Las firmas del ejemplo de las Figuras 4.1 y 4.2 se incorporan a dicha distribución con línea punteada azul y roja para los casos de firma genuina e imitación respectivamente.

4. **Calidad de la línea:** la calidad de la línea la podemos definir como una combinación de las características de fluidez (más relacionada con la dinámica temporal de la firma), y el nivel de temblor (más relacionada con la suavidad espacial de la firma). Por tanto, se podría calcular un valor de la calidad de la línea como combinación de los dos anteriores.
5. **Defectos de presión y presión monótona:** para poder medir posibles defectos de presión y analizar si existen tramos con presión monótona, la herramienta de análisis permitirá visualizar la dinámica de la presión en el tiempo. Además se podrán superponer los valores de presión de varias firmas así como alinearlos en el tiempo para poder analizar más fácilmente las similitudes y diferencias de presión.
6. **Dirección del movimiento incorrecta:** para analizar la dirección del movimiento de la escritura, la herramienta de análisis incorporará una funcionalidad de reproducción de la dinámica de la firma. La visualización de la dinámica de varias firmas se realizará de forma sincronizada según el instante inicial, adicionalmente se podrán reproducir las firmas a velocidades más lentas a la realidad para poder analizar dichas direcciones de los movimientos con mayor precisión.
7. **Interrupciones:** las interrupciones son tramos de las firmas que pueden ser producidos por dos fenómenos: *i*) se deja el lápiz fijo en la misma posición de X e Y (este efecto se podrá detectar mediante la visualización de la dinámica temporal de las coordenadas X y Y ya que no cambiarán sus valores en dicho intervalo temporal). O bien, *ii*) se produce un levantamiento del lápiz. Este efecto se podrá detectar mediante la visualización de la dinámica de la presión en el tiempo, en cuyo caso habrá un tramo con presión igual a cero.
8. **Diferencias en forma, tamaño, proporción o inclinación:** para poder medir dichas diferencias en forma, tamaño, proporción o inclinación, la herramienta dispondrá una nueva funcionalidad de análisis de trazos (donde en el extremo el trazo puede ser la firma completa). Con esta nueva funcionalidad se podrán seleccionar varios trazos de las firmas a analizar, se podrán visualizar de forma simultánea, realizar giros y cambios de tamaño para poder alinearlos, y además se podrán medir longitudes en X e Y , medir ángulos entre



(a)



(b)

Figura 4.4: (a) Ejemplo de firma genuina original y suavizada. (b) Ejemplo de firma imitada original y suavizada.

dos puntos marcados y visualizar la dinámica de dichos trazos, entre otras funcionalidades.

9. **Cambios de velocidad en los distintos segmentos:** uno de los rasgos identificativos de firmas imitadas era que no presentaran cambios de velocidad en los distintos segmentos, a diferencia de las firmas genuinas que sí se suelen producir. Para analizar dicha característica se podrá visualizar la dinámica de la velocidad en el tiempo, y además se podrán seleccionar los distintos tramos, para los que se obtendrá una medida de la velocidad media y se podrán medir las diferencias de velocidades medias en los distintos segmentos seleccionados.

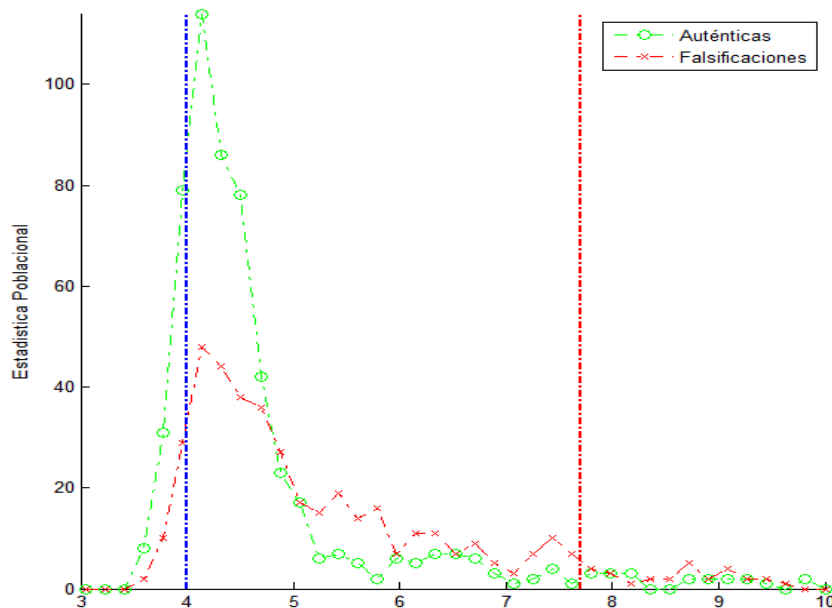


Figura 4.5: Distribución poblacional para el temblor de la firma sobre la base de datos e-BioFirma. Las firmas del ejemplo de la Figura 4.4 se incorporan a dicha distribución con línea punteada azul y roja para los casos de firma genuina e imitación respectivamente.

10. **Levantamientos del lápiz poco naturales:** los levantamientos poco naturales están muy relacionados con las interrupciones, por lo tanto podrán ser analizados de la misma forma, es decir, mediante la funcionalidad de reproducción de la dinámica de la firma y mediante la visualización de las coordenadas X, Y y Presión en el tiempo, tanto durante la realización de la firma, como durante los instantes de vuelo (esto es, instantes sin contacto con el dispositivo de captura).
11. **Inicios y finales muy directos o bruscos:** para analizar si los inicios y finales son bruscos la nueva herramienta permitirá hacer zoom sobre dichos tramos iniciales y finales y analizar tanto la forma espacial, como la dinámica temporal de las coordenadas X e Y, y la presión ejercida.
12. **Correcciones:** se podrá detectar si se producen correcciones en la firma mediante la funcionalidad de reproducción de la dinámica de la firma y mediante la funcionalidad de análisis de trazos de las firmas.
13. **Dinámica del vuelo de la escritura:** el análisis de las muestras capturadas en las que no existe contacto con la tableta pueden ser de gran interés y hasta ahora no se habían podido analizar por su no disponibilidad. En ese sentido se incorporará una nueva funcionalidad a la herramienta de análisis en la que se podrán visualizar dichos puntos del vuelo de la escritura y sobre los que se podrán realizar las mismas medidas que para el resto de puntos, es decir, se podrá seleccionar dicho trazo y hacer zoom espacial y temporal y realizar medias longitudinales, medir ángulos y realizar rotaciones, así como reproducir su dinámica.

A continuación se presenta la lista de características usadas por los peritos forenses para detectar firmas simuladas, y se describe para cada una de ellas las funcionalidades que incorporará la herramienta de análisis forense para poder analizar o medir cada rasgo:

1. Alteración en letras mayúsculas

2. Alteración en la construcción de letras
3. Alteración en rúbrica final
4. Alteración en la forma de la firma
5. Alteración del estilo caligráfico
6. Alteración de la inclinación
7. Mayor altura de las letras
8. Omisión de letras en el nombre
9. Adición de letras al nombre
10. Menor velocidad de escritura

Todas estas características podrán ser analizadas por la herramienta mediante funcionalidades ya descritas anteriormente. En concreto para estos rasgos, del 1 al 9 se podrán analizar utilizando la funcionalidad de análisis de trazos de las firmas, que permitirán medir tamaños en X e Y , realizar giros y medir ángulos entre dos puntos marcados. También se podrán usar las funcionalidades de visualización de la dinámica de las firmas así como los valores de las coordenadas X e Y en el tiempo. Para el caso de la característica 10 sobre la velocidad de escritura, se podrán analizar los valores de la velocidad en las muestras temporales y también se proporcionará una media de la velocidad de la firma o de los trazos seleccionados.

5

Diseño de la herramienta forense

En el presente capítulo se hace una descripción del software desarrollado, partiendo de las funcionalidades descritas en el Capítulo 4, con objeto de comprender el funcionamiento de la misma y con ejemplos gráficos de su uso.

Primero se hará una pequeña referencia al software de programación empleado para su desarrollo (Matlab), explicando el por qué de su elección y las limitaciones que éste conlleva. A continuación se expone el diseño global de la aplicación, mencionando las funcionalidades más características.

Para finalizar, se analiza en detalle cada una de las secciones de la herramienta software, describiendo todas sus prestaciones con ejemplos de su funcionamiento tanto visuales como funcionales. También se detallan las funciones y ecuaciones más relevantes empleadas para implementar varias funcionalidades de la aplicación.

5.1. Breve descripción del software de programación empleado

La herramienta ha sido desarrollada haciendo uso del software Matlab que ofrece un entorno de desarrollo integrado (IDE) con un lenguaje de programación propio. Dicho software permite la manipulación de matrices, la representación de datos y funciones, la implementación de algoritmos y la creación de interfaces de usuario (GUI) entre otras funcionalidades.

La aplicación recibe el nombre de *Sign-Analyzer* y se ha creado como una app de Matlab, las apps son programas autónomos de Matlab con un frontal gráfico de usuario GUI que automatizan una tarea o un cálculo. Por lo general, la GUI incluye controles tales como menús, barras de herramientas, botones y controles deslizantes. Muchos productos de Matlab, como Curve Fitting Toolbox, Signal Processing Toolbox y Control System Toolbox, incluyen apps con interfaces de usuario personalizadas. También es posible crear apps personalizadas propias, incluidas las interfaces de usuario correspondientes, para que puedan ser utilizadas de forma autónoma sin necesidad de tener el software Matlab instalado.

5.2. Diseño global de la herramienta

La herramienta ha sido diseñada como una aplicación multiventana, cada una de ellas permite analizar diferentes parámetros de la firma bajo estudio así como una comparación directa entre varias de ellas de forma simultánea. Además todas ellas permiten añadir comentarios y capturas de imagen con objeto de facilitar la tarea del usuario. El diseño de las ventanas es el siguiente:

- **Primera ventana:** permite cargar y visualizar varias firmas simultáneamente, tanto su información espacial como en el eje temporal. Además se pueden alinear respecto al centro geométrico, centro de masas o inicio de la misma; también permite girarlas con respecto al centro seleccionado y normalizar su tamaño para ofrecer una mejor comparación. En el eje temporal se pueden alinear las duraciones, ofrece la opción de hacer zoom y la visualización en colores. (Ver Figura 5.1)
- **Segunda ventana:** esta ventana permite un análisis más exhaustivo para una sola firma; pudiendo analizar rasgos como los levantamientos del estilete, la reproducción temporal o el seguimiento de su realización. También se añade la opción de representar la firma en una escala de colores según la presión ejercida para ofrecer una representación más visual de la presión. Finalmente se pueden seleccionar trazos de la firma bajo estudio para un posterior análisis de cada uno en la tercera ventana. (Ver Figura 5.2)
- **Tercera ventana:** esta ventana tiene como objeto el análisis de trazos pertenecientes a una misma firma, en ella se puede analizar la velocidad y la aceleración del trazo en función del tiempo, también permite girar el trazo con respecto el centro de representación escogido (centro de la traza, centro de masas o manual), cambiar el grosor, ver las muestras capturadas, activar la rejilla y hacer zoom.

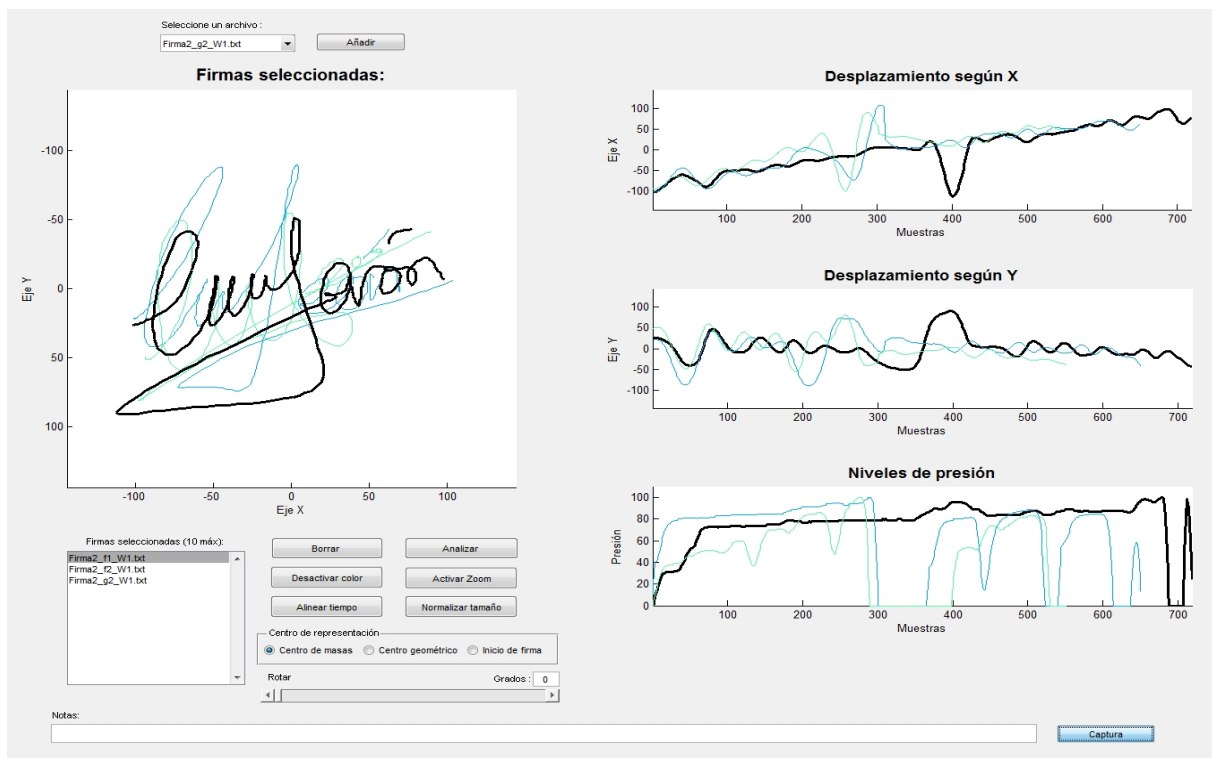


Figura 5.1: Primera ventana de la herramienta Sign-Analyzer.

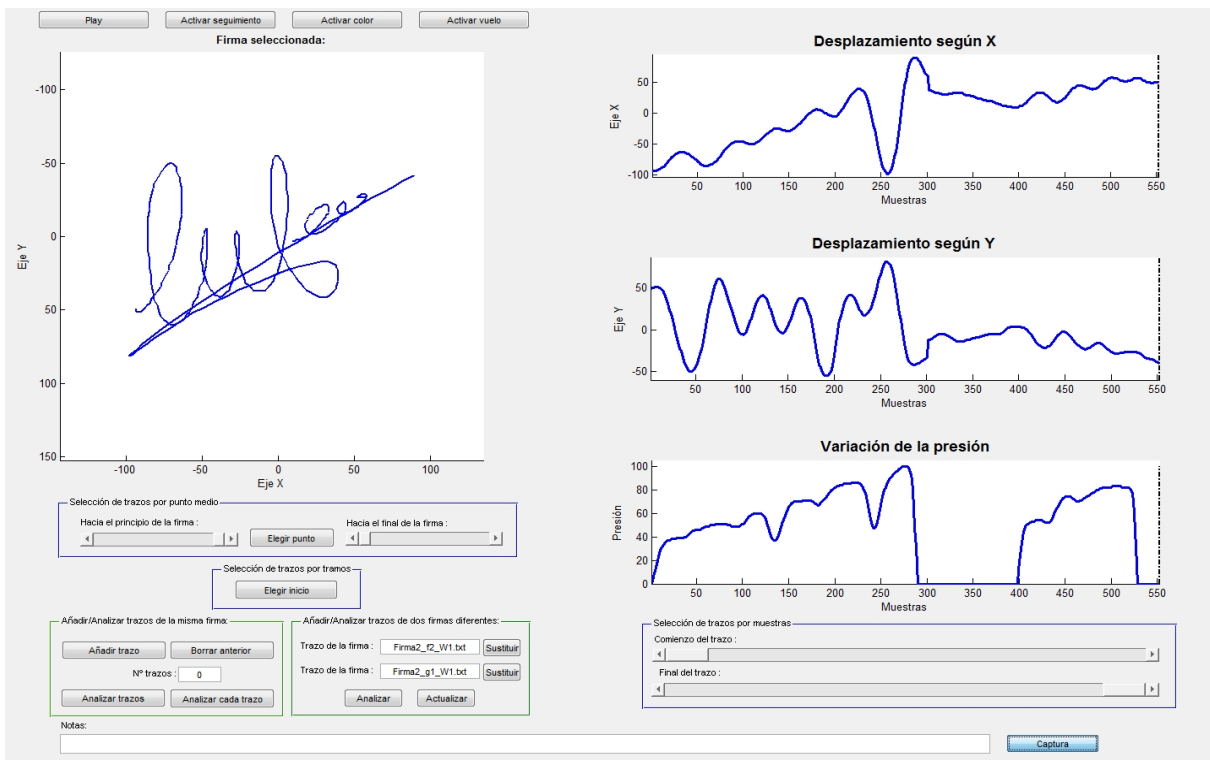


Figura 5.2: Segunda ventana de la herramienta Sign-Analyzer.

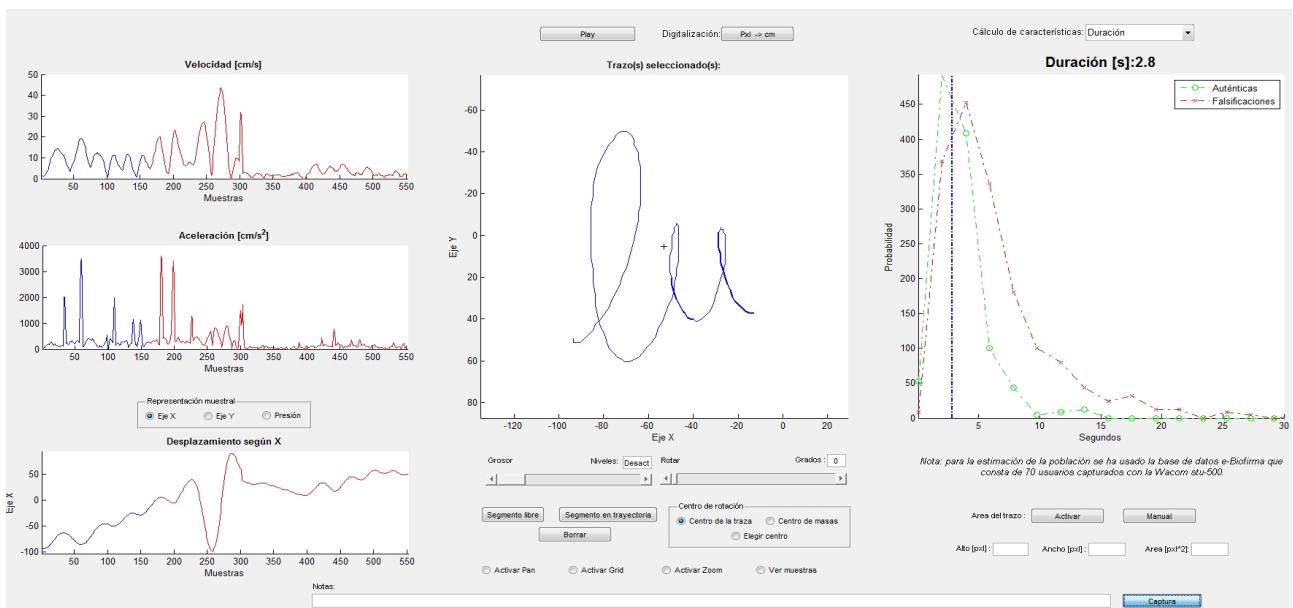


Figura 5.3: Tercera ventana de la herramienta Sign-Analyzer con trazos pertenecientes a la misma firma.

Además, esta ventana permite hacer medidas de longitud e inclinación así como reproducir el trazo. Finalmente se pueden obtener cinco características del trazo escogido: duración, velocidad y aceleración media, fluidez temporal y temblor espacial (ver Figura 5.3). Esta tercera ventana también permite analizar dos trazos de dos firmas diferentes a la vez. En este caso también se permite la reproducción de los trazos a distintas velocidades,

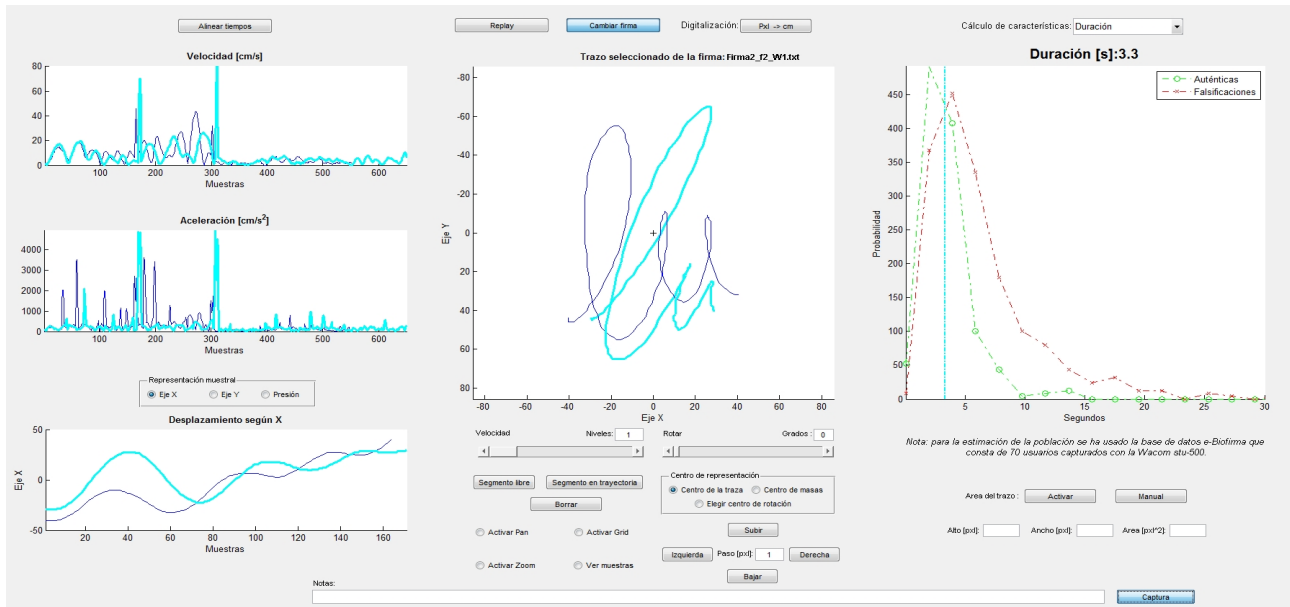


Figura 5.4: Tercera ventana de la herramienta Sign-Analyzer con trazos pertenecientes a dos firmas diferentes.

alineación temporal de la velocidad y la aceleración de las mismas, y desplazamientos píxel a píxel de los trazos para poder alinearlos de forma manual. (Ver Figura 5.4)

Finalmente cabe mencionar que la herramienta ha sido diseñada para ser utilizada con una resolución óptima de 1900x1080, las rutinas y subrutinas programadas ralentizan la herramienta debido a las limitaciones de MATLAB, por lo que se recomienda un ordenador con un procesador potente.

5.3. Descripción funcional

En esta sección se describirán las funcionalidades de cada ventana con ejemplos de su uso. Las firmas que son objeto de análisis tendrán que estar contenidas en la carpeta *Firmas* que se encuentra ubicada en la carpeta donde se instaló la aplicación, los ficheros serán del tipo documento de texto con el siguiente formato (ver Figura 5.5):

1. La primera línea del fichero será un número que indique la cantidad de muestras contenidas N .
2. El resto de líneas estarán formadas por cuatro columnas que indicarán para cada muestra i , la coordenada x , la coordenada y , el instante de captura y la presión ejercida.

Para que la herramienta funcione correctamente los ficheros que contienen las firmas podrán tener el nombre que se desee, pero todos los nombres deberán tener la misma longitud.

5.3.1. Primera ventana: carga de firmas

Ésta será la ventana que se visualizará al arrancar la aplicación, la cual permite cargar, borrar o seleccionar cualquiera de las firmas contenidas en la carpeta *Firmas*. La herramienta

496	Número de muestras		
257	202	3066997	375
258	210	3067004	374
258	221	3067019	377
257	227	3067034	382
256	228	3067050	381
248	220	3067072	382
238	208	3067087	375
225	195	3067102	365
x	y	Tiempo	p

Figura 5.5: Ejemplo del formato de fichero permitido.

permite hasta un máximo de diez firmas dibujadas a la vez, representadas cada una con un color, en el cuadro situado en la parte inferior de la ventana se podrán seleccionar haciendo click en su nombre, la firma seleccionada aumentará de grosor para señalar que ha sido seleccionada y visualizarla mejor (ver Figura 5.6). Con el botón *Borrar* se borrará la firma seleccionada, que en cualquier momento se podrá volver a añadir con el botón de *Añadir*. Finalmente cualquiera de las firmas seleccionadas se puede girar hasta 360 grados usando la barra deslizadora.

El botón *Activar zoom* permite hacer zoom en cualquiera de las gráficas, tanto en la representación espacial como en las temporales. Además, el botón *Desactivar color* ofrece la posibilidad de activar y desactivar el color de las firmas representadas, dibujando cada una de un color o todas en negro.

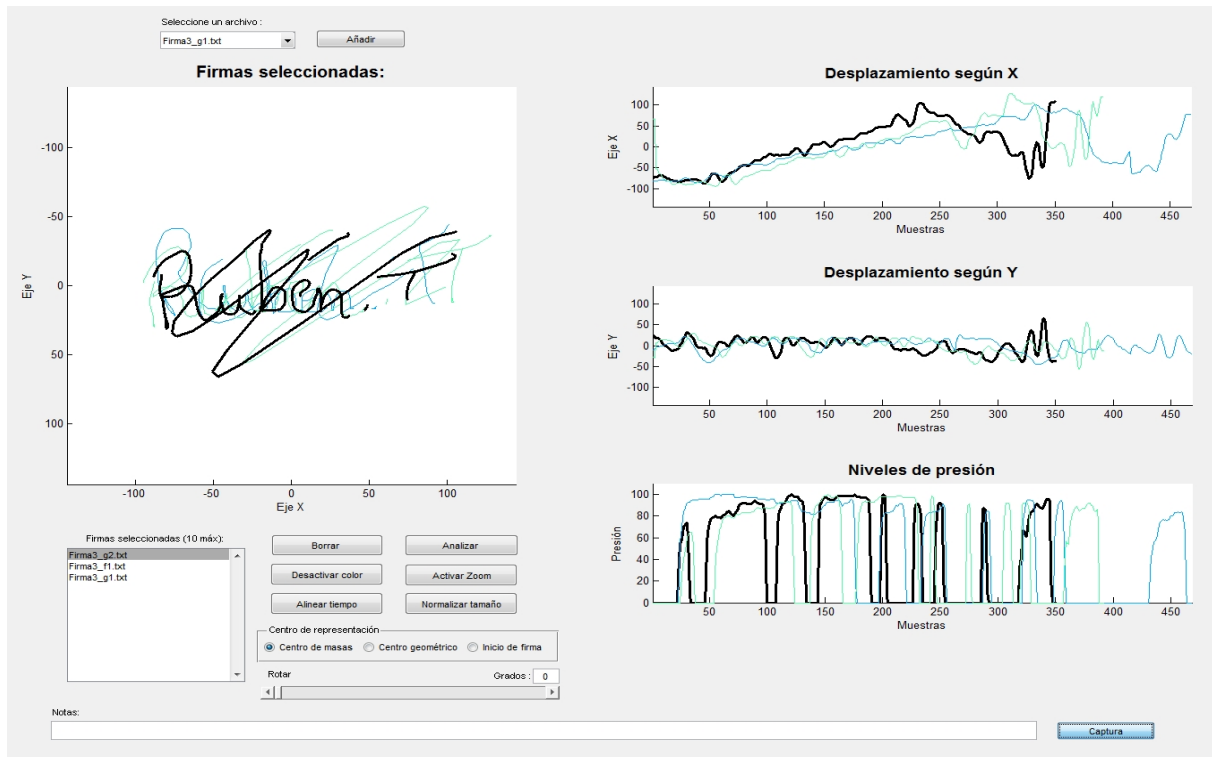


Figura 5.6: Ejemplo de representación de varias firmas simultáneas, la firma en negro está seleccionada.

A continuación se describen las funcionalidades más específicas para esta ventana:

Centro de representación

Esta opción permite cambiar el centro de representación escogido para todas las firmas dibujadas con objeto de poder alinearlas de la manera más óptima posible, los centros de representación posibles son (ver Figura 5.7):

- *Centro de masas*: es la opción que viene por defecto, el centro de masas se calcula sumando todas las muestras y dividiéndolas por el número total de ellas. De esta manera el centro se ubica donde haya un mayor número de muestras, su fórmula es la que sigue:

$$C_x = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i, \quad C_y = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_i \quad (5.1)$$

siendo N el número total de muestras.

- *Centro geométrico*: esta opción calcula el centro según la geometría de la firma, posicionándose justo a la mitad entre la muestra más grande y más pequeña de cada eje. La fórmula para este centro es:

$$\begin{aligned} C_x &= \frac{\max_i(x_i) - \min_i(x_i)}{2} + \min_i(x_i) \\ C_y &= \frac{\max_i(y_i) - \min_i(y_i)}{2} + \min_i(y_i) \end{aligned} \quad (5.2)$$

- *Inicio de la firma*: esta opción posiciona el centro de representación en la primera muestra x_1 e y_1 :

$$C_x = x_1, \quad C_y = y_1 \quad (5.3)$$

Cabe destacar que una vez calculado el centro seleccionado, éste es restado a la firma original para hacer coincidir el centro de representación con el centro de coordenadas.

Normalizar tamaño

Esta opción permite normalizar el tamaño de todas las firmas representadas para poder compararlas independientemente de su tamaño como se puede ver en la Figura 5.8. La normalización consiste en dividir todas las muestras por la desviación típica de las mismas,

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \mu_x)^2}{N}}, \quad \mu_x = \frac{\sum_{i=1}^N x_i}{N} \quad (5.4)$$

Aunque la normalización se produce en ambos ejes, la desviación sólo se calcula para el eje x con el fin de mantener la relación de aspecto de la firma.

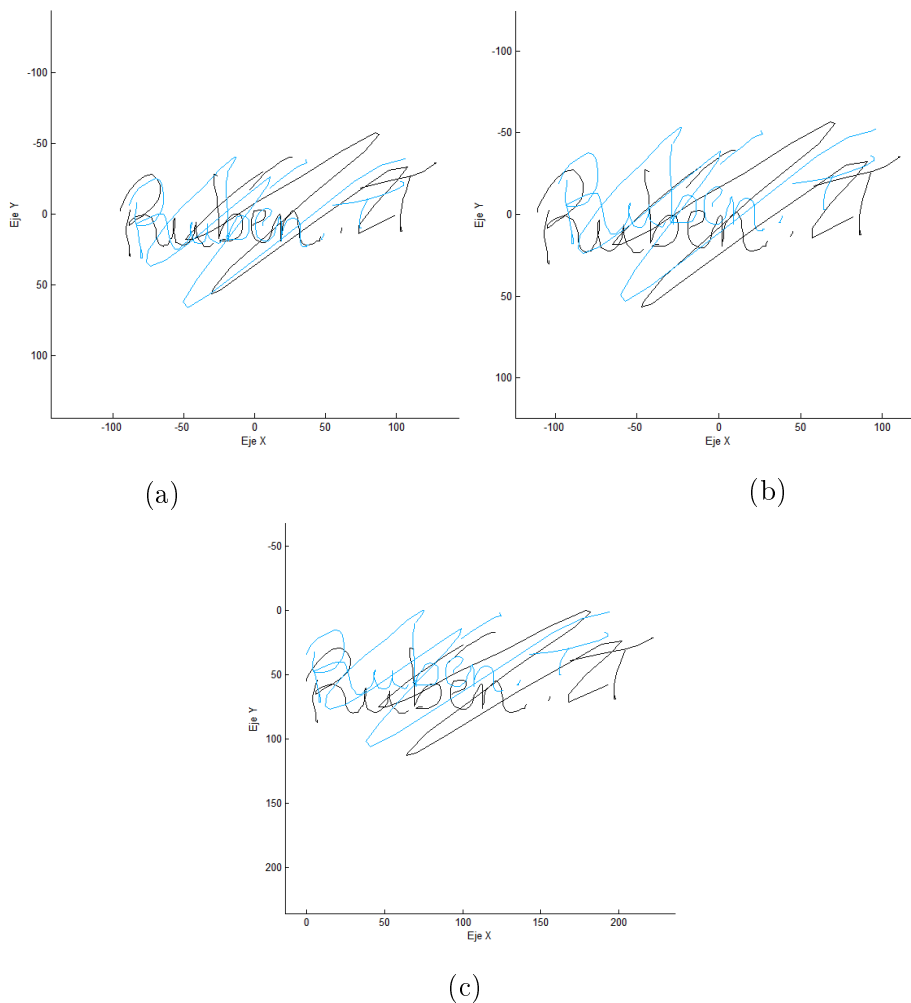


Figura 5.7: *Diferentes centros de representación, las funciones temporales también se ven alteradas por la elección del centro aunque no se muestren. (a) Centro de masas. (b) Centro geométrico. (c) Origen de la firma.*

Alinear tiempo

La alineación de las muestras se produce sólo en la representación temporal, las muestras de las firmas se interpolan a la longitud de la firma seleccionada para una mejor comparación, la Figura 5.9 muestra este efecto. Mientras se tenga activada esta opción cada vez que se seleccione una firma el resto de firmas se interpolarán automáticamente a la longitud de la firma seleccionada.

Finalmente el botón *Analizar* mostrará la segunda ventana con la firma que está seleccionada para un análisis más exhaustivo de una sola firma.

5.3.2. Segunda ventana: selección de trazos

Antes de mostrar la segunda ventana aparecerá un cuadro que pedirá introducir los datos del dispositivo de captura empleado para la firma a analizar, estos datos son la frecuencia de muestreo (puntos/seg) y los píxeles por pulgada.

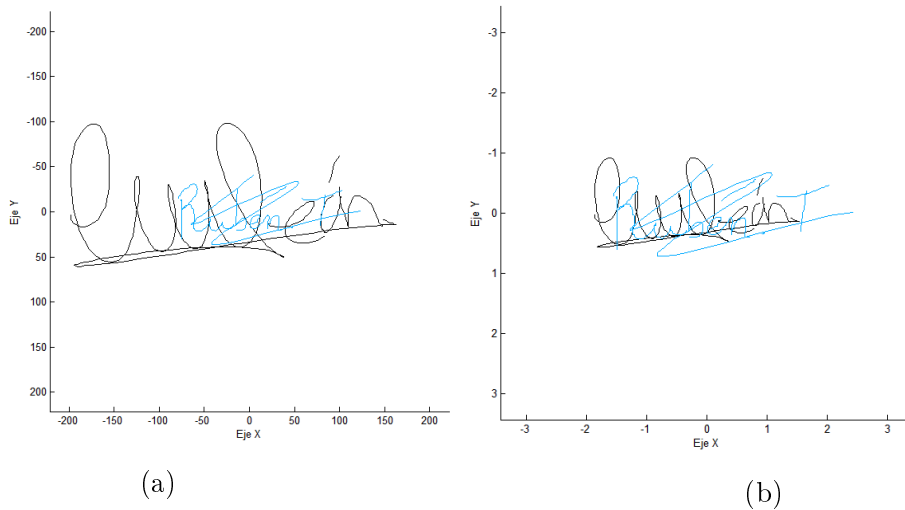


Figura 5.8: Normalización de dos firmas de tamaño diferente, nuevamente las funciones temporales también se ven alteradas por la normalización aunque no se muestren. (a) Sin normalizar. (b) Con normalización.

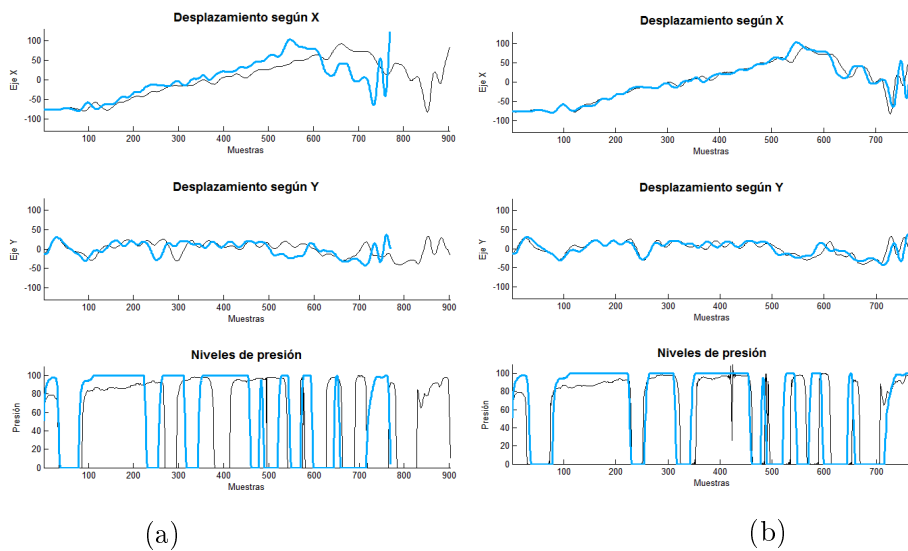


Figura 5.9: Alineación temporal de dos firmas de diferente duración. (a) Sin alinear. (b) Con alineamiento.

Una vez introducidos los datos y pulsado el botón de *Aceptar* se visualizará la segunda ventana, sus principales funcionalidades son:

Activar color

Esta opción nos permite visualizar la firma en una gama de colores acorde con la presión ejercida de tal modo que las zonas donde se ejerce más presión serán más claras que las zonas donde menos. La visualización en color se produce tanto en la representación temporal como en la espacial, además en la representación temporal de la presión se añade la gama de colores empleada según los niveles de presión existentes (ver Figura 5.10).

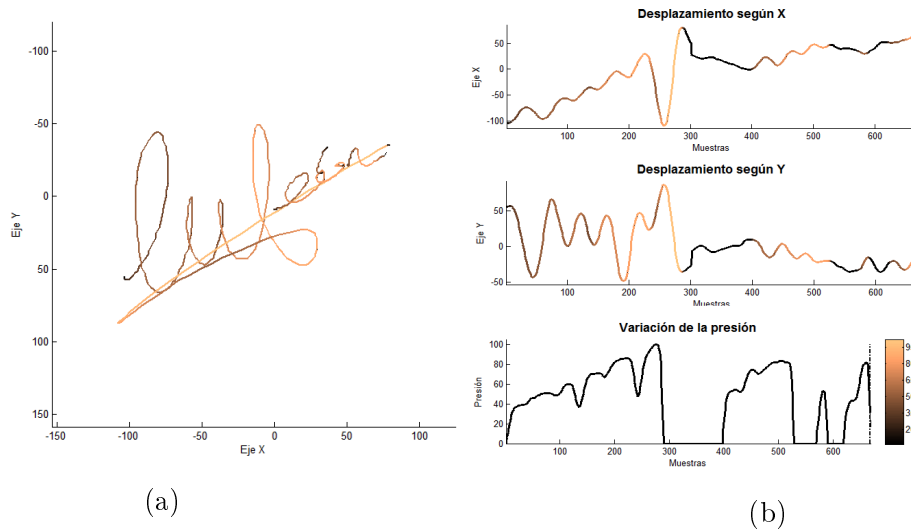


Figura 5.10: Firma en color según la presión ejercida. (a) Representación espacial. (b) Representación temporal.

Activar seguimiento

Esta opción ofrece la posibilidad de visualizar dónde empieza y acaba cada *pen-up* para permitir un seguimiento en la realización del trazado. Cuando se pulse el botón *Activar seguimiento* aparecerá en primer lugar el principio y el final de la firma, si se pulsa nuevamente se irán mostrando los *pen-ups* realizados en el mismo orden en el que se ejecutaron, representados con una flecha que marca el inicio y el final del mismo. En la Figura 5.11 se aprecia un ejemplo del seguimiento de una firma, donde queda indicado el principio y el final de la misma así como el de los *pen-ups*.

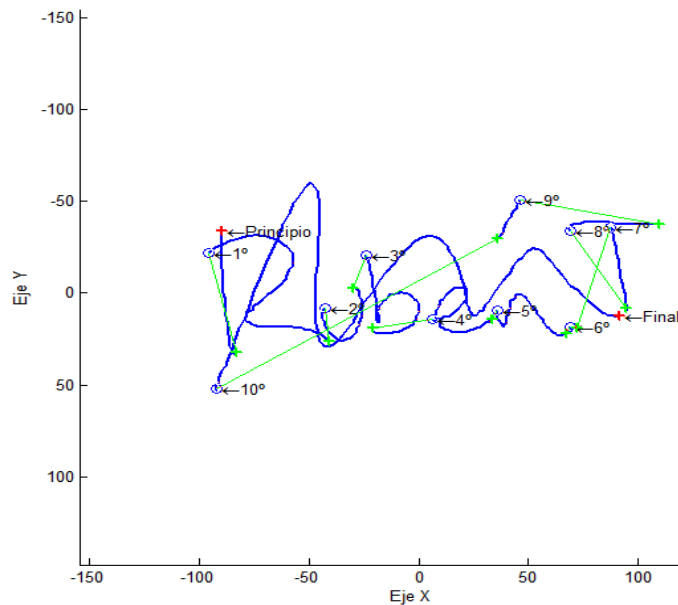


Figura 5.11: Los *pen-ups* aparecen enumerados según el orden en el que se realizarón.

Activar vuelo

Esta función permite representar las muestras capturadas durante los *pen-ups*, es decir, las muestras capturadas con presión 0. En la Figura 5.12 se aprecia dicho efecto, cabe mencionar que si el estilete se levanta mucho de la pantalla, el dispositivo no lo detecta y las muestras durante el levantamiento no son capturadas.

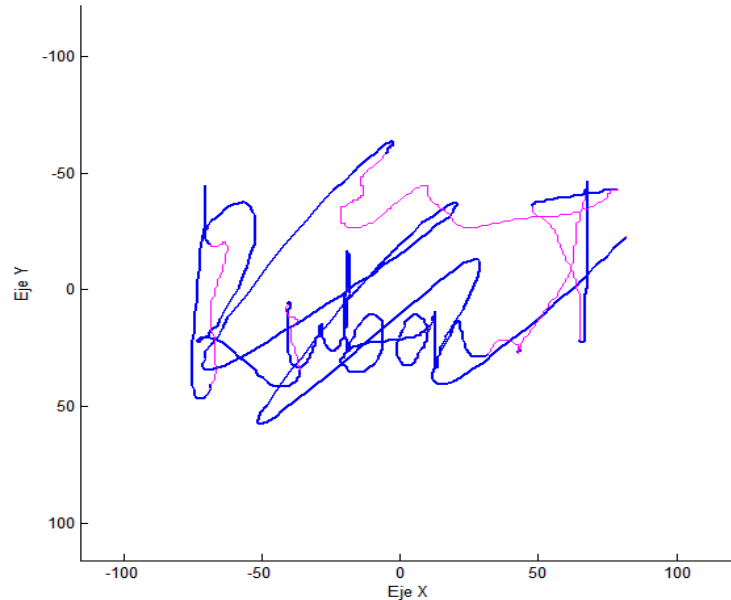


Figura 5.12: Las muestras que representan el vuelo de la firma aparecen coloreadas en morado.

Play

Este botón ofrece la posibilidad de reproducir la firma en tiempo real, aunque debido a las limitaciones de MATLAB la reproducción podría ser ligeramente más lenta que la original. Si la opción del vuelo está activada, la reproducción de la firma también mostrará el vuelo de la misma, del mismo modo si el color está activado la reproducción se hará con la firma en color.

Aparte de las funcionalidades anteriormente mencionadas, esta ventana permite seleccionar trazos de la firma para su posterior análisis, los métodos de selección de trazos son tres:

- **Selección de trazos por muestras:** esta opción permite seleccionar un trazo fijándose en la representación temporal de la firma haciendo uso para ello de barras de desplazamiento. Las barras indicarán el principio y el final del trazo. (ver Figura 5.13)
- **Selección de trazos por punto medio:** este método permite seleccionar un punto cualquiera de la firma con el botón *Elegir punto*, una vez fijado, dos barras de desplazamiento permiten ir hacia el principio y el final de la firma desde dicho punto escogiendo las muestras contiguas. (ver Figura 5.14)
- **Selección de trazos por tramos:** con esta opción se pueden seleccionar dos puntos cualesquiera de la firma y seleccionar todas las muestras que se encuentran entre ambos. (ver Figura 5.15)

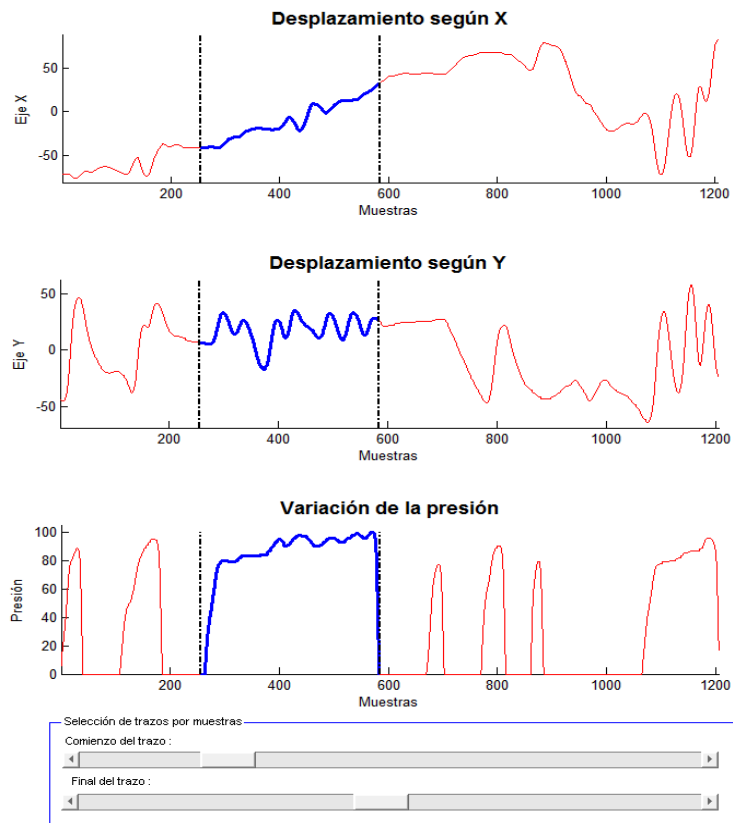


Figura 5.13: Ejemplo de uso de la selección de trazos por muestras.

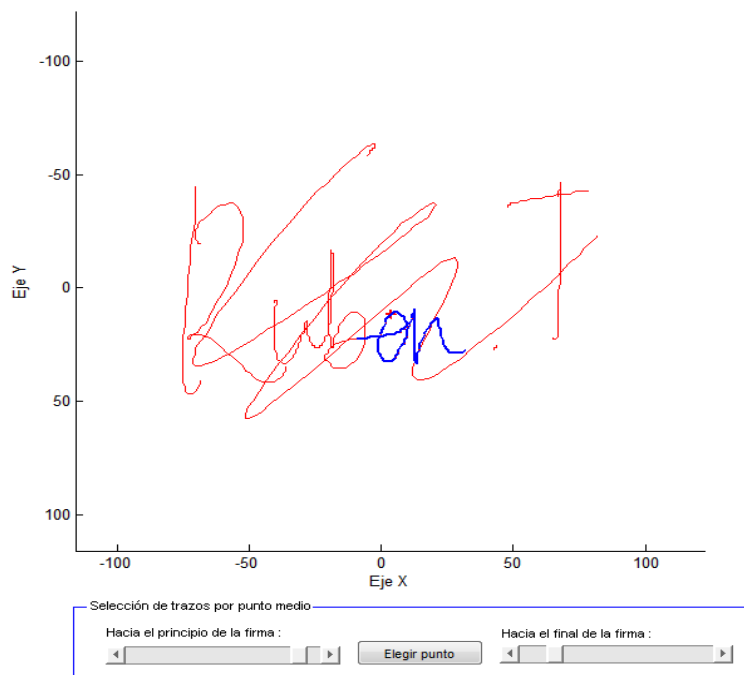


Figura 5.14: El botón elegir punto permanecerá en rojo para indicar que no se puede realizar otra opción hasta que no esté fijado, la cruz muestra el punto escogido.

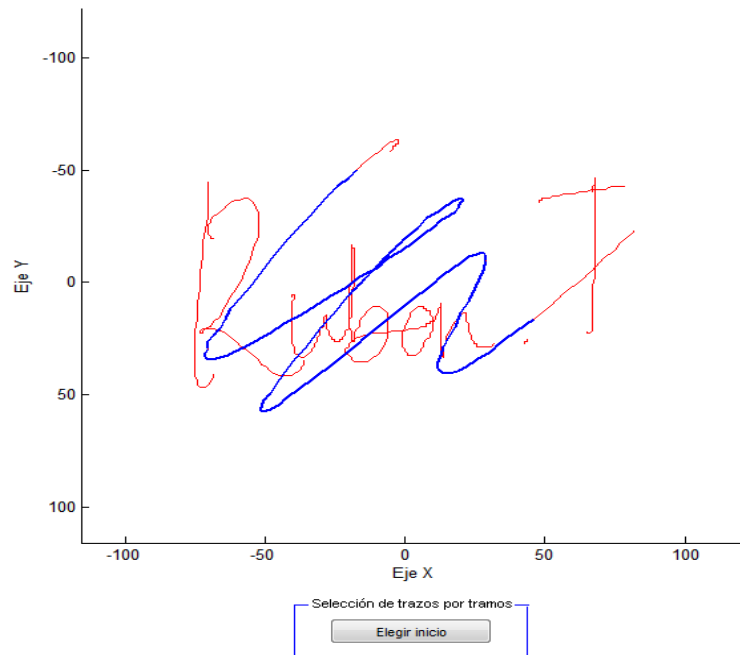


Figura 5.15: El botón permanecerá en rojo para indicar que no se puede realizar otra opción hasta que no estén fijados ambos puntos.

Una vez que ya se tiene el trazo seleccionado haciendo uso de alguno de los métodos mencionados, se podrá añadir y analizar con las opciones de *añadir/analizar trazos de la misma firma* que permitirá analizar los trazos de la misma firma o *añadir/analizar trazos de dos firmas diferentes* que ofrece la posibilidad de analizar dos trazos de dos firmas diferentes.

Finalmente, pulsando el botón *Analizar* se mostrará la última ventana en la cual se podrán estudiar en detalle los trazos previamente seleccionados.

5.3.3. Tercera ventana: análisis de trazos

Análisis de trazos: mono-trazo

Esta ventana es mostrada una vez pulsado el botón de *Analizar cada trazo* o *Analizar trazos* de la opción de *añadir/analizar trazos de la misma firma* de la ventana anterior. El primer botón muestra la ventana para cada trazo que se haya seleccionado mientras que el segundo la muestra para todos los trazos juntos.

En esta ventana se dibujan las representaciones tanto temporales como espaciales de los trazo/s escogido. También se representa la velocidad y la aceleración de los mismos (ver Figura 5.16), para ello se ha hecho uso de las fórmulas descritas en [J. Fierrez *et al.*, 2007; Young S *et al.*, 2002] donde se utiliza tanto la primera como la segunda derivada para suavizar dichas funciones. Entre las funcionalidades de esta ventana, se vuelven a ofrecer las opciones de reproducción, rotación y zoom para los trazos seleccionados.

Además también se añaden las siguientes funcionalidades:

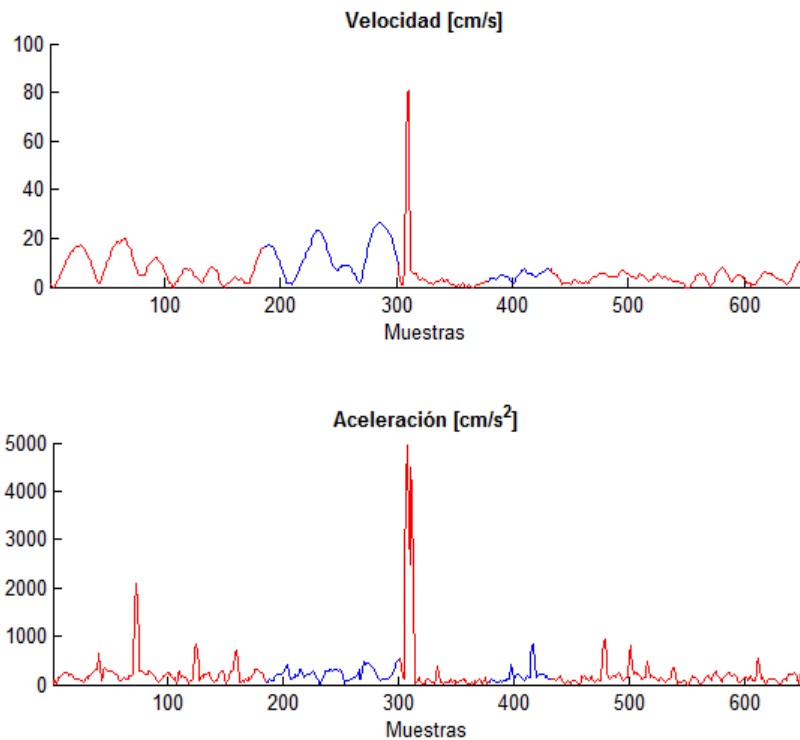


Figura 5.16: Velocidad y aceleración de dos trazos de una misma firma, los segmentos en azul indican los trazos seleccionados y en rojo aparece la firma completa.

Segmento libre/en trayectoria

Estas opciones permiten calcular el ángulo y la distancia entre dos puntos escogidos, con el botón *Segmento libre* se pueden escoger dos puntos cualesquiera mientras que con el botón *Segmento en trayectoria* los dos puntos pertenecen al trazo/s. La distancia viene medida en píxeles, pudiéndose cambiar a *cm* pulsando el botón *Digitalización*. (ver Figura 5.17)

Grosor

Permite aumentar o disminuir el grosor del trazo representado para una mejor visualización, si la opción se deja desactivada el grosor del trazo varía según la presión ejercida, a mayor presión mayor será el grosor del trazo.

Ver muestras

Esta opción ofrece la posibilidad de ver las muestras capturadas del trazo/s, como se puede ver en la Figura 5.18 dichas muestras se dibujan con una cruz en rojo y además se representan también las muestras capturadas con presión 0, es decir, los *pen-ups*.

Área del trazo

Con esta opción se puede calcular el ancho, largo y área del trazo/s representado/s. Con el botón *Activar* se visualizará automáticamente el área en la que está contenida el trazo/s (ver Figura 5.19), mientras que con el botón *Manual* se podrán seleccionar dos puntos cualesquiera

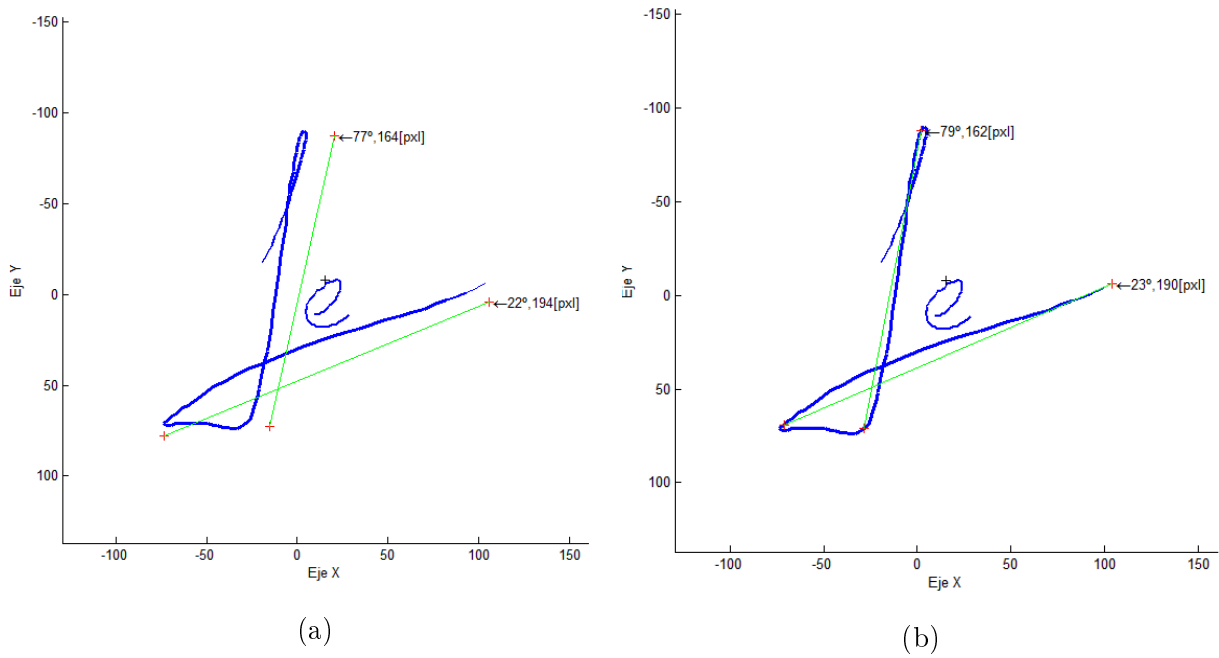


Figura 5.17: Ejemplos de cálculos de segmento, el ángulo se calcula con respecto a la horizontal. (a) Segmento libre. (b) Segmento en trayectoria.

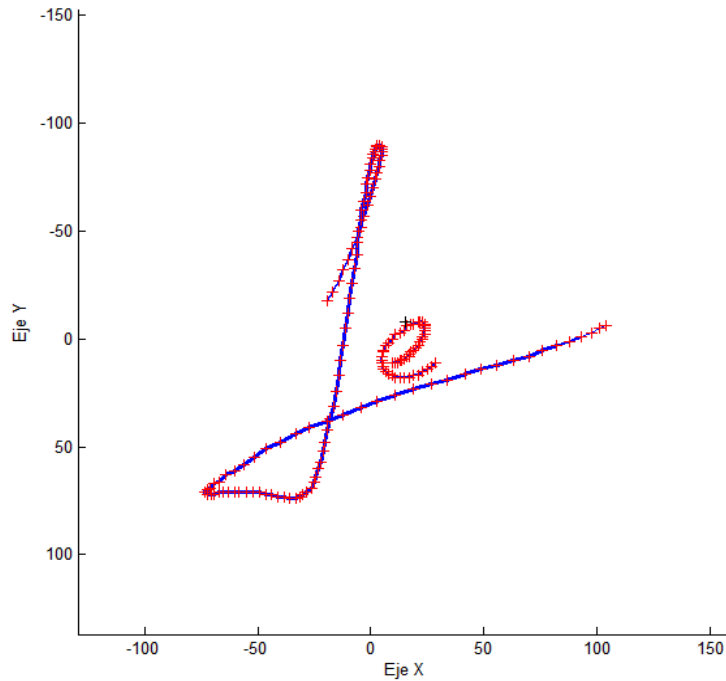


Figura 5.18: Ejemplo de visualización de las muestras de dos trazos.

para calcular las dimensiones del área entre dichos puntos. Las dimensiones vienen dadas en píxeles y pulsando nuevamente el botón *Digitalización* se darán en *cm*.

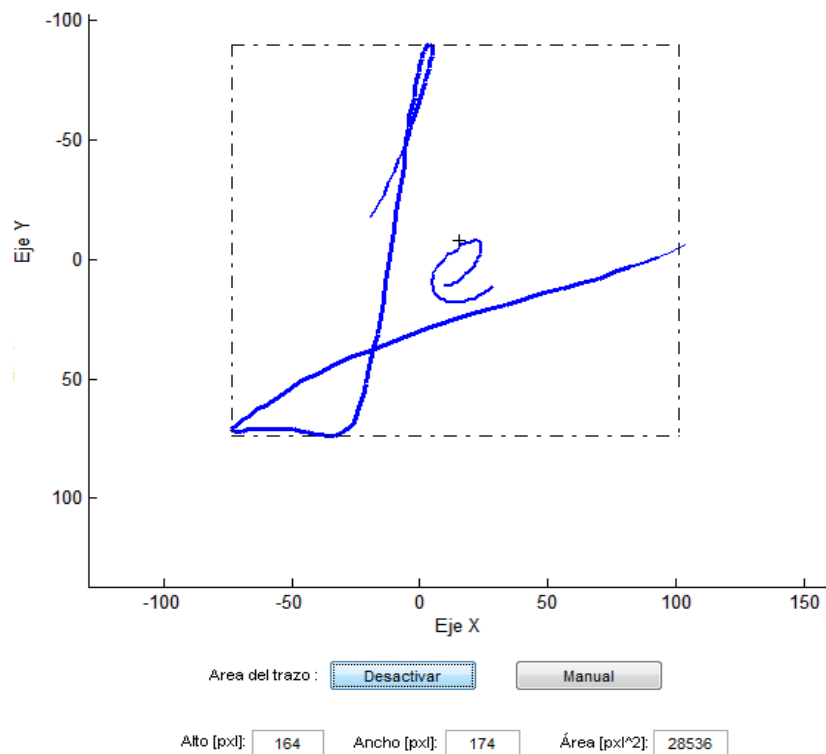


Figura 5.19: Ejemplo de cálculo del Área del trazo, la caja negra indica el área en la que está contenida.

Cálculo de características

Finalmente se añade la opción de poder calcular las cinco características descritas en el Capítulo 4 para cada trazo. Estas características permiten estimar de un modo aproximado la autenticidad de la firma bajo análisis, ya que en general su distribución para firmas auténticas e imitaciones es diferente. Como referencia de ello se han generado dichas estadísticas poblacionales sobre la base de datos e-BioFirma, lo que aparece de forma gráfica en esta tercera ventana de la aplicación (ver Figura 5.20). Las estadísticas se obtuvieron con todos los firmantes disponibles capturados con la Wacom STU-500 (frecuencia de muestreo 200 puntos/s y resolución 160 ppp). Las características son:

1. Duración de la firma en segundos.
2. Velocidad media en cm/s .
3. Aceleración media en cm/s^2 .
4. Fluidez temporal.
5. Temblor espacial.

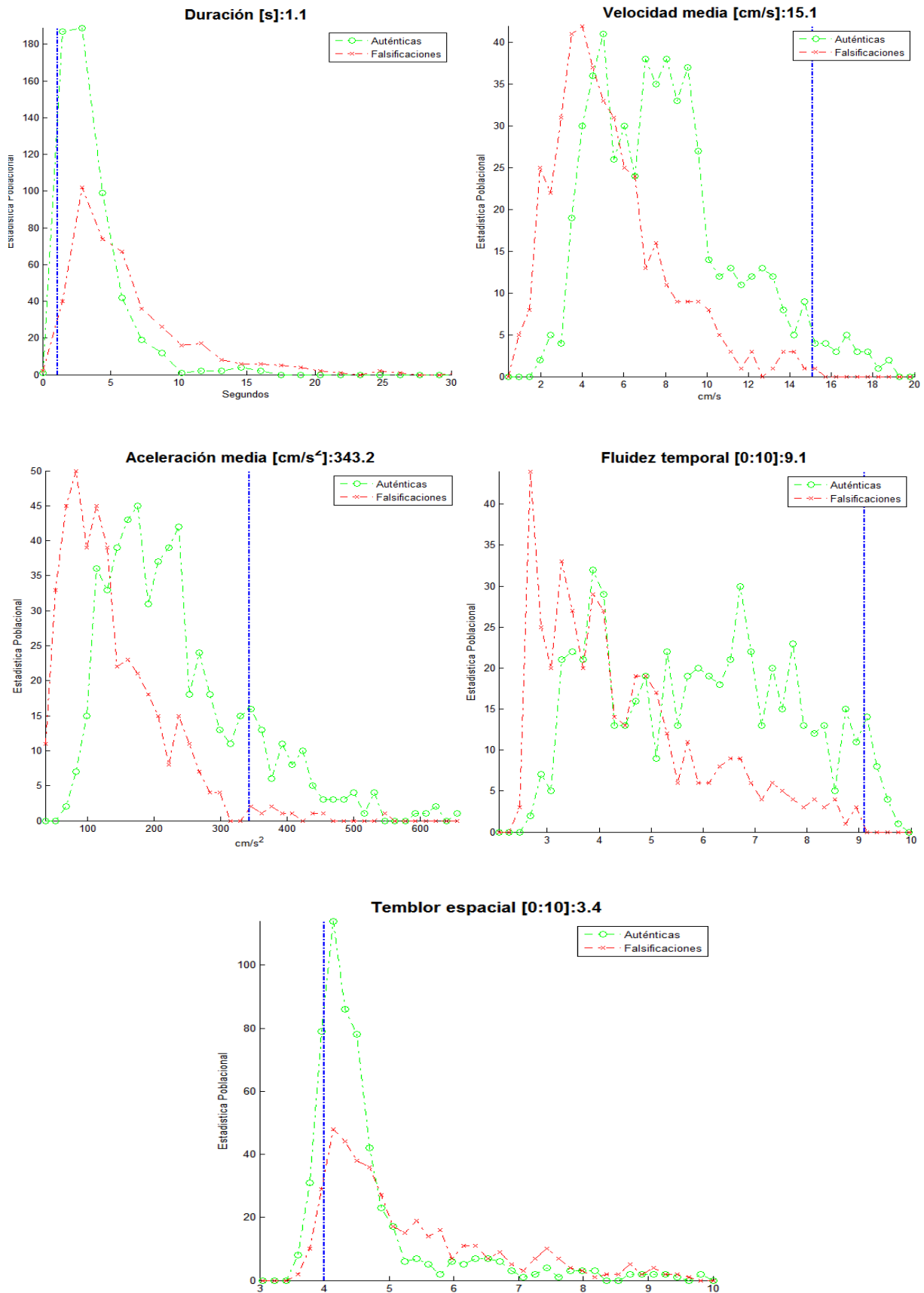


Figura 5.20: Estadísticas poblacionales de todas las características, en verde se muestran las de genuinos y en rojo la de impostores, la línea indica la puntuación obtenida de una firma.

Análisis de trazos: multi-trazo

Cuando se analizan en la última ventana dos trazos de dos firmas diferentes en vez de pertenecer a la misma, el primer trazo se dibuja en azul y el segundo en cian (Ver Figura 5.21), con el botón *Cambiar firma* se cambia la firma seleccionada y con ello los parámetros de las opciones activadas. También se añade la posibilidad en este caso de reproducir los dos trazos simultáneamente a distintas velocidades y poder desplazar píxel a píxel cualquiera de ellos.

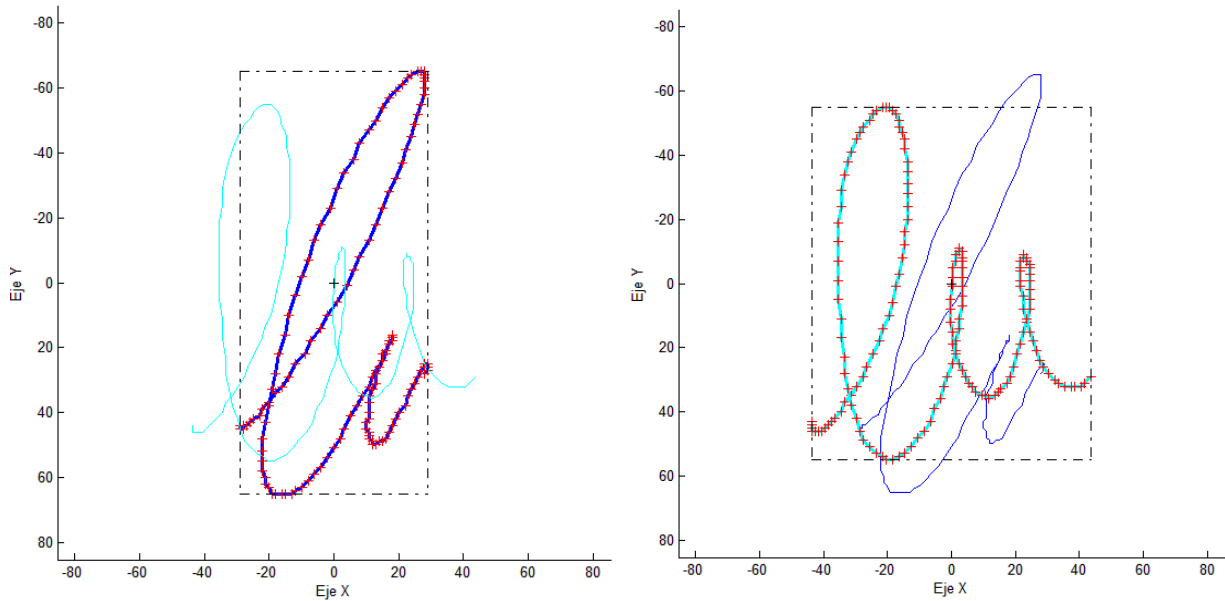


Figura 5.21: Selección de dos trazos de dos firmas diferentes, si las opciones *ver muestras* y/o *calcular área* están activadas éstas se hallan sobre la firma seleccionada.

6

Bases de datos y experimentos realizados

Por último, en el presente capítulo se describen las bases de datos empleadas para la realización del proyecto así como los experimentos y pruebas realizadas con objeto de mejorar el rendimiento de algunas de las características descritas en el Capítulo 4 implementadas en la herramienta de análisis forense.

6.1. Bases de datos

Las bases de datos de firma manuscrita se han empleado para testear las cinco características implementadas, y obtener las estadísticas poblacionales de cada una de ellas (ver Capítulo 5, sección 5.3.3), las cuales servirán de ayuda al perito forense a la hora de discernir entre firmas genuinas y falsificadas. También se han utilizado para mejorar el *EER* (ver Capítulo 2, sección 2.2.1) en algunas de ellas, concretamente en la fluidez temporal y en el temblor espacial donde sus parámetros de entrada son modificables, permitiendo experimentar con ellos.

6.1.1. Biosecure DS2

Biosecure es una base de datos que ha sido adquirida conjuntamente por once universidades europeas, participantes de *Biosecure Network of Excellence*. La universidad encargada de coordinar todo el proceso de adquisición fue la Universidad Politécnica de Madrid (UPM) a través del ATVS. La base de datos abarca tres grandes conjuntos de datos dependiendo de las condiciones en las que fueron tomadas, a saber:

- **Data Set 1 (DS1):** muestras adquiridas a través de internet sin supervisión alguna (p.ej. conectándose a una URL y siguiendo las indicaciones del monitor).
- **Data Set 2 (DS2):** muestras adquiridas en un entorno de oficina (p.ej. escritorio) usando un PC de calidad estándar y bajo supervisión humana.
- **Data Set 3 (DS3):** muestras adquiridas usando hardware portátil en dos condiciones diferentes de adquisición: en interior y exterior. En interior la adquisición se realizó en una habitación silenciosa y en exterior en un ambiente ruidoso.

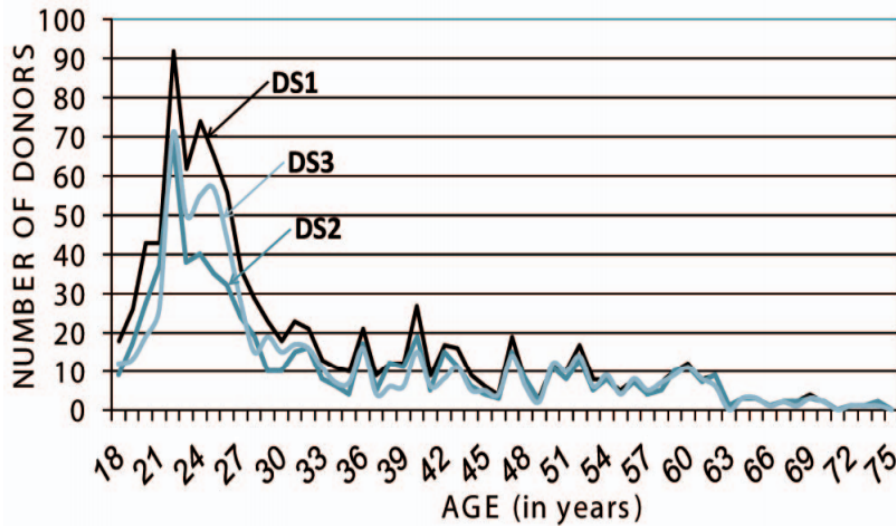


Figura 6.1: Distribución de edades para los tres conjuntos de Biosecure.

La base de datos ha sido planteada para representar a la población en la medida de lo posible usando sistemas biométricos; la base contiene muestras de voz, cara, firma, huella dactilar, iris y mano. Como resultado del proceso de adquisición (ver Figura 6.1), en torno el 40 % de los usuarios tenían edades comprendidas entre 18 y 25 años, el 20-25 % tenían edades comprendidas entre 25 y 35 años, el 20 % de los usuarios entre 35 y 50 años, y el restante 15-20 % eran mayores de 50 años. Además, la adquisición fue diseñada para que la distribución por género fuera lo más balanceada posible, con no más de un 10 % de diferencia entre los conjuntos de hombres y mujeres. También se recogió información referente a cada usuario para permitir experimentos con respecto a grupos específicos. (Ver Cuadro 6.1)

En cuanto a las muestras de firmas adquiridas, en Biosecure DS2 hay un total de 667 usuarios con dos sesiones cada uno, 25 muestras en cada sesión de las cuales 15 son genuinas y 10 falsas. Las muestras han sido capturadas bajo supervisión, además de permitir entrenamiento en los dispositivos para aquellos usuarios que lo necesitasen. Para la captura se ha usado la Wacom Intuos 3 A6, con una frecuencia de muestreo de 100 Hz. (Ver Figura 6.2)

	DS1	DS2	DS3
Distribución por edad (18-25/25-35/35-50/>50)	43 %/25 % 19 %/23 %	41 %/21 % 21 %/17 %	42 %/25 % 17 %/16 %
Sexo (masculino/femenino)	58 %/42 %	56 %/42 %	56 %/44 %
Diestro/Zurdo	94 %/6 %	94 %/6 %	94 %/6 %
Trabajan mucho con manos (Si/No)	2 %/98 %	3 %/97 %	2 %/98 %
Ayuda visual (Gafas, lentillas /No)	42 %/58 %	42 %/58 %	43 %/57 %

Cuadro 6.1: Distribuciones de los usuarios de la base de datos Biosecure.

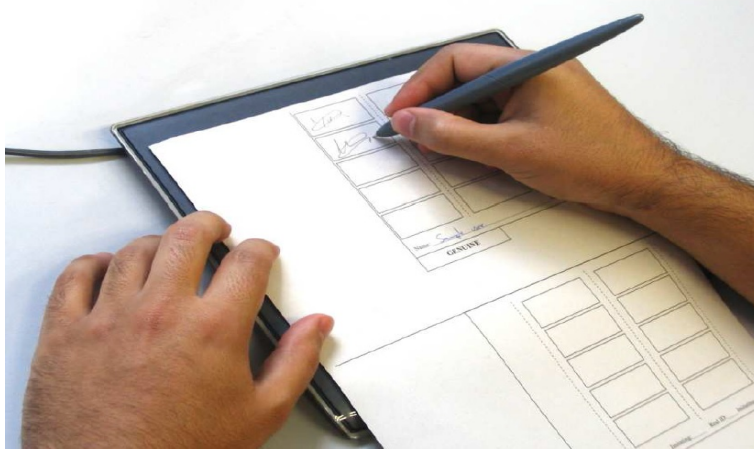


Figura 6.2: Wacom Intuos 3 A6. Las firmas fueron tomadas colocando un papel encima de la Wacom, de manera que se capturarán tanto en papel como en digital.

6.1.2. e-BioFirma

La base de datos e-BioFirma ha sido desarrollada enteramente por la Universidad Autónoma de Madrid (UAM), dirigida por el grupo ATVS. A diferencia de Biosecure, la cual es una base de datos que recoge diferentes rasgos biométricos, e-BioFirma fue concebida para capturar únicamente firma manuscrita.

Los usuarios capturados son principalmente personal docente y estudiantes, de modo que la edad promedio de la base es bastante joven (ver Figura 6.3). Cerca del 70 % de los usuarios tienen edades inferiores a los 25 años, el 20 % tienen edades comprendidas entre los 25-50 años y solo el 10 % tiene una edad superior a los 50 años.

También se ha recogido información referente a cada usuario con el fin de realizar pruebas futuras (ver Cuadro 6.2). La base de datos cuenta con 70 usuarios, con dos sesiones por usuario, y con un total de 7 muestras en cada sesión de las cuales 4 son genuinas y 3 falsas, cabe destacar que en la primera sesión las falsificaciones se hicieron observando primeramente la realización

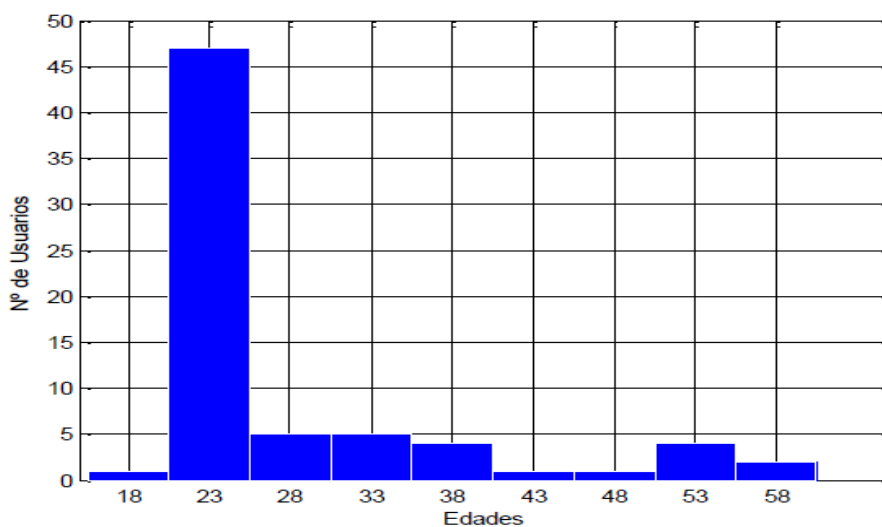


Figura 6.3: Histograma de la distribución de edades de e-BioFirma.

	e-Biofirma
Distribución por edad (18-25/25-50/>50)	70 %/20 %/10 %
Sexo (masculino/femenino)	60 %/40 %
Diestro/Zurdo	10 %/90 %
Trabajan mucho con manos (Si/No)	1 %/99 %
Ayuda visual (Gafas, lentillas /No)	35 %/65 %

Cuadro 6.2: *Distribuciones de los usuarios de la base de datos e-BioFirma.*

de la firma original en un monitor y en la segunda sesión las falsificaciones se realizaron con calco. Al igual que en la base de datos de Biosecure DS2 las muestras han sido recogidos en un ambiente de oficina (escritorio) bajo supervisión y permitiendo entrenamiento previo a aquellos usuarios que lo solicitasen.

Una de las características más significativas de la base de datos de e-BioFirma es que las muestras fueron capturadas con diversos dispositivos, con objeto de estudiar la interoperabilidad entre ellos en trabajos posteriores (ver Figura 6.4). Los tres primeros pertenecen a la familia de las WACOM; son dispositivos especializados en la captura de firma trabajando a una frecuencia de 200 Hz. Los otros dos son Tablets PC de la marca Samsung, donde además de capturar la firma con el estilete también se capturó con el dedo.

6.2. Experimentos

Para los experimentos realizados en este proyecto se ha utilizado la base de datos de Biosecure DS2, ya que al contar con un mayor número de muestras por usuario, estos arrojaban resultados más estables. Para los experimentos se ha entrenado el sistema con 5 firmas genuinas y para el testeo se han empleado 25 firmas genuinas y 20 imitaciones.

Cabe destacar que aunque para los experimentos se ha empleado la base de Biosecure DS2, a la hora de obtener las estadísticas poblacionales para la aplicación final se ha empleado la base de datos de e-BioFirma, ya que al contar con un mayor número de dispositivos los resultados obtenidos eran más robustos frente a problemas de interoperabilidad.

6.2.1. Fluidez temporal

Como ya se describió en el Capítulo 4 (sección 4.1), las firmas fluidas se definen como aquellas que presentan pocas interrupciones y por tanto la velocidad de las mismas es distinta de cero en su mayoría, rasgo propio de las firmas genuinas. Mientras que aquellas que presentan muchas interrupciones debido a que la ejecución del trazo se realizó de manera insegura y/o lenta, son más propias de las falsificaciones y presentan velocidades cercanas a cero de forma más continuada.



Figura 6.4: Dispositivos empleados en la captura en e-BioFirma: (a) Wacom STU-500 (b) Wacom STU-530 (c) Wacom DTU-1031 (d) Tablet Samsung Galaxy Note 10.1 (e) Tablet Samsung Ativ 7

De esta manera el parámetro que se puede ajustar para optimizar la *EER* de la fluidez es un umbral que mide el número de veces que la firma tiende a una velocidad cercana a cero para considerarla una falsificación.

En primer lugar se ajustó el umbral V_0 a uno, obteniendo una *EER* del 24 %, resultado de partida bastante bueno considerando la variabilidad de la firma dinámica.

A continuación se prueba con diferentes umbrales, recorriendo un rango de valores que van desde uno hasta cien con el objetivo de observar el comportamiento monótono creciente al que tiende la *EER* de la fluidez cuando el umbral es muy alto.

Como se puede ver en la Figura 6.5 el valor óptimo para el cual la fluidez presenta el *EER* mínimo es para un umbral V_0 de dos con una *EER* de 22.6 % (ver Figura 6.6), valor muy cercano al de partida debido a que éste ya estaba muy cerca del óptimo.

Finalmente cabe mencionar que estos valores de *EER* varían según la base de datos que se utilice así como el número de firmas usadas para el entrenamiento del sistema y las de testeo.

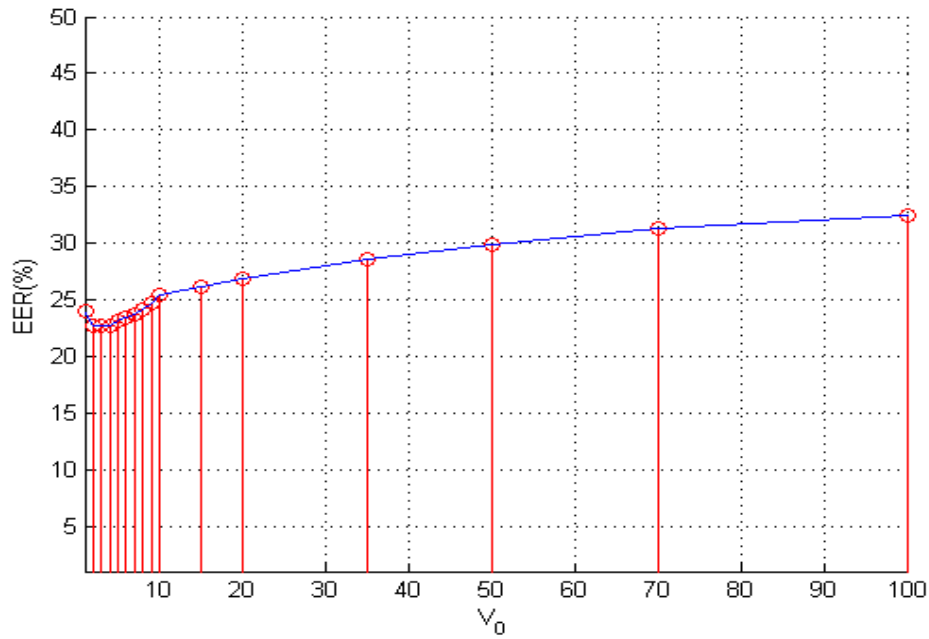


Figura 6.5: EER para diferentes valores del umbral V_0 . Los puntos en rojo son los medidos y la recta representa la interpolación del resto de valores.

De manera que para la base de datos de e-BioFirma los resultados son levemente peores (debido a la diversidad de sensores), pero el valor óptimo del umbral alcanzado sigue siendo el mismo.

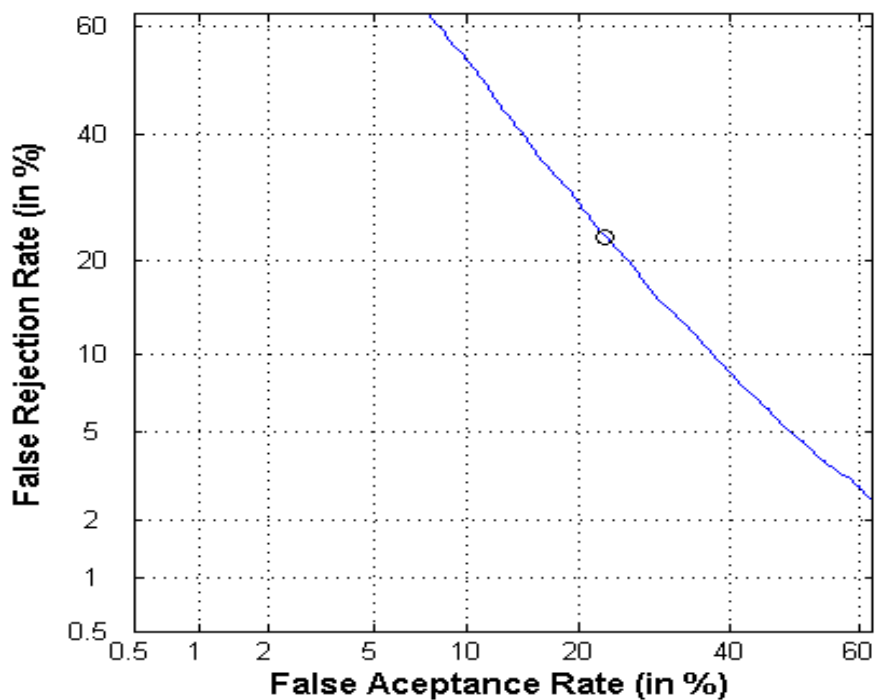


Figura 6.6: Curva DET para la fluidez con un umbral óptimo V_0 de dos.

6.2.2. Temblor espacial

Al igual que con la fluidez, el temblor ya fue descrito anteriormente (Capítulo 4) y se define como pequeñas sacudidas de pequeña amplitud pero rápidas en su ejecución, producidas por la poca seguridad a la hora de realizar el trazo propia de las falsificaciones. Para poder medir dicho temblor (o pequeñas sacudidas), se filtran las funciones espaciales X e Y con un filtro Gaussiano, cuya ecuación se presenta a continuación:

$$H_g(f) = e^{-\frac{f^2}{2\sigma^2}} \quad (6.1)$$

donde la variable σ es la desviación típica de dicho filtro, siendo éste el parámetro ajustable que da lugar a diferentes frecuencias de corte (ver Figura 6.7), con el fin de optimizar el temblor espacial.

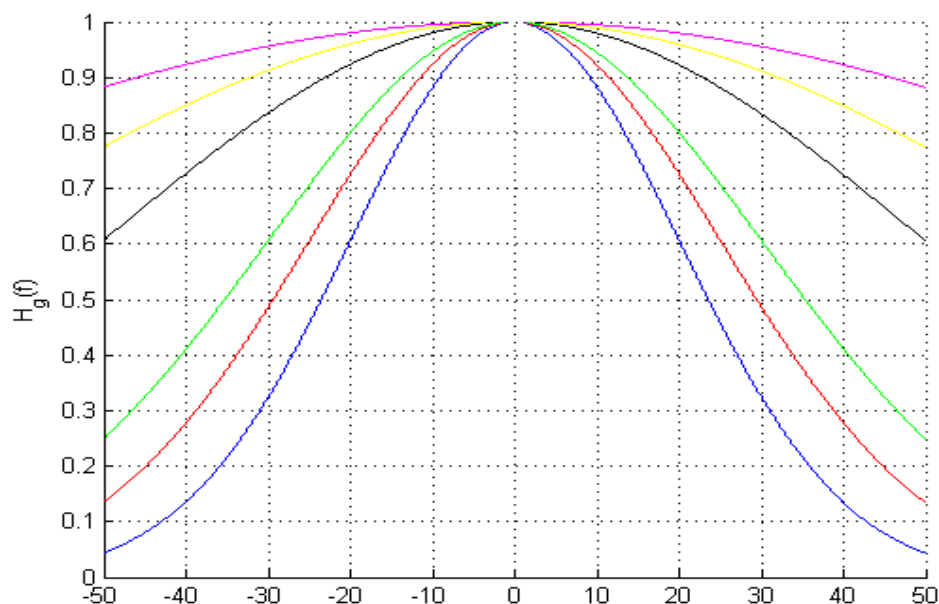


Figura 6.7: Filtro Gaussiano a diferentes frecuencias de corte, para valores de σ : 20 azul, 25 rojo, 30 verde, 50 negro, 70 amarillo y 100 magenta.

En primer lugar se parte con un filtro de $\sigma = 30$ dando una EER de 26.6 %, valor bastante bueno. A continuación se realiza un barrido de valores que van desde los 20 hasta 100 de la variable σ para observar el comportamiento del temblor según varía la frecuencia de corte del filtro.

Como se observa en la Figura 6.8, existe un mínimo para el valor de $\sigma = 25$ con una EER de 26.2 %, muy cerca del valor inicial. Al igual que ocurría con la fluidez temporal se observa un comportamiento monótonamente creciente a ambos lados de la gráfica según se aleja del valor óptimo.

A continuación se realiza un barrido más fino sobre dicho valor para hallar el mínimo con mayor precisión. A la vista de la Figura 6.9 se concluye que el valor óptimo de σ para el cual la frecuencia de corte del filtro Gaussiano ofrece la mejor EER es de 25.

Nuevamente cabe mencionar que los resultados varían ligeramente según la base de datos

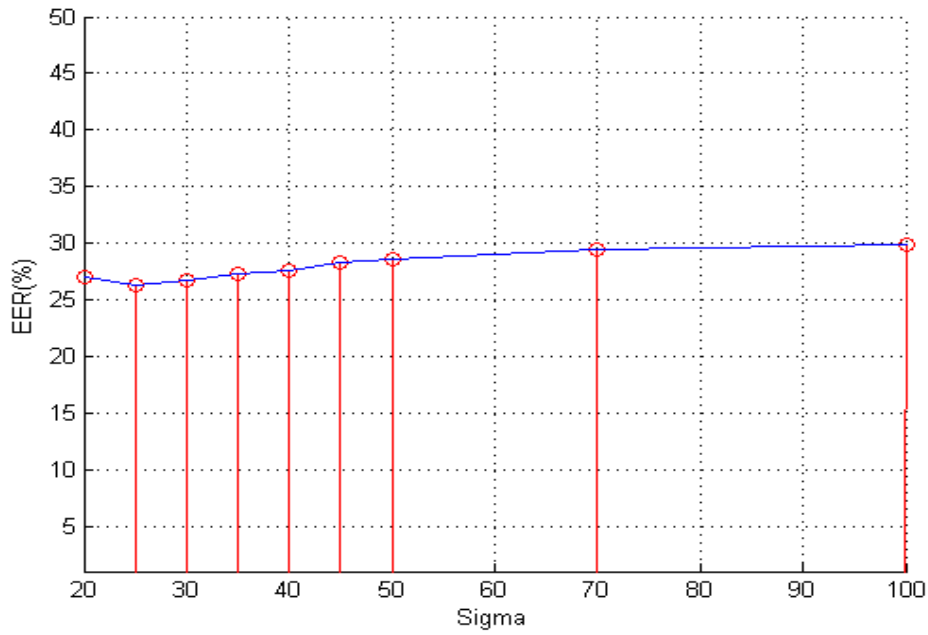


Figura 6.8: *EER para diferentes valores de σ . Los puntos en rojo son los medidos y la recta representa la interpolación del resto de valores.*

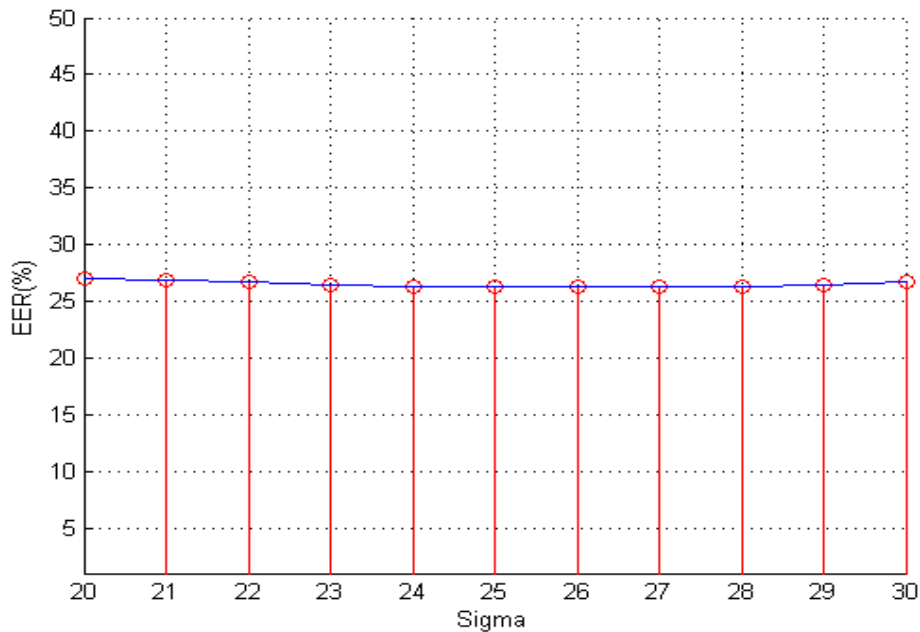


Figura 6.9: *EER para diferentes valores de σ . Los puntos en rojo son los medidos y la recta representa la interpolación del resto de valores.*

que se emplee y el número de firmas con las que se entre al sistema y las que se utilicen para el testeó, pero el valor óptimo sigue siendo el mismo.

Finalmente en la Figura 6.10 se presenta la curva DET del temblor espacial obtenida con el valor óptimo de σ .

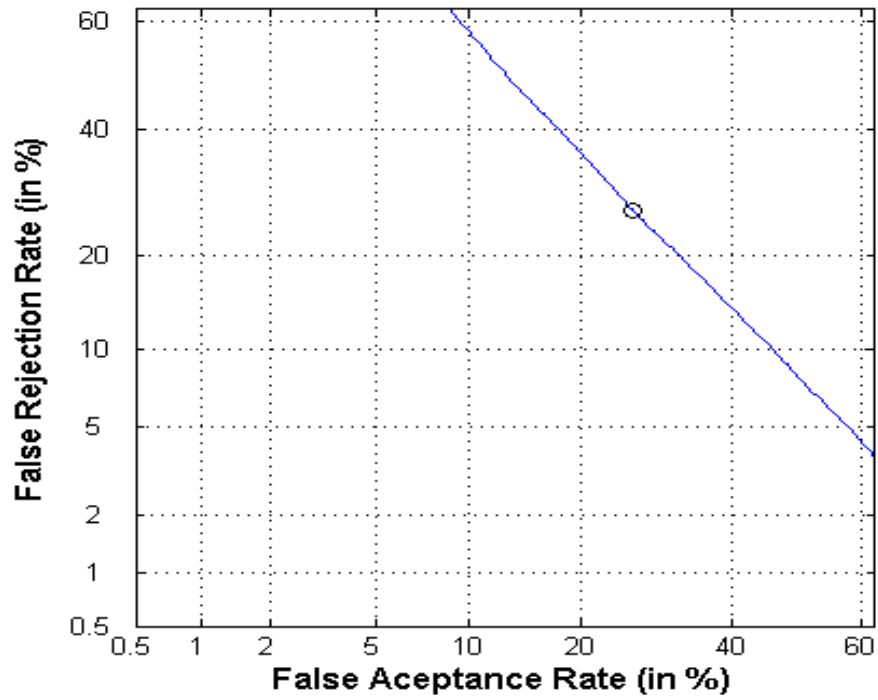


Figura 6.10: Curva DET para el temblor con una σ óptima de 25.

7

Conclusiones y trabajo futuro

7.1. Conclusiones

Hoy en día la tecnología ya forma parte importante de nuestras vidas, ésta se encuentra actualmente tanto en el ámbito personal como en el laboral o familiar. El auge que ha experimentado en estas últimas décadas ha impulsado la proliferación de una gran cantidad dispositivos táctiles, ofreciendo multitud de ventajas y un amplio abanico de posibilidades que se han ido explotando a lo largo de estos años. Una de ellas, y de las que partía este proyecto, es la firma *on-line* donde la información capturada por los dispositivos táctiles ha permitido mejorar las técnicas tradicionales de verificación de firma, en el afán de ayudar a los peritos forense en su trabajo pericial. En este proyecto se ha llevado a cabo el diseño, desarrollo e implementación de una aplicación software que recoge y procesa toda esta información adicional de la que antes no se tenía constancia, exponiéndola de una forma que facilite al experto forense su trabajo de peritaje.

Para ello en primer lugar se ha realizado una amplio estudio sobre el trabajo pericial, profundizando especialmente en el examen grafonómico; en el cual se tiene en cuenta la información estática de la firma sobre papel. También estima cierta información dinámica a partir de medidas como el grosor del trazo o la calidad de la línea, no conformándose con la apreciación estática de las formas o de sus dimensiones aisladas, sino obteniendo la homogeneidad o convalidación de las variables por la síntesis comparada de sus valores más esenciales y repetitivos y, al mismo tiempo, de los detalles más personales que destacan o se apartan de los aspectos generales de la escritura, captando lo más discriminativo o peculiar de cada grafía. Toda esta información es una de las principales características usadas para detectar falsificaciones de todo tipo.

En segundo lugar se han seleccionado aquellas rasgos de las firmas dinámicas que sean de utilidad a los peritos, de los cuales muchos de ellos son utilizados en la práctica por peritos forenses de diferentes instituciones internacionales para poder discriminar entre firmas tanto imitadas como simuladas. Se ha realizado una selección de rasgos identificativos que podrán ser medidos por la aplicación desarrollada, para algunos de dichos rasgos como son la fluidez y el temblor se han implementado algoritmos que permitan obtener automáticamente una medida de dicho rasgo. El resto de rasgos seleccionados se pueden medir manualmente mediante funcionalidades de la herramienta forense como son la posibilidad de hacer zoom tanto de las componentes X e Y en el espacio como de X, Y y presión en el tiempo, la posibilidad de hacer medidas de longi-

tudes y ángulos, superponer varias firmas para analizarlas de forma simultánea, la reproducción temporal de la ejecución del trazado, etc.

A continuación se ha desarrollado la aplicación software atendiendo a todas las funcionalidades que debía presentar la herramienta y se han explicado en detalle, así como el funcionamiento de la misma con ejemplos gráficos de su uso, analizando una a una todas las herramientas de las que dispone la aplicación para examinar cada aspecto gráfico. Finalmente se han descrito las bases de datos de firma *on-line* utilizadas para obtener las estadísticas poblacionales de algunas de las características clave para el examen pericial, y los experimentos realizados para optimizar algunos de los algoritmos, dando resultados muy similares a los de partida que utilizaba unos parámetros ya muy razonables. Esto se debe a diferentes motivos; uno de ellos puede ser que para los experimentos sólo se hizo uso de una única base de datos (Biosecure DS2), aunque siendo una base con bastante diversidad geográfica de usuarios, estaba limitada a un único dispositivo de captura.

7.2. Trabajo futuro

En cuanto al trabajo futuro, se relacionan a continuación varias líneas de investigación:

- Obtener las estadísticas poblacionales de diferentes bases de datos con el fin de que el perito que usa la herramienta pueda interpretar mejor los valores cuantitativos que ésta proporciona. También sería necesario añadir bases de datos de diferentes países y culturas, ya que el estilo de escritura y el alfabeto cambian de una región a otra.
- Desarrollar la herramienta en un lenguaje más robusto como es C/C+ o Java, ya que con el ahora utilizado se ralentiza en exceso cuando se tienen varias firmas cargadas de forma simultánea. Aunque MATLAB es un lenguaje muy robusto y completo a la hora de tratar con señales, su rendimiento se empobrece cuando se programan bucles en la estructura del código.
- La aplicación actual sólo permite analizar trazos de hasta dos firmas diferentes, sería interesante en un futuro poder analizar trazos de más firmas de forma simultánea con el fin de poder comparar con un mayor número de firmas.
- Añadir un módulo automático de comparación de firmas como el que se describe en el Capítulo 2 sección 2.3.1, para que los peritos dispongan de más herramientas con las que poder contrastar sus resultados periciales.

Bibliografía

- A. K. JAIN y ARUN ROSS, *Chapter 1: Introduction to Biometrics*, **Handbook of Biometrics**, págs. 1–22. Springer, USA, DF, 2008.
- J. FIERREZ y J. ORTEGA-GARCÍA, *Chapter 10: On-Line Signature Verification*, **Handbook of Biometrics**, págs. 189–210. Springer, USA, DF, 2008.
- M. MARTÍNEZ DÍAZ., *Dynamic Signature Verification for Portable Devices*. **Trabajo fin de Master**, EPS, Universidad Autónoma de Madrid, 2008.
- J. FIERREZ AGUILAR., *Adapted fusion schemes for multimodal biometric authentication*. **Tesis Doctoral**, Universidad Politécnica de Madrid, 2006.
- J. DE LA UZ JIMÉNEZ., **Manual de grafística**. TIRANT LO BLANCH, SPAIN, Valencia, 2008.
- S. PRABHAKAR, S. PANKANTI, AND A. K. JAIN, *Biometrics Recognition: Security and Privacy Concerns*. **IEEE Security and Privacy Magazine**, págs. 33–42. March april 2003
- A. K. JAIN, R. BOLLE, AND S. PANKANTI, *Biometrics: Personal Identification in Network Society*. **Kluwer Academic Publishers**, 1999
- A. MARTIN, G. DODDINGTON, T. KAM, M. ORDOWSKI, AND M. PRZYBOCKI, *The DET Curve in Assessment of Detection Task Performance*. **Proceedings of the Fifth European Conference on Speech Communication and Technology**, págs. 1895–1898. September 1997
- N. POH AND S. BENGIO, *An Investigation of F-ratio Client-Dependent Normalisation on Biometric Authentication Tasks*. **Proceedings of IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing**, págs. 721–724. Philadelphia, USA, March 2005
- R. PLAMONDON AND G. LORETTE, *Automatic signature verification and writer identification: The state of the art*. **Pattern recognition**, págs. 107–131. 1989
- R. PLAMONDON AND S. N. SRIHARI, *On-line and off-line handwriting recognition: A comprehensive survey*. **IEEE Trans. PAMI**, págs. 63–84. 2000
- L. LEE, T. BERGER, AND E. AVICZER, *Reliable on-line human signature verification systems*. **IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence**, págs. 643–647. 1996
- J. FIERREZ-AGUILAR, L. NANNI, J. LOPEZ-PENALBA, J. ORTEGA-GARCIA, AND D. MALTONI, *An on-line signature verification system based on fusion of local and global information*. **Proc. of IAPR Intl. Conf. on Audio- and Video-Based Biometric Person Authentication, AVBPA**, págs. 523–532. 2005
- A. KHOLMATOV AND B. YANIKOGLU, *Identity authentication using improved online signature verification method*. **Pattern Recognition Letters**, págs. 2400–2048. 2005

-
- L. NANNI AND A. LUMINI, *Ensemble of parzen window classifiers for on-line signature verification*. **Neurocomputing**, págs. 217–224. 2005
- J. RICHIARDI AND A. DRYGAJLO, *Gaussian Mixture Models for on-line signature verification*. **Proc. of ACM SIGMM Workshop on Biometric Methods and Applications, WB-MA**, págs. 115–122. 2003
- H. LEI AND V. GOVINDARAJU, *A comparative study on the consistency of features in on-line signature verification*. **Pattern Recognition Letters**, págs. 2483–2489. 2005
- H. SAKOE AND S. CHIBA, *Dynamic programming algorithm optimization for spoken word recognition*. **IEEE Trans. on Acoustics, Speech, and Signal Processing**, págs. 43–49. 1989
- L. R. RABINER, *A tutorial on Hidden Markov Models and selected applications in speech recognition*. **Proceedings of the IEEE**, págs. 257–286. 1978
- J. DOLFING, *Handwriting Recognition and Verification, a Hidden Markov Approach*. **PhD thesis**, Technical University of Eindhoven, 1998
- L. YANG, B. K. WIDJAJA, AND R. PRASAD, *Application of Hidden Markov Models for signature verification*. **Pattern Recognition**, págs. 161–170. 1995
- J. FIERREZ, D. RAMOS-CASTRO, J. ORTEGA-GARCIA, AND J. GONZALEZ-RODRIGUEZ, *HMM-based on-line signature verification: feature extraction and signature modeling*. **Pattern Recognition Letters**, págs. 2325–2334. 2007
- R. PHELPS, *A holistic approach to signature verification*. **Proc of ICPR**, pág. 1187. 1982
- F. ALONSO-FERNANDEZ, J. FIERREZ, J. ORTEGA-GARCIA, AND J. GONZALEZ-RODRIGUEZ, *A web-based secure acces system using signature verification over Tablet PC*. **IEEE Aerospace and Electronic System Mag**, pág. 3–8. 2007
- S. MUMTAZAH SYED AHMAD, L. YIM LING, R. MD ANWAR, M. AHMAD FAUDZI AND A. SHAKIL, *Analysis of the Effects and Relationship of Perceived Handwritten Signatures Size, Graphical Complexity, and Legibility with Dynamic Parameters for Forged and Genuine Samples*, **Vol 58, No. 3. Journal of Forensic Science**, May 2013.
- R. A. HUBER AND A. M. HEADRICK, *CRC Press, Handwriting Identification: Facts and Fundamentals*, 1999
- B. FOUND AND D. ROGERS, *The probative character of forensic handwriting examiners identification and elimination opinions on questioned signatures*. **Forensic Science International**, pág. 54–60, 2008.
- C. BIRD, B. FOUND, K. BALLANTYNE, AND D. ROGERS, *Forensic handwriting examiners'opinions on the process of production of disguised and simulated signatures*. **Forensic Science International**, pág. 103–107, 2010.
- B. FOUND AND D. ROGERS, *Documentation of forensic handwriting comparison and identification method: A modular approach*. **Journal of Forensic Document Examination**, pág. 1–68, 1999.
- L. ALEWIJNSE, *Forensic signature examination*. **Tutorial at Int. Workshop on Auto-mated Forensic Handwriting Analysis (AFHA)**, 2013.
- L. MICHEL, *Disguised signatures*. **Journal of the Forensic Science Society**, pág. 25–29, 1978.

- S. M. S. AHMAD, L. Y. LING, R. M. ANWAR, M. A. FAUDZI, AND A. SHAKIL, *Analysis of the effects and relationship of perceived handwritten signature's size, graphical complexity, and legibility with dynamic parameters for forged and genuine samples*. **Journal of Forensic Sciences**, pág. 724–731, 2013.
- A. JAIN, K. NANDAKUMAR, AND A. ROSS, *Score normalization in multimodal biometric systems*. **Pattern Recognition**, vol. 38, pág. 2270–2285, 2005.
- J. FIERREZ, J. ORTEGA-GARCIA, D. RAMOS AND J. GONZALEZ-RODRIGUEZ, *HMM-based on-line signature verification: feature extraction and signature modeling*, **Pattern Recognition Letters**, vol. 28, págs. 2325-2334, december 2007.
- YOUNG S ET AL., **The HTK Book**, Cambridge University Engineering Department, pág. 65. Version 3.2.1, 2002.



Presupuesto

1) Ejecución Material	
▪ Compra de ordenador personal (Software incluido)	2.000 €
▪ Material de oficina	150 €
▪ Total de ejecución material	2.150 €
2) Gastos generales	
▪ 16 % sobre Ejecución Material	344 €
3) Beneficio Industrial	
▪ 6 % sobre Ejecución Material	86 €
4) Honorarios Proyecto	
▪ 640 horas a 40 €/ hora	25.600 €
5) Material fungible	
▪ Gastos de impresión	80 €
▪ Encuadernación	180 €
6) Subtotal del presupuesto	
▪ Subtotal Presupuesto	28.440 €
7) I.V.A. aplicable	
▪ 21 % Subtotal Presupuesto	5.972,4 €
8) Total presupuesto	
▪ Total Presupuesto	34412,4 €

Madrid, Marzo 2015

El Ingeniero Jefe de Proyecto

Fdo.: Alejandro Ación Ayala

Ingeniero de Telecomunicación



Pliego de condiciones

Pliego de condiciones

Este documento contiene las condiciones legales que guiarán la realización, en este proyecto, de un *Desarrollo de herramientas de apoyo para comparación forense de firmas manuscritas*. En lo que sigue, se supondrá que el proyecto ha sido encargado por una empresa cliente a una empresa consultora con la finalidad de realizar dicho sistema. Dicha empresa ha debido desarrollar una línea de investigación con objeto de elaborar el proyecto. Esta línea de investigación, junto con el posterior desarrollo de los programas está amparada por las condiciones particulares del siguiente pliego.

Supuesto que la utilización industrial de los métodos recogidos en el presente proyecto ha sido decidida por parte de la empresa cliente o de otras, la obra a realizar se regulará por las siguientes:

Condiciones generales.

1. La modalidad de contratación será el concurso. La adjudicación se hará, por tanto, a la proposición más favorable sin atender exclusivamente al valor económico, dependiendo de las mayores garantías ofrecidas. La empresa que somete el proyecto a concurso se reserva el derecho a declararlo desierto.
2. El montaje y mecanización completa de los equipos que intervengan será realizado totalmente por la empresa licitadora.
3. En la oferta, se hará constar el precio total por el que se compromete a realizar la obra y el tanto por ciento de baja que supone este precio en relación con un importe límite si este se hubiera fijado.
4. La obra se realizará bajo la dirección técnica de un Ingeniero Superior de Telecomunicación, auxiliado por el número de Ingenieros Técnicos y Programadores que se estime preciso para el desarrollo de la misma.
5. Aparte del Ingeniero Director, el contratista tendrá derecho a contratar al resto del personal, pudiendo ceder esta prerrogativa a favor del Ingeniero Director, quien no estará obligado a aceptarla.

-
6. El contratista tiene derecho a sacar copias a su costa de los planos, pliego de condiciones y presupuestos. El Ingeniero autor del proyecto autorizará con su firma las copias solicitadas por el contratista después de confrontarlas.
 7. Se abonará al contratista la obra que realmente ejecute con sujeción al proyecto que sirvió de base para la contratación, a las modificaciones autorizadas por la superioridad o a las órdenes que con arreglo a sus facultades le hayan comunicado por escrito al Ingeniero Director de obras siempre que dicha obra se haya ajustado a los preceptos de los pliegos de condiciones, con arreglo a los cuales, se harán las modificaciones y la valoración de las diversas unidades sin que el importe total pueda exceder de los presupuestos aprobados. Por consiguiente, el número de unidades que se consignan en el proyecto o en el presupuesto, no podrá servirle de fundamento para entablar reclamaciones de ninguna clase, salvo en los casos de rescisión.
 8. Tanto en las certificaciones de obras como en la liquidación final, se abonarán los trabajos realizados por el contratista a los precios de ejecución material que figuran en el presupuesto para cada unidad de la obra.
 9. Si excepcionalmente se hubiera ejecutado algún trabajo que no se ajustase a las condiciones de la contrata pero que sin embargo es admisible a juicio del Ingeniero Director de obras, se dará conocimiento a la Dirección, proponiendo a la vez la rebaja de precios que el Ingeniero estime justa y si la Dirección resolviera aceptar la obra, quedará el contratista obligado a conformarse con la rebaja acordada.
 10. Cuando se juzgue necesario emplear materiales o ejecutar obras que no figuren en el presupuesto de la contrata, se evaluará su importe a los precios asignados a otras obras o materiales análogos si los hubiere y cuando no, se discutirán entre el Ingeniero Director y el contratista, sometiéndolos a la aprobación de la Dirección. Los nuevos precios convenidos por uno u otro procedimiento, se sujetarán siempre al establecido en el punto anterior.
 11. Cuando el contratista, con autorización del Ingeniero Director de obras, emplee materiales de calidad más elevada o de mayores dimensiones de lo estipulado en el proyecto, o sustituya una clase de fabricación por otra que tenga asignado mayor precio o ejecute con mayores dimensiones cualquier otra parte de las obras, o en general, introduzca en ellas cualquier modificación que sea beneficiosa a juicio del Ingeniero Director de obras, no tendrá derecho sin embargo, sino a lo que le correspondería si hubiera realizado la obra con estricta sujeción a lo proyectado y contratado.
 12. Las cantidades calculadas para obras accesorias, aunque figuren por partida alzada en el presupuesto final (general), no serán abonadas sino a los precios de la contrata, según las condiciones de la misma y los proyectos particulares que para ellas se formen, o en su defecto, por lo que resulte de su medición final.
 13. El contratista queda obligado a abonar al Ingeniero autor del proyecto y director de obras así como a los Ingenieros Técnicos, el importe de sus respectivos honorarios facultativos por formación del proyecto, dirección técnica y administración en su caso, con arreglo a las tarifas y honorarios vigentes.
 14. Concluida la ejecución de la obra, será reconocida por el Ingeniero Director que a tal efecto designe la empresa.
 15. La garantía definitiva será del 4 % del presupuesto y la provisional del 2 %.
 16. La forma de pago será por certificaciones mensuales de la obra ejecutada, de acuerdo con los precios del presupuesto, deducida la baja si la hubiera.

-
17. La fecha de comienzo de las obras será a partir de los 15 días naturales del replanteo oficial de las mismas y la definitiva, al año de haber ejecutado la provisional, procediéndose si no existe reclamación alguna, a la reclamación de la fianza.
 18. Si el contratista al efectuar el replanteo, observase algún error en el proyecto, deberá comunicarlo en el plazo de quince días al Ingeniero Director de obras, pues transcurrido ese plazo será responsable de la exactitud del proyecto.
 19. El contratista está obligado a designar una persona responsable que se entenderá con el Ingeniero Director de obras, o con el delegado que éste designe, para todo relacionado con ella. Al ser el Ingeniero Director de obras el que interpreta el proyecto, el contratista deberá consultarle cualquier duda que surja en su realización.
 20. Durante la realización de la obra, se girarán visitas de inspección por personal facultativo de la empresa cliente, para hacer las comprobaciones que se crean oportunas. Es obligación del contratista, la conservación de la obra ya ejecutada hasta la recepción de la misma, por lo que el deterioro parcial o total de ella, aunque sea por agentes atmosféricos u otras causas, deberá ser reparado o reconstruido por su cuenta.
 21. El contratista, deberá realizar la obra en el plazo mencionado a partir de la fecha del contrato, incurriendo en multa, por retraso de la ejecución siempre que éste no sea debido a causas de fuerza mayor. A la terminación de la obra, se hará una recepción provisional previo reconocimiento y examen por la dirección técnica, el depositario de efectos, el interventor y el jefe de servicio o un representante, estampando su conformidad el contratista.
 22. Hecha la recepción provisional, se certificará al contratista el resto de la obra, reservándose la administración el importe de los gastos de conservación de la misma hasta su recepción definitiva y la fianza durante el tiempo señalado como plazo de garantía. La recepción definitiva se hará en las mismas condiciones que la provisional, extendiéndose el acta correspondiente. El Director Técnico propondrá a la Junta Económica la devolución de la fianza al contratista de acuerdo con las condiciones económicas legales establecidas.
 23. Las tarifas para la determinación de honorarios, reguladas por orden de la Presidencia del Gobierno el 19 de Octubre de 1961, se aplicarán sobre el denominado en la actualidad “Presupuesto de Ejecución de Contrata” y anteriormente llamado “Presupuesto de Ejecución Material” que hoy designa otro concepto.

Condiciones particulares.

La empresa consultora, que ha desarrollado el presente proyecto, lo entregará a la empresa cliente bajo las condiciones generales ya formuladas, debiendo añadirse las siguientes condiciones particulares:

1. La propiedad intelectual de los procesos descritos y analizados en el presente trabajo, pertenece por entero a la empresa consultora representada por el Ingeniero Director del Proyecto.
2. La empresa consultora se reserva el derecho a la utilización total o parcial de los resultados de la investigación realizada para desarrollar el siguiente proyecto, bien para su publicación o bien para su uso en trabajos o proyectos posteriores, para la misma empresa cliente o para otra.
3. Cualquier tipo de reproducción aparte de las reseñadas en las condiciones generales, bien sea para uso particular de la empresa cliente, o para cualquier otra aplicación, contará con autorización expresa y por escrito del Ingeniero Director del Proyecto, que actuará en representación de la empresa consultora.

-
4. En la autorización se ha de hacer constar la aplicación a que se destinan sus reproducciones así como su cantidad.
 5. En todas las reproducciones se indicará su procedencia, explicitando el nombre del proyecto, nombre del Ingeniero Director y de la empresa consultora.
 6. Si el proyecto pasa la etapa de desarrollo, cualquier modificación que se realice sobre él, deberá ser notificada al Ingeniero Director del Proyecto y a criterio de éste, la empresa consultora decidirá aceptar o no la modificación propuesta.
 7. Si la modificación se acepta, la empresa consultora se hará responsable al mismo nivel que el proyecto inicial del que resulta el añadirla.
 8. Si la modificación no es aceptada, por el contrario, la empresa consultora declinará toda responsabilidad que se derive de la aplicación o influencia de la misma.
 9. Si la empresa cliente decide desarrollar industrialmente uno o varios productos en los que resulte parcial o totalmente aplicable el estudio de este proyecto, deberá comunicarlo a la empresa consultora.
 10. La empresa consultora no se responsabiliza de los efectos laterales que se puedan producir en el momento en que se utilice la herramienta objeto del presente proyecto para la realización de otras aplicaciones.
 11. La empresa consultora tendrá prioridad respecto a otras en la elaboración de los proyectos auxiliares que fuese necesario desarrollar para dicha aplicación industrial, siempre que no haga explícita renuncia a este hecho. En este caso, deberá autorizar expresamente los proyectos presentados por otros.
 12. El Ingeniero Director del presente proyecto, será el responsable de la dirección de la aplicación industrial siempre que la empresa consultora lo estime oportuno. En caso contrario, la persona designada deberá contar con la autorización del mismo, quien delegará en él las responsabilidades que ostente.

