



**UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA**

**“RECONOCIMIENTO DE HUELLAS DACTILARES USANDO LA CÁMARA DE UN
DISPOSITIVO MÓVIL”**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL ELECTRICISTA

FELIPE MANUEL VALDÉS GONZÁLEZ

**PROFESOR GUÍA:
JAVIER RUIZ DEL SOLAR SAN MARTÍN**

**MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
HÉCTOR AGUSTO ALEGRÍA
LEONARDO CAMENT RIVEROS**

SANTIAGO DE CHILE

2015

RECONOCIMIENTO DE HUELLAS DACTILARES USANDO LA CÁMARA DE UN DISPOSITIVO MÓVIL

La seguridad es un aspecto siempre presente en la vida cotidiana, ya sea como parte del ámbito laboral o de los propios hogares, en cualquier situación donde exista un flujo de información personal. Dentro de la amplia gama de sistemas basados en la determinación o confirmación de la identidad de una persona, se encuentran los que hacen uso del reconocimiento biométrico, es decir, emplean características fisiológicas, siendo una de las más utilizadas la biometría dactilar. Por otro lado, los avances de la tecnología de los dispositivos móviles, permiten que cada persona pueda disponer de una poderosa herramienta que podría ser usada para ser parte de un sistema de reconocimiento o verificación de identidad.

En este contexto, el objetivo general de este trabajo de título corresponde a estudiar, diseñar e implementar un sistema capaz de usar la cámara de un dispositivo móvil como sensor biométrico, adquiriendo imágenes de dedos y analizándolas para reconocer su huella dactilar y extraer las características necesarias para la identificación o verificación de la identidad de una persona.

Se implementa, en un *Smart Phone* marca Huawei, modelo G-Play Mini, con Sistema Operativo Android, el cual cuenta con una cámara de 13 M.P. y una capacidad de enfoque adecuada, las etapas de: adquisición de imágenes; reconocimiento de la presencia del dedo; segmentación del objeto de interés; corrección de su pose; determinación de área factible de extraer una huella dactilar; y verificación de la calidad de la captura. En el entorno Matlab se desarrollan las etapas posteriores del sistema, correspondientes a la obtención de la huella dactilar a partir de la imagen capturada y verificada previamente, y la extracción de puntos característicos o minucias. Adicionalmente, se lleva a cabo una comparación de huellas dactilares en base a la transformada SIFT. Los resultados son presentados en base a la realización de pruebas ad hoc a cada etapa y a la construcción de una colección de huellas obtenidas mediante el algoritmo implementado.

El estudio resulta positivo, pudiéndose extraer huellas dactilares y sus características a partir de imágenes de dedos. Se concluye que el análisis de color de la imagen aplicando un filtro de piel resulta efectivo para la detección del área de interés; que la valoración de la calidad de la imagen es un paso fundamental para la extracción de una huella; que la aplicación del algoritmo filtro de coherencia permite obtener la huella dactilar; y que es posible extraer características que permitan el reconocimiento o verificación de identidad. Además, se sientan las bases para un trabajo futuro con miras al desafío de mejorar cada etapa logrando un proceso más robusto ajustándose a distintas condiciones y su desarrollo por completo en un dispositivo móvil.

Agradecimientos

Verso por Agradecimiento

I

*Tantos para agradecer
en este largo camino.
Porque si hoy día culmino
este paso en el crecer,
es por quien supo creer
y así ser el causante.
Lo afirmo, en este instante,
humilde y agradecido,
desde siempre lo he sabido:
voy en hombros de gigantes.*

II

*A mi padre, que de arriba
seguro siempre me mira.
A mi madre que me inspira.
A mi hermana que me aviva.
La familia que afectiva
siempre da apoyo constante.
Empujándome adelante
desde mi primer aliento,
ayer y en todo momento
voy en hombros de gigantes.*

III

*Cómo olvidar los amigos,
que siempre ahí están,
esos que nunca se irán
y han sabido ser testigos.
A los que vivieron conmigo
en mis años de estudiante.
Con ellos; los hoy distantes;
los hermanos "rastrosinos"
y los queridos "sobrinos",
voy en hombros de gigantes.*

IV

*También a quienes formaron
mi profesional futuro,
a los que el trabajo duro
desde siempre me inculcaron.
Los que el saber regalaron,
qué labor más importante.
Con Profesores vibrantes,
del Colegio y Facultad,
a esta y a toda edad:
voy en hombros de gigantes.*

Despedida

*El homenaje refuerzo,
refuerzo el homenaje.
De esfuerzo ha sido el viaje,
el viaje ha sido de esfuerzo.
Con este sentido verso,
con este verso sentido:
ya me voy y me despido,
ya me despido y me voy.
Muy agradecido estoy,
estoy muy agradecido.*

Nota: Este agradecimiento está escrito en Décima Espinela, al estilo de la Poesía Popular, una de las manifestaciones más ricas y antiguas de nuestra tradición.

Tabla de Contenido

Capítulo 1: Introducción.....	1
1.1 Motivación.....	1
1.2 Objetivos Generales.....	2
1.3 Objetivos Específicos	2
1.4 Alcances.....	2
1.5 Estructura de la Memoria	3
Capítulo 2: Revisión Bibliográfica.....	4
2.1 Sistemas de Identificación Biométrica	4
2.2 Características Principales de una Huella Dactilar.....	9
2.3 Sistemas de Reconocimiento de Personas en base a Huellas Dactilares	14
2.3.1 Técnicas basadas en correlación.....	15
2.3.2 Técnicas basadas en la imagen	16
2.3.3 Técnicas basadas en patrones	16
2.3.4 Técnicas basadas en minucias	16
2.4 Reconocimiento de huellas dactilares usando cámaras como sensor	24
Capítulo 3: Metodología de Trabajo.....	33
3.1 Antecedentes Generales.....	33
3.2 Revisión de métodos, dificultades del problema y simplificaciones.....	33
3.2.1 Imágenes para pruebas de funcionamiento y construcción de una base de datos ...	33
3.2.2 Definición de condiciones de iluminación	34
3.2.3 Limitaciones de capacidad de enfoque y flash en el dispositivo móvil.....	35
3.2.4 Necesidad de evaluar la calidad de la imagen capturada.....	35
3.2.5 Normalización de distorsiones geométricas en la imagen.....	38
3.3 Etapas del proyecto y métodos a utilizar	40
3.3.1 Detección de la presencia de un dedo en la imagen	40
3.3.2 Captura, corrección de pose y estimación de la calidad de la imagen.....	41
3.3.3 Extracción de la huella dactilar viva.....	41
3.3.4 Extracción de minucias a partir de la huella obtenida	42
3.3.5 Comparación de huellas dactilares obtenidas	43
3.4 Estudio de factibilidad de implementación en un dispositivo móvil	43
3.5 Esquema resumen del algoritmo a implementar.....	44
Capítulo 4: Resultados y Análisis.....	45
4.1 Antecedentes generales.....	45
4.2 Detección dedo y segmentación del área de interés	46
4.3 Corrección de área y pose.....	52
4.4 Medición de calidad y captura de imagen	54
4.5 Obtención huella dactilar viva	59
4.6 Extracción de minucias.....	61
4.7 Comparación entre huellas dactilares	65
Capítulo 5: Conclusiones y Trabajo Futuro.....	69
5.1 Discusión Final	69
5.2 Trabajo Futuro	71
Bibliografía.....	72
Anexos	78
Anexo A: Filtro de Coherencia.....	78
Anexo B: Detalle de resultados para la extracción de minucias.....	80

Índice de Tablas

Tabla 1. Propiedades de un pixel según su valor de coeficiente CN.....	21
Tabla 2: Resumen de resultados obtenidos para la medición de calidad en 30 imágenes de dedos obtenidas mediante el sistema implementado.	58
Tabla 3: Resumen de resultados para las 120 imágenes de huellas dactilares obtenidas a partir de fotos de dedos.....	63
Tabla 4: Resultados de comparación de huellas dactilares en procedimiento 1 versus el resto usando <i>matching</i> de características obtenidas con SIFT.	67
Tabla 5: Resultados de comparación de huellas dactilares en procedimiento 1 versus el resto usando <i>matching</i> de características obtenidas con SIFT seguido de RANSAC.....	67
Tabla 6: Detalle de resultados para la extracción de minucias a partir de las huellas obtenidas. Parte 1.....	80
Tabla 7: Detalle de resultados para la extracción de minucias a partir de las huellas obtenidas. Parte 2.....	81
Tabla 8: Detalle de resultados para la extracción de minucias a partir de las huellas obtenidas. Parte 3.....	82
Tabla 9: Detalle de resultados para la extracción de minucias a partir de las huellas obtenidas. Parte 4.....	83

Índice de Figuras

Figura 1. Diagrama de bloques de las tareas de enrolamiento, verificación e identificación en un sistema biométrico.....	6
Figura 2. Ejemplos de características biométricas.....	9
Figura 3: Crestas y valles de una huella dactilar.	10
Figura 4: Zonas o regiones de una huella dactilar.	10
Figura 5: Minucias de bifurcación y término en una muestra de huella dactilar.....	11
Figura 6. Algunos tipos de minucias.	11
Figura 7: Distintos tipos de singularidades en una huella dactilar.	12
Figura 8. Los cinco tipos de clases de huellas dactilares más utilizados.....	13
Figura 9. Esquema del funcionamiento de diversos tipos de sensores	15
Figura 10. Arquitectura general de los métodos de reconocimiento de identidad en base al análisis de puntos característicos o minucias.	17
Figura 11. Ejemplo de la aplicación de la técnica de segmentación..	18
Figura 12. Clasificación de Técnicas de Extracción de Minucias.	18
Figura 13. Ejemplo binarización de una huella dactilar.	19
Figura 14. Localización de minucias en un contorno representado como una cadena.	20
Figura 15. Diagrama de bloques del método de extracción de minucias en base a la codificación RLC	20
Figura 16. Procesamiento estándar de una huella dactilar.....	21
Figura 17. Ejemplo de adelgazamiento de huella dactilar binarizada usando operador morfológico.	22
Figura 18. Seguimiento de una línea correspondiente a una cresta de una huella dactilar.	23
Figura 19: Imágenes de distinta calidad para la extracción de huella dactilar y la medida de ensidad de borde.	26
Figura 20: Procedimiento paso a paso de la determinación de la región que contiene al dedo o Región de interés	27
Figura 21: Puntos y distancias utilizadas para calcular el ángulo de corrección de las imágenes que contienen dedos.....	27
Figura 22: Curvas DET con diferentes parámetros de comparación con una tolerancia de 45° para el ángulo de orientación entre minucias de referencia y prueba.	29
Figura 23: A ITiempo promedio para el proceso de captura en enrolamiento y autenticación para dos dispositivos móviles, y tiempos promedio de cada etapa de procesamiento para los mismos dos dispositivos.	30
Figura 24: Distintas etapas del procesamiento de la imagen que contiene la huella dactilada	31
Figura 25: Imagen conformante de la Base de Datos Inicial para valorar los métodos a emplear junto con un acercamiento a la misma imagen.....	34
Figura 26: Tres imágenes con distinto valor de GCF.	38
Figura 27: Esquema resumen de las etapas del algoritmo a implementar en el desarrollo del proyecto.	44
Figura 28: Detección del dedo frente a la cámara mediante detección de piel con valores umbral 0.1, 0.2 y 0.3.	47
Figura 29: Detección del dedo frente a la cámara mediante detección de piel con valores umbral 0.4, 0.5 y 0.6..	48
Figura 30: Detección del dedo frente a la cámara mediante detección de piel con valores umbral 0.7, 0.8 y 0.9..	49

Figura 31: Ejemplos de detección del dedo en la imagen, segmentación mediante el enmascaramiento con el resultado del detector, recuadro mostrado al usuario como referencia y enfoque del dedo encontrado.....	50
Figura 32: Acercamiento de la figura anterior, imagen 1d, donde se observa el detalle logrado al capturar la imagen con la presencia de un dedo.	51
Figura 33: Esquema general de la búsqueda de los límites del dedo en la imagen segmentada..	52
Figura 34: Etapa de corrección de área y pose del dedo encontrado en la imagen..	53
Figura 35: Etapa de determinación de la calidad de la imagen midiendo su nitidez. Caso en que la imagen no resulta lo suficientemente clara.....	55
Figura 36: Etapa de determinación de la calidad de la imagen midiendo su nitidez. Caso en que la imagen sí resulta lo suficientemente clara.	55
Figura 37: Serie de imágenes que permiten calcular el Factor Global de Contraste (GCF).	56
Figura 38: Ejemplos de valoración de calidad de la imagen en forma visual..	57
Figura 39: Índices indicadores de la calidad de la imagen vistos en forma gráfica.	59
Figura 40: Huella dactilar obtenida a partir de una foto de un dedo.	60
Figura 41: Minucias extraídas de la huella dactilar viva..	61
Figura 42: Extracción de minucias de una huella dactilar considerando la región exterior y sin hacerlo..	62
Figura 43: Ejemplos de extracción de minucias.....	64
Figura 44: Matching de huellas dactilares.....	66
Figura 45: Curva ROC comparación usando el algoritmo SIFT.....	68
Figura 46: Curva ROC comparación usando el algoritmo SIFT seguido de RANSAC	68

Capítulo 1: Introducción

1.1 Motivación

Hoy en día la seguridad es un aspecto que forma parte de la vida cotidiana, ya sea como parte del mundo laboral o en los propios hogares. La necesidad de contar con un ambiente confiable se encuentra presente en cualquier situación de la vida donde exista un flujo de información personal.

En la actualidad, existe una amplia variedad de sistemas basados en la determinación o confirmación de manera confiable y robusta de la identidad de la persona que requiere sus servicios. Es en este contexto donde surge el reconocimiento biométrico o biometría, que corresponde al reconocimiento de personas a partir de sus características fisiológicas y/o de comportamiento, siendo la biometría dactilar una de las más empleadas, debido a su característica única para cada persona y fácil acceso.

Los avances tecnológicos en el área de la biometría dactilar permiten su utilización en diversos entornos, adaptándose así a las necesidades de cada momento y de cada persona. Es así que los sistemas de identificación y verificación de identidad basados en huellas dactilares son empleados desde notarías y bancos hasta por las personas en sus propias casas mediante dispositivos móviles que cuentan con los sensores adecuados. Sus usos incluyen el control de acceso a oficinas, el control de acceso a entornos informáticos, la firma digital de documentos, etc., cualquier situación donde se requiera el reconocimiento de la identidad de una persona o la verificación de la misma.

Para la aplicación de la biometría dactilar, hoy en día se necesita un sensor especializado que permita obtener la huella dactilar y a partir de esta extraer las características necesarias para la identificación.

Los continuos avances tecnológicos de los dispositivos móviles han abierto nuevas posibilidades para la biometría dactilar, pues es posible encontrar dispositivos que incluyen sensores para la adquisición de huellas. El problema surge cuando el dispositivo no cuenta con este tipo de sensores especializados incorporados, caso en que es necesario conectar uno en forma externa para realizar el proceso de adquisición.

Por otro lado, una vez realizado el proceso de adquisición de la huella dactilar, se debe realizar el procesamiento y análisis de la misma, ya sea en el mismo dispositivo o en algún servidor enviando los datos mediante una conexión a internet.

Es en este contexto en el que se desarrolla el presente proyecto de título, en el cual se analiza el proceso de adquisición mediante la utilización de la cámara digital del dispositivo móvil, que para el caso podría llamarse un “sensor alternativo”. Y también el proceso de análisis de la huella obtenida, determinando si para esto es posible utilizar el mismo dispositivo o es necesario un procesamiento externo.

1.2 Objetivos Generales

El objetivo general de este trabajo de título es estudiar, diseñar e implementar un sistema capaz de llevar a cabo los procesos de adquisición y análisis de huella dactilar mediante el uso de la cámara de un dispositivo móvil, ya sea un *Smart Phone* o un *Tablet*. Esto para dispositivos que usen Android como Sistema Operativo.

1.3 Objetivos Específicos

Dentro de los objetivos específicos que persigue la resolución de este trabajo de título, se listan:

- Capturar la huella mediante el uso de la cámara de un dispositivo móvil, ya sea un *Smart Phone* o un *Tablet*.
- Identificar la presencia de un dedo dentro de una imagen en movimiento captada mediante la cámara de un dispositivo móvil.
- Medir la calidad de la imagen obtenida para establecer si resulta factible para la adquisición de una huella dactilar.
- Realizar una segmentación del dedo con respecto al fondo de la imagen para discriminar cuáles son las zonas factibles de contener una posible huella dactilar y cuáles no.
- Estudiar la posibilidad de realizar el procesamiento de la huella dactilar en el mismo dispositivo móvil o la necesidad de que este se haga en otro dispositivo, por ejemplo, un servidor.
- Mejorar la imagen mediante el uso de técnicas de procesamiento de imágenes, extrayendo la huella dactilar lista para ser analizada.
- Extraer las características necesarias para la identificación usando huellas dactilares. Estas corresponden a la posición, orientación y tipo para los distintos puntos característicos (llamados minucias) presentes en la huella.
- Efectuar una comparación de huellas dactilares obtenidas con el dispositivo móvil para verificar la identidad de una persona mediante algún método alternativo al uso de minucias.

1.4 Alcances

En este documento se describe el estudio de la posibilidad de expandir el uso de las cámaras digitales que forman parte de los dispositivos móviles como sensor para obtener una huella dactilar a partir de una imagen.

En particular el análisis efectuado no busca ser un estudio de factibilidad que permita crear una lista de dispositivos habilitados para este uso considerando la amplia gama de aparatos y características de hardware y software disponibles en el mercado. Sino más bien, ciñéndose al uso de un dispositivo en particular, representa un estudio de la posibilidad de lograr los resultados

esperados, vale decir, obtener una huella dactilar a partir de una imagen y realizar su análisis. No obstante, las características del dispositivo acotan las posibilidades disponibles, puesto que no todos poseen una cámara que permita obtener fotos de la calidad esperada, por lo que, como se verá un primer y preliminar paso es encontrar un dispositivo que permita desarrollar el trabajo en cuestión.

El interés de este trabajo es comprobar la factibilidad de poder lograr la identificación de un usuario a partir de una fotografía de su dedo.

1.5 Estructura de la Memoria

Este documento se organiza conforme se indica en los párrafos sucesivos:

El capítulo 2 sienta las bases teóricas para este trabajo mediante una revisión bibliográfica. En él se entregan estos conceptos desde un campo general hacia el caso particular de las huellas dactilares. De esta forma, en una primera parte se entrega el concepto de biometría y se indican ventajas y desventajas de las medidas biométricas más utilizadas, junto con los requisitos que estas deben cumplir para ser utilizadas como parte de un sistema biométrico. Posteriormente se presentan los conceptos básicos involucrados en la biometría dactilar como lo son los distintos elementos que las conforman. Luego se indican diferentes métodos usados para la verificación de identidades en base al análisis de huellas dactilares indicando las distintas formas de adquisición de la huella y clasificándolos según su objeto de estudio. Por último se realiza una reseña de las distintas formas de procesamiento de huellas dactilares a partir del uso de sus puntos característicos o minucias.

El capítulo 3 presenta la metodología utilizada para el desarrollo del proyecto. En primer lugar se describen las dificultades propias del problema, las limitaciones con respecto al hardware utilizado y las simplificaciones necesarias para su resolución, indicando también los pasos que permitirán normalizar las imágenes respecto a la ubicación de la huella a ser extraída. En este apartado también se indican las etapas en las que se subdivide el proyecto, señalando los métodos que permiten su realización.

El capítulo 4 da cuenta de la implementación de los diferentes métodos definidos y sus resultados a partir de los lineamientos entregados en el capítulo anterior, es decir, siguiendo las etapas de trabajo y los métodos respectivos definidos en el capítulo 3.

El capítulo 5 cierra el documento y corresponde a las conclusiones. Junto con evaluar el cumplimiento de los objetivos dentro de los límites demarcados por los alcances del trabajo, se plantea algunos desafíos para trabajo futuro.

Capítulo 2: Revisión Bibliográfica

El presente capítulo tiene por objetivo ubicar al lector en el entorno en el cual se desarrolla este trabajo de título, entregando los antecedentes previos y necesarios para su contextualización.

En la sección 2.1 se presenta el concepto de biometría aplicada al reconocimiento de personas y se realiza un resumen general de las características empleadas con este fin, indicando los aspectos necesarios que se deben satisfacer para que estas califiquen como parte de un sistema biométrico. Posteriormente, se indica, brevemente, las ventajas y desventajas de las medidas biométricas más utilizadas.

El apartado 2.2 presenta los conceptos básicos involucrados en la biometría dactilar, definiendo los elementos que caracterizan a una huella, las agrupaciones particulares de las curvas conformantes y también la clasificación de las huellas dactilares en función de la presencia de estas.

La sección 2.3 resume los métodos empleados para verificar la identidad de las personas en base al análisis de las huellas dactilares, comenzando por las distintas formas de adquisición de la imagen a ser procesada. Se realiza una clasificación de los métodos existentes en función su objeto de estudio y, posteriormente, se hace una reseña de las diferentes técnicas para procesar huellas dactilares a partir de los puntos característicos o minucias.

Finalmente, se indica la relevancia del desarrollo del presente proyecto de título.

2.1 Sistemas de Identificación Biométrica

En la actualidad, existe una amplia variedad de sistemas basados en la determinación o confirmación de manera confiable y robusta de la identidad de la persona que requiere sus servicios. Reconocimiento biométrico o, simplemente, biometría, se refiere a la identificación automática de personas mediante sus características fisiológicas y/o de comportamiento [1]. En base a su uso es posible confirmar o establecer la identidad de un individuo a través de “quién es”, más que por “lo que posee” (por ejemplo, una tarjeta de identificación) o “lo que recuerda” (por ejemplo, una contraseña).

Tal como se señala en [2] y [3], existe una serie de características que pueden usarse en un sistema biométrico. Para que estas califiquen como medidas factibles de aplicar en biometría, deben satisfacer las siguientes propiedades:

- Universalidad: cada persona debería tener la característica.
- Diferenciación: dos personas cualesquiera deben ser lo suficientemente distintas en términos de la característica en cuestión.
- Permanencia: la característica debería ser suficientemente invariante en el tiempo.
- Cuantificabilidad: la característica se debe poder medir cuantitativamente.

Además, en un sistema biométrico hay varias características que deberían ser consideradas, tales como:

- Rendimiento: se refiere a la factibilidad de los recursos requeridos para efectuar un reconocimiento preciso y rápido, así como también a los factores operacionales y ambientales que afectan la precisión y velocidad.
- Aceptación: corresponde a la actitud de las personas hacia la utilización del sistema particular. Su disponibilidad hacia la extracción de la característica biométrica utilizada.
- Vulnerabilidad: refleja qué tan fácilmente el sistema puede ser burlado usando métodos fraudulentos.

Es así como un sistema biométrico práctico debería cumplir con una precisión específica de reconocimiento, velocidad de ejecución, contar con los recursos necesarios para su buen funcionamiento, no causar rechazo en los usuarios y ser suficientemente robusto al fraude.

Un sistema biométrico es esencialmente un sistema de reconocimiento de patrones que opera adquiriendo datos de un individuo de los que se extrae un set de características que se comparan con un modelo o una base de datos [2]. Dependiendo del contexto de la aplicación, un sistema biométrico puede actuar para realizar verificación o identificación [4] [5]:

- Para la verificación, el sistema actúa validando la identidad de una persona comparando los datos capturados con su propio *template* biométrico conocido previamente, por ejemplo, mediante algún documento de identificación. La verificación de identidad es, normalmente, utilizada para reconocimiento positivo, donde el objetivo es prevenir que varias personas usen la misma identidad.
- Cuando se trata de identificación, el sistema actúa buscando las características del individuo entre las contenidas para un número determinado de usuarios en una base de datos, realizando múltiples comparaciones para establecer la identidad del individuo. Se trata de un componente crítico en aplicaciones de reconocimiento negativo, cuyo objetivo es prevenir que una sola persona utilice múltiples identidades. Esta línea de funcionamiento también puede ser empleada para realizar reconocimiento positivo.

En la Figura 1 se observan diagramas de bloques que resumen el funcionamiento de los sistemas de verificación e identificación, los cuales poseen como elemento común el enrolamiento de los usuarios, que también se presenta en módulos en la misma figura.

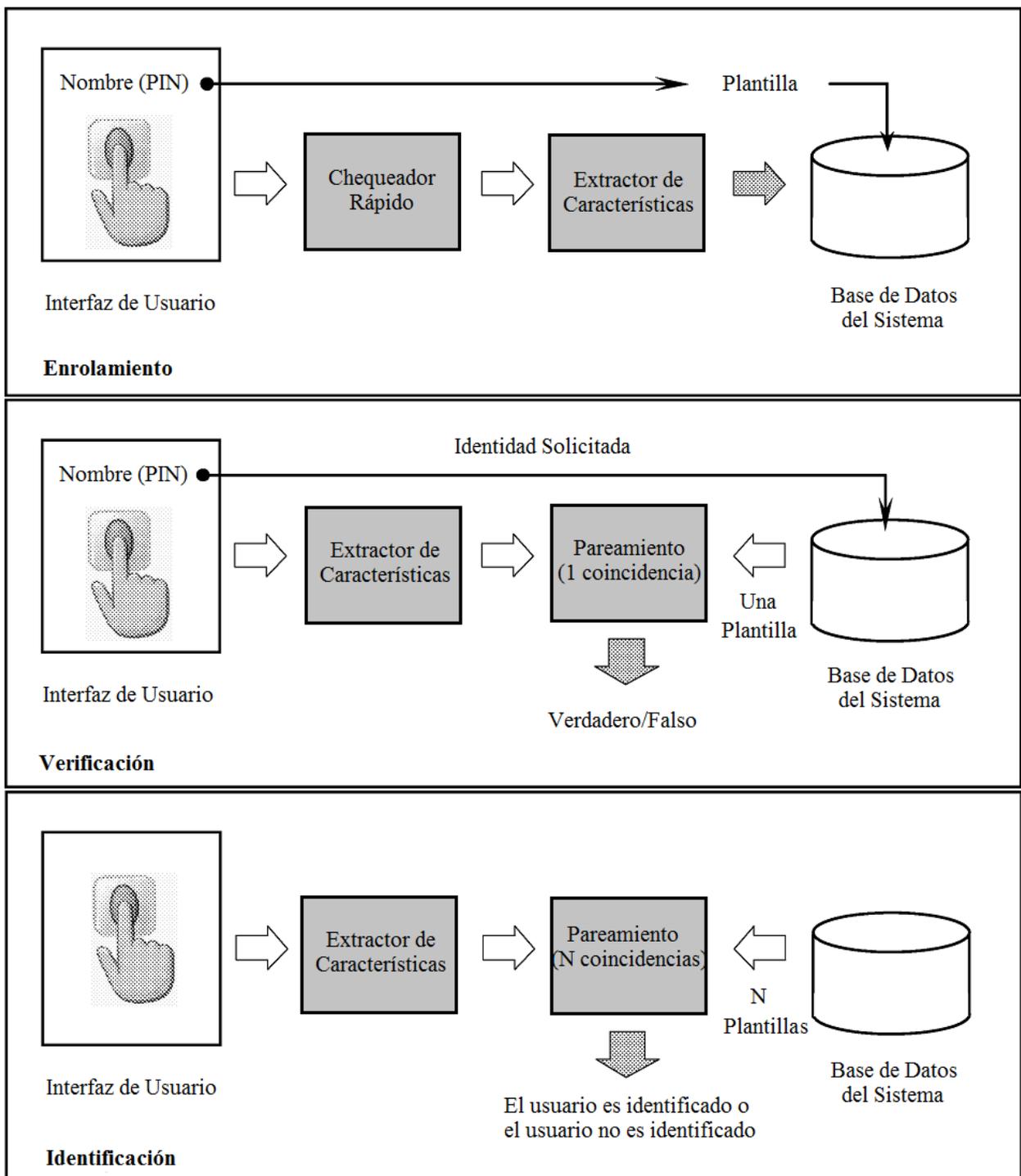


Figura 1. Diagrama de bloques de las tareas de enrolamiento, verificación e identificación en un sistema biométrico (de arriba hacia abajo). En el proceso de enrolamiento, común a ambas tareas de reconocimiento, se identifican cuatro etapas: sentido, determinación de la calidad de los datos tomados, extracción de características e ingreso a la base de datos; mientras que para la verificación e identificación, también se distinguen cuatro etapas: sentido, extracción de características, *matching* e interacción con la base de datos. Imagen tomada de [2].

Como se indica en [2] y [6], existe una serie de características biométricas que son estudiadas en la actualidad y son usadas en varias aplicaciones, cada una con ventajas y desventajas

dependiendo de la aplicación en que se empleen. Por esto mismo, no existe un sistema biométrico “óptimo”. Algunos ejemplos de características biométricas utilizadas son las siguientes y se pueden observar en la Figura 2.

- DNA: El ácido desoxirribonucleico es un código unidimensional único para cada individuo (salvo para los mellizos idénticos, que poseen el mismo DNA). Se usa mayoritariamente en el contexto de aplicaciones forenses para el reconocimiento de personas. Su uso se ve limitado debido a que es fácil contaminar o robar una muestra, no se puede realizar en tiempo real y por cuestiones de privacidad [7].
- Oreja: Se ha sugerido que la forma de la oreja y la estructura del tejido cartilaginoso del pabellón de la oreja son distintivas. Esta técnica biométrica se basa en el *matching* de la distancia de puntos salientes del pabellón desde un punto de referencia de la oreja [8].
- Rostro: Se trata de un método no invasivo y uno de los más utilizados, desde aplicaciones estáticas hasta dinámicas en ambientes no controlados. Se suelen basar en la localización y forma de atributos faciales como ojos, cejas, nariz, labios y mentón, y sus relaciones espaciales, o en el análisis global de la imagen del rostro como una combinación de rostros canónicos [9] [10]. Estos sistemas presentan dificultades al reconocer rostros desde imágenes capturadas con vistas distintas y bajo diferentes condiciones de iluminación, lo cual debe ser compensado para influir de menor medida en el rendimiento de los sistemas de reconocimiento [11].
- Termografía infrarroja facial, de la mano y de las venas de la mano: El patrón de calor irradiado por el cuerpo humano es una característica individual y se puede capturar mediante una cámara infrarroja. Este tipo de sistemas son no invasivos y no requieren contacto directo con la persona, pero la adquisición de la imagen es cambiante en ambientes no controlados en que otras fuentes de calor se encuentran cerca de los cuerpos. Otra aplicación de las imágenes infrarrojas se utiliza para determinar la estructura de las venas de la mano a partir de la parte trasera de un puño cerrado [12] [13]. Un factor que impide el uso masivo de estas técnicas biométricas es el costo elevado de los sensores térmicos.
- Modo de andar: Es una compleja medida biométrica espacio-temporal. A simple vista, no parece ser muy distintiva, pero es suficientemente discriminatoria para aplicaciones de baja seguridad. Se trata de una medida conductual y puede no ser invariante, especialmente en el largo plazo. Requiere de secuencias de video por lo que un manejo intensivo de datos y una alta complejidad computacional. En [14] muestra un método desarrollado con estos fines.
- Geometría de manos y dedos: Sistemas basados en medidas tomadas de la mano, incluyendo su forma, tamaño de la palma, y largo y ancho de los dedos [15]. Se trata de una técnica simple, relativamente fácil de usar y poco costosa, donde factores ambientales como la humedad del clima o anomalías individuales como la sequedad de la piel no parecen tener efectos negativos sobre la precisión de la verificación. El nivel de diferenciación de esta característica hace que no se pueda utilizar en aplicaciones que involucran poblaciones grandes y además presenta variaciones en el proceso de crecimiento de los niños. También, el uso de accesorios como anillos y la presencia de

deterioros como la artritis presentan dificultades extra a la hora de obtener características a partir de esta medida biométrica. Hay sistemas de verificación basados sólo en algunos dedos en vez de la mano completa.

- Iris: Es la región anular del ojo limitada por la pupila y la esclera. Su textura compleja, formada durante el desarrollo fetal, resulta muy distintiva y, por ende, útil para el reconocimiento de personas, pues no hay dos que posean idéntico iris. Además, es extremadamente difícil modificarlo quirúrgicamente y muy fácil detectar iris artificiales. Su desventaja radica en que estos sistemas requieren un alto grado de participación del usuario [16] [17].
- Digitación en teclados: Hipotéticamente cada persona tipea en un teclado de una forma distintiva. Se trata de una medida conductual quizás no única para cada persona, pero sí ofrece información suficientemente distintiva para permitir la verificación de la identidad [18].
- Aroma: Es sabido que cada objeto exuda un olor característico de su composición química y que podría ser usado para distinguir varios objetos. Así mismo, el aroma del cuerpo humano podría tener componentes que hacen distintivo a un individuo particular [19]. No es claro si estos componentes aromáticos podrían ser detectados a pesar de olores artificiales y variando la composición química del ambiente que rodea al cuerpo.
- Huella de la mano: La palma de la mano contiene patrones de valles y crestas parecidos a las huellas dactilares, pero el área de la huella de la mano es mucho mayor que la del dedo, por lo que es esperable que esta característica sea aún más distintiva. La desventaja es que por esto mismo, los sensores de captura deben ser más grandes y, por lo mismo, más costosos. Sin embargo, esta huella contiene características como líneas principales y arrugas que pueden ser capturadas con un escáner de menor resolución. Si se usan sensores de alta resolución, tanto las características principales como aquellas que son más detalladas podrían ser usadas para obtener un sistema biométrico más robusto [20].
- Escáner retinal: La vasculatura de la retina es rica en estructuras y es característica de cada individuo y cada ojo, y, debido a la dificultad para cambiarla o replicarla, podría ser la medida biométrica más segura. La adquisición de la imagen requiere que la persona mire a través de un lente y fije su vista en un punto específico, de tal forma que una parte predeterminada de la retina pueda ser reflejada, lo que involucra un alto grado de cooperación y esfuerzo por parte del usuario, razones que pueden ser causa del rechazo del público [21].
- Firma: La forma en que una persona escribe su nombre es característica de cada individuo. Es una métrica conductual que cambia en el tiempo y se ve influenciada por condiciones físicas y emocionales. Tiene como dificultad extra que una misma persona puede tener variaciones en su firma inclusive en impresiones sucesivas. Además, un experto puede replicar una firma para engañar al sistema [22].
- Voz: Es una combinación de biometría física y conductual. Las características de la voz de un individuo se basan en la forma y tamaño de las estructuras biológicas que son usadas en la síntesis del sonido, que son particulares para cada persona. Sin embargo los

aspectos conductuales del habla cambian en el tiempo de acuerdo a la edad, la condición de salud, el estado emocional, etc. El reconocimiento de voz dependiente de un texto se basa en la pronunciación de una frase determinada. Mientras que el reconocimiento independiente del texto es más difícil de diseñar, pero es más robusto al fraude. Una desventaja del reconocimiento basado en la voz es que las características del habla son sensibles a factores como el ruido ambiente. Es más apropiado en aplicaciones telefónicas, pero la calidad de la señal de voz se ve degradada por el micrófono y el canal de comunicación [23].

- Huella dactilar: Se ha utilizado por siglos y su precisión se ha demostrado ampliamente [24]. Una huella dactilar es el patrón de valles y crestas en la superficie de un dedo, que se forma durante los primeros siete meses de desarrollo fetal. Se trata de una característica única, que no se repite inclusive entre mellizos idénticos. Que los sensores utilizados sean de bajo costo y la precisión alcanzada del reconocimiento en base a la huella dactilar, hacen que sea adecuado para sistemas de verificación e identificación que involucran a una gran cantidad de personas [5].

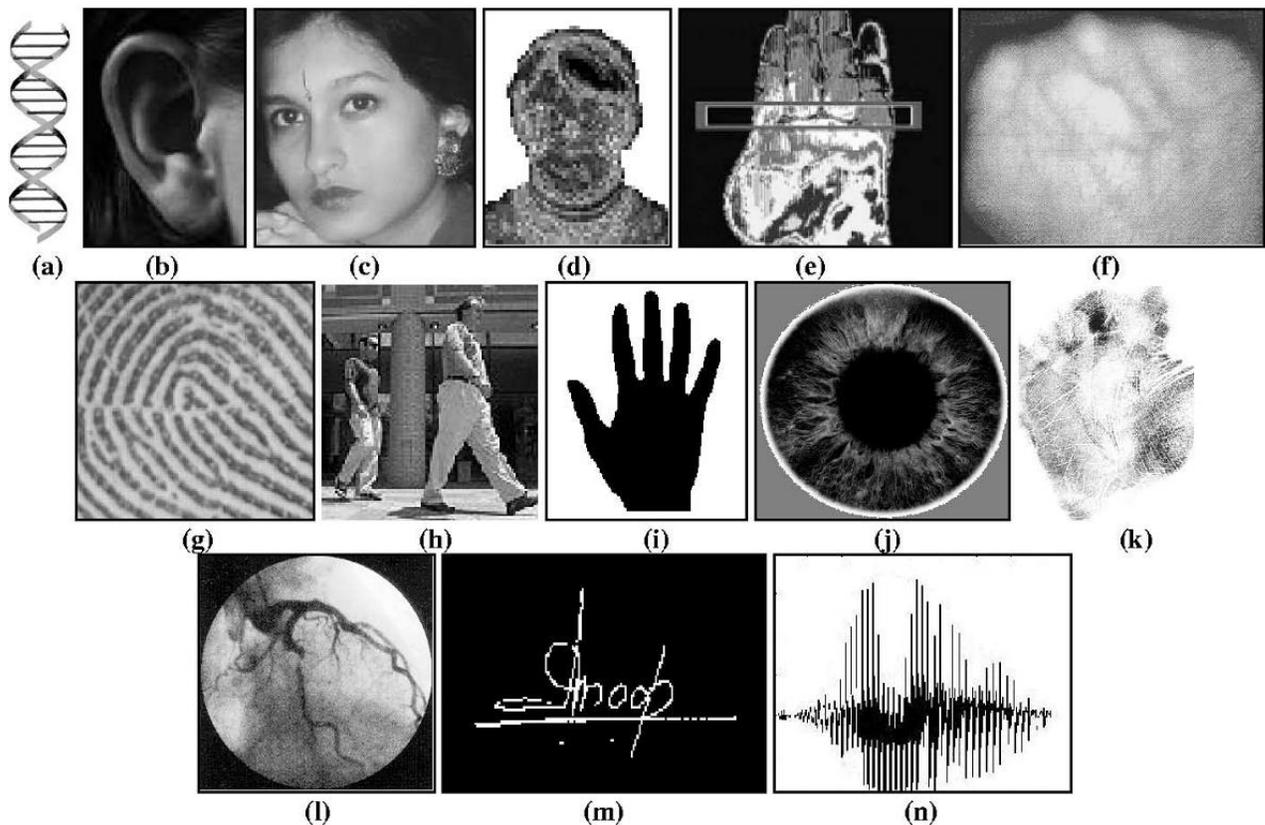


Figura 2. Ejemplos de características biométricas: (a) DNA, (b) oreja, (c) rostro, (d) termografía facial, (e) termografía de la mano, (f) venas de la mano, (g) huella dactilar, (h) modo de andar, (i) geometría de la mano, (j) iris, (k) huella de la mano, (l) retina, (m) firma, y (n) voz. Imagen tomada de [2].

2.2 Características Principales de una Huella Dactilar

Las huellas dactilares son los parámetros biométricos más ampliamente utilizados para la identificación de personas. Corresponden a una representación de la epidermis de los dedos

caracterizada por un conjunto de líneas que forman un patrón único de crestas y valles en la superficie del dedo. Una cresta se define como un segmento de curva, y un valle como la región entre dos crestas adyacentes [5] [25]. Es posible ver ambos componentes de una huella en la Figura 3.

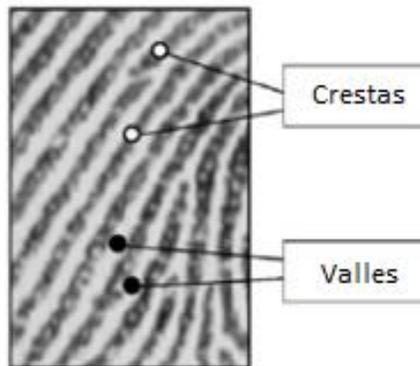


Figura 3: Crestas y valles de una huella dactilar. Imagen tomada de [26].

Al analizar la huella en forma general, esta se divide en tres regiones o zonas: Núcleo, Zona Marginal y Zona Basal [3], que se muestran en la Figura 4.

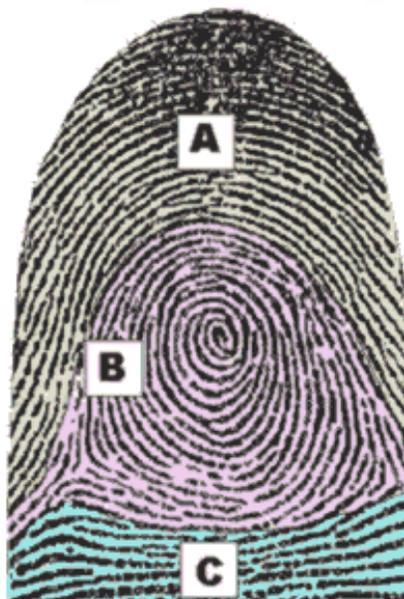


Figura 4: Zonas o regiones de una huella dactilar. Con la letra A se denota la Zona Marginal, con la letra B la Zona del Núcleo de la huella y con la letra C la Zona Basal. Imagen tomada de [3].

El punto más interno de las curvas de la Zona del Núcleo, producido generalmente por la curva más interna de la huella dactilar, se denomina Punto Central o Núcleo.

En estas regiones crestas y valles se encuentran dispuestos, generalmente, en forma paralela. Sin embargo, pueden bifurcarse o terminar abruptamente, dando origen a los Puntos Característicos o Minucias, puntos invariantes en el tiempo y únicos para cada individuo que son utilizados por los

métodos clásicos de identificación [26]. En la Figura 5 se puede ver una representación de los tipos básicos de minucias: puntos terminales y puntos de bifurcación.

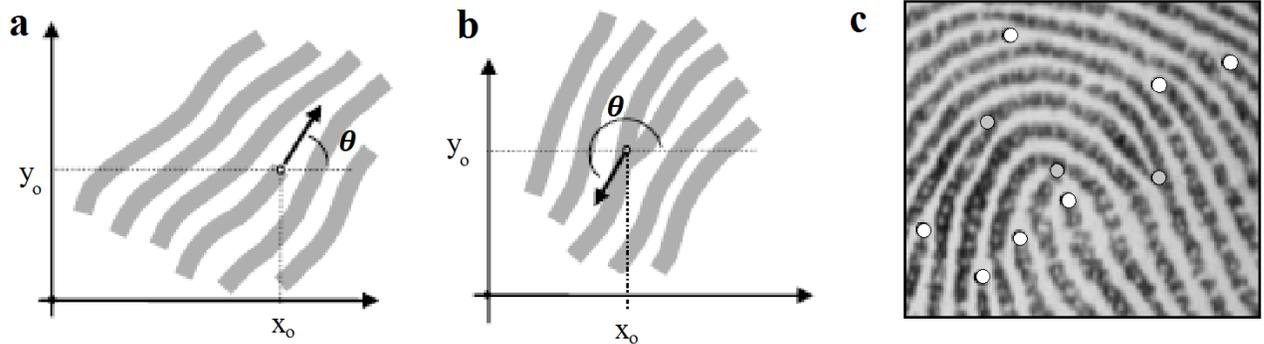


Figura 5. Minucias de bifurcación y término en una muestra de huella dactilar. De izquierda a derecha: (a) Una minucia de terminación, (b) minucia de bifurcación, (c) minucia de terminación (en blanco) y de bifurcación (en gris) en una muestra de huella dactilar. Los puntos (x_0, y_0) representan las coordenadas de las minucias, mientras que θ es el ángulo formado por la tangente a la minucia con la dirección horizontal en el punto de término de la minucia. Imagen tomada de [26].

Además de los dos tipos básicos de minucias existen otros tipos menos frecuentes y que pueden representarse como una combinación de bifurcaciones y terminaciones. La Figura 6 muestra algunos de estos tipos.



Figura 6. Algunos tipos de minucias: 1 empalme o cruce, 2 convergencia, 3 laguna u ojal, 4 desviación, 5 transversal, 6 fragmento o borde independiente, 7 abrupta o terminación, 8 bifurcación, 9 interrupción, 10 punto o isla. Imagen tomada de [3].

En la huella dactilar pueden existir áreas donde las crestas crean formas especiales llamadas singularidades. Estas, en forma básica, se pueden dividir en dos tipos: delta y núcleo, donde estos últimos, a su vez, se pueden clasificar en vuelta (*loop*) y espiral (*whorl*) (Figura 7) [26].

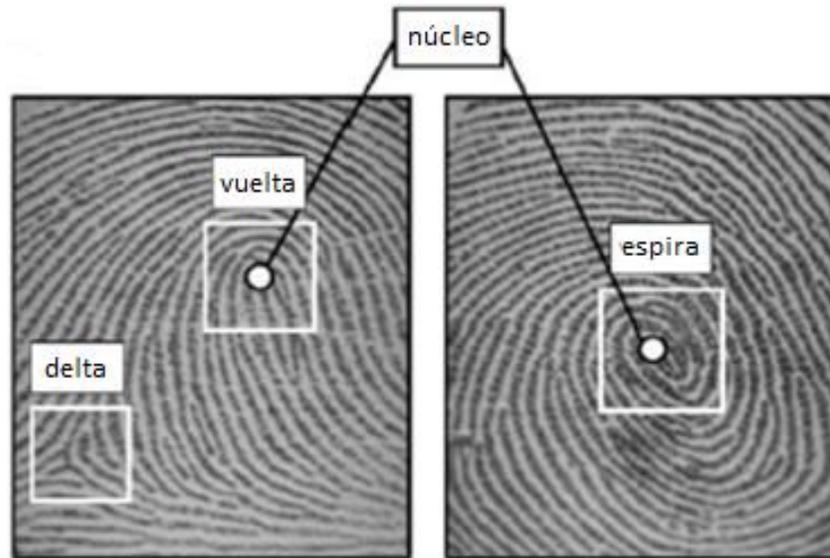


Figura 7: Distintos tipos de singularidades. Estas pueden ser delta o núcleo, los cuales a su vez se subdividen en vuelta (*loop*) y espiral (*whorl*). Imagen tomada de [26].

Las singularidades han sido usadas tradicionalmente para clasificar las huellas dactilares [27]. Según el esquema de clasificación de Galton-Henry [28], existen 5 clases de huellas más comunes: Arco, Arco Tendido, Vuelta Izquierda, Vuelta Derecha, y Espira, que se pueden observar en la Figura 8. De [29] se pueden definir los distintos tipos de huella dactilar como sigue:

- Arco: Tienen crestas que entran desde un lado, se elevan levemente y salen por el lado opuesto. No poseen singularidades.
- Arco tendido: Son similares a las de tipo arco, excepto que algunas líneas exhiben una curvatura mayor y hay una vuelta y una delta, normalmente alineadas verticalmente.
- Vuelta izquierda (o derecha): tienen una o más crestas que entran desde el lado izquierdo (derecho), dan la vuelta y salen por el mismo lado en que entraron. Presentan una vuelta y una delta, donde la vuelta está típicamente localizada a la izquierda (derecha) de la delta con respecto al eje vertical.
- Espira: contienen dos singularidades de tipo vuelta (o una espiral que puede ser considerada como dos vueltas opuestas a la misma ubicación) y dos deltas.

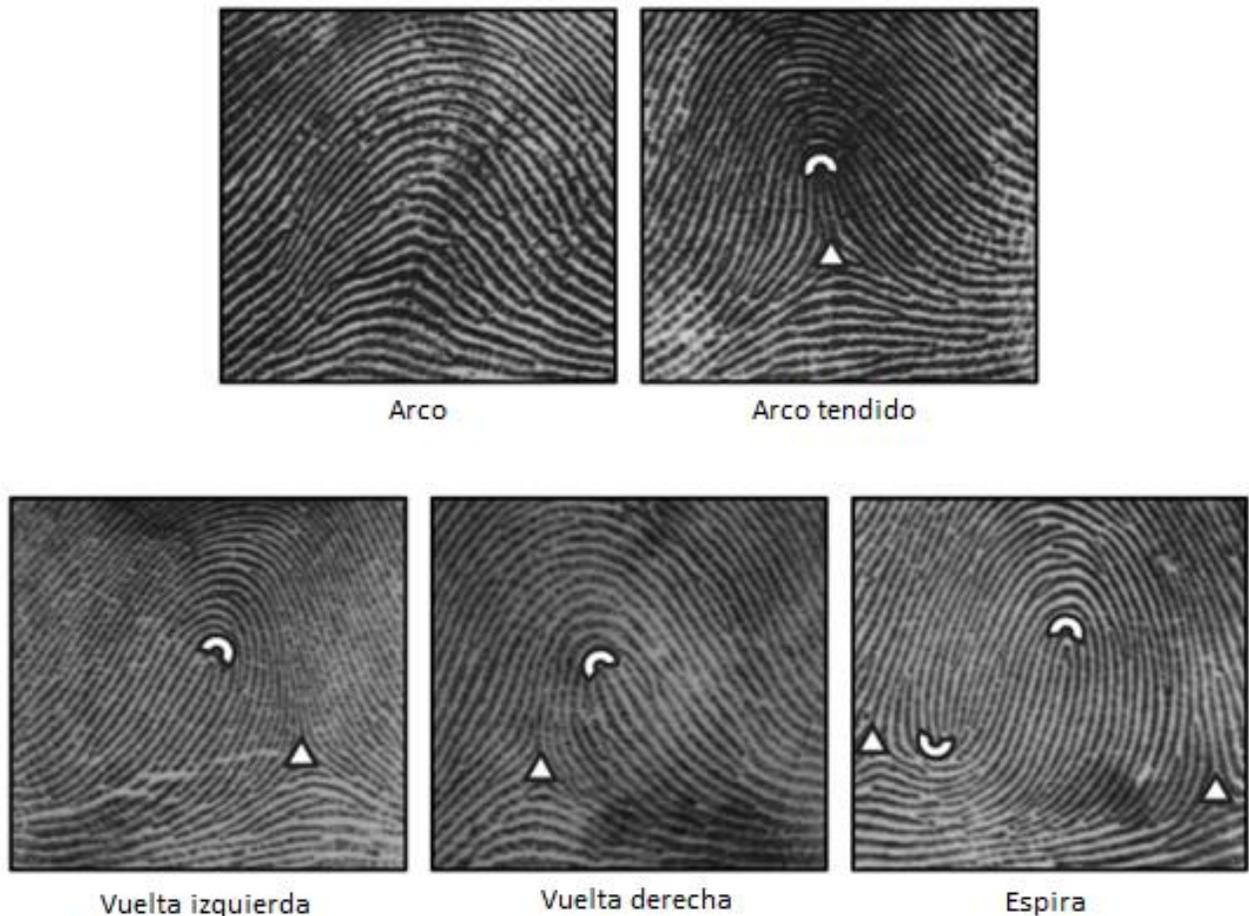


Figura 8. Los cinco tipos de clases de huellas dactilares más utilizados. En cada tipo se encuentran marcadas las singularidades que los definen. Imagen tomada de [24].

El centro de una singularidad se denomina baricentro.

La singularidad principal de una huella dactilar se define considerando que una huella no puede contener más de una singularidad en espiral y no puede contener más de dos vueltas. Si la huella contiene una singularidad de tipo espiral, esta se considera como principal. Si no, la singularidad de tipo vuelta tiene la prioridad más alta para ser la singularidad principal. Las demás singularidades se consideran secundarias. Para la huella de tipo Arco, que no tienen ninguna de las tres singularidades básicas, se define la singularidad principal como el punto donde la concavidad es máxima [30].

Mishra y Shandilya [31] introdujeron una técnica basada en el gradiente y la optimización de un vecindario promedio para generar una orientación de campo suavizada para la detección del punto central.

Basak, Islam y Amin [32] formulan un nuevo método de detección de un punto central virtual basado en el cambio de gradiente de puntos máximos y mínimos, obteniendo así una región de interés para el posterior procesamiento.

2.3 Sistemas de Reconocimiento de Personas en base a Huellas Dactilares

Estos sistemas hacen uso de la imagen de la huella dactilar obtenida mediante sensores especializados o fotografías, haciendo una comparación de parámetros o características con otra imagen o un conjunto de ellas en una base de datos.

Una primera etapa de los sistemas de reconocimiento que usan huellas dactilares corresponde a la etapa de adquisición de la huella, proceso que se puede realizar mediante el escaneo de un impreso o marcando el dedo con tinta en un papel, o mediante su contacto directo con un sensor. Estos sensores pueden ser [33]:

1. Sensores ópticos: son los más comunes. Pueden basarse en el método de reflexión interna total frustrada de la imagen (FTIR), en el cual el dedo se presiona contra un prisma de manera que las crestas entran en contacto directo, pero los valles no; posteriormente, se induce una luz que se refleja en los valles y se dispersa en las crestas, captándose luego con un sensor CMOS al pasar por otra cara del prisma, de manera que en la imagen de la huella los valles parecen brillar y las crestas aparecen oscuras por la falta de reflexión. Otra opción de este tipo de sensores es captar la imagen en forma directa mediante una cámara, lo cual puede llegar a ser más robusto, pero presenta el reto de obtener una imagen de buena calidad y un buen enfoque. Muchas veces este último tipo se acompaña de alguna estructura mecánica que permita estandarizar la captura de la huella a ciertas condiciones (distancia, cantidad de luz, etc.).
2. Sensores de estado sólido: miden características físicas de la huella dactilar y las transforman a una imagen digital. Pueden ser de tipo capacitivo, los cuales son arreglos bidimensionales de micro-capacitores que producen cargas eléctricas variables al estar en contacto con las crestas de la huella dactilar, pudiéndose medir de esta forma la capacidad eléctrica del circuito resultante del contacto directo y formar así la imagen de la huella. También pueden ser sensores de campo eléctrico que consisten en un anillo de accionamiento que genera señales de radio frecuencia de baja amplitud que son moduladas por la estructura de la epidermis, siendo captadas estas diferencias por un conjunto de antenas que forman la imagen digital realizando mediciones para cada pixel.
3. Sensores de barrido: se trata de sensores de menor tamaño, normalmente del ancho del dedo y muy delgados. Requieren que el usuario mueva su dedo sobre el sensor y la huella es construida por un algoritmo de reconstrucción a partir de múltiples cortes formados mientras el dedo se mueve.

La Figura 9 presenta un esquema general del funcionamiento de los distintos tipos de sensores utilizados para la adquisición de huellas dactilares.

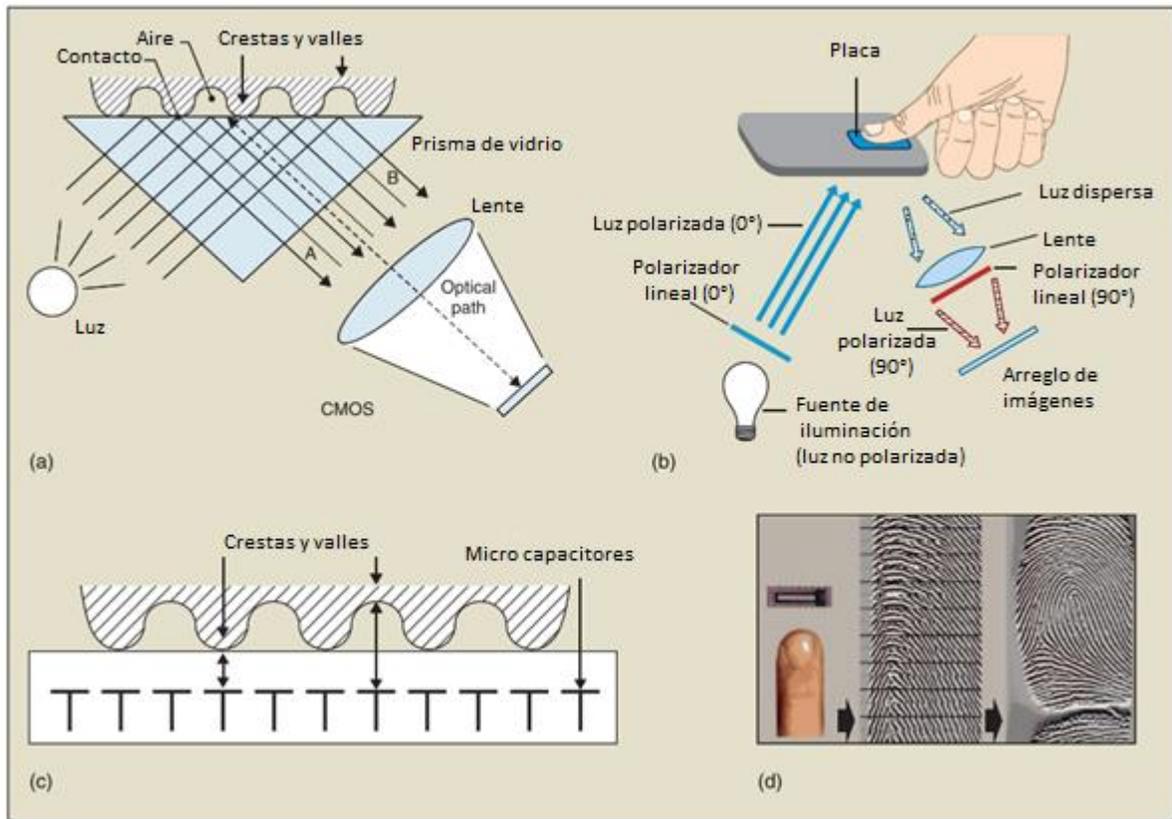


Figura 9. Esquema del funcionamiento de diversos tipos de sensores. (a) sensores ópticos basados en reflexión de luz. (b) sensores ópticos de imagen directa. (c) sensores de estado sólido de tipo capacitivo. (d) sensores de barrido. Imagen tomada de [33].

Una vez obtenida la imagen de la huella dactilar, se realiza el proceso de reconocimiento de la identidad del usuario. Es posible agrupar los métodos existentes en función del elemento de la huella en el que basan su aplicación. Es así como las técnicas de *matching* de huellas dactilares se pueden agrupar en cuatro categorías: basadas en correlación, basadas en la imagen, basadas en patrones y basadas en minucias [25] [34].

2.3.1 Técnicas basadas en correlación

Dos imágenes de huellas dactilares son superpuestas y se calcula la correlación entre distintas regiones para diferentes alineaciones, por ejemplo, para varios desplazamientos y rotaciones. Estos métodos usan la información de los niveles de gris de la imagen en vez de sólo la posición de los puntos, son más robustos a imágenes de baja calidad y a cambios menores en la orientación de las imágenes. Tienen como desventaja que la comparación de modelos requiere altos niveles de cálculo, lo cual hace que no sean del todo aplicables en tiempo real debido al alto costo computacional. Además, cuando la rotación de las imágenes es mayor a 10° es necesario girarlas, lo cual requiere de más recursos computacionales. Si las imágenes quedan mal emparejadas, el rendimiento se reduce considerablemente [34].

Si la notación $I(\Delta x, \Delta y, \theta)$ representa una rotación de la imagen de entrada I en un ángulo θ desde el origen (normalmente el centro de la imagen) y un desplazamiento de Δx y Δy píxeles en las direcciones x e y respectivamente. Entonces, la similitud entre dos imágenes T e I puede ser medida como [25]:

$$S(T, I) = \max_{\Delta x, \Delta y, \theta} CC(T, I^{(\Delta x, \Delta y, \theta)}) \quad (2.1)$$

Donde $CC(T, I)$ es la correlación cruzada entre T e I .

La ecuación anterior rara vez otorga un resultado aceptable al ser aplicada directamente debido a imprecisiones por distorsiones no lineales en las imágenes, diferencias en las condiciones de la imagen y costo computacional. Es necesario usar medidas de correlación más sofisticadas para soslayar estos problemas.

Ejemplos del uso de la correlación para el reconocimiento de personas en base a la correlación son los trabajos desarrollados en [35], [36] y [37].

2.3.2 Técnicas basadas en la imagen

Estos métodos intentan hacer el *matching* en base a características globales de la imagen completa de la huella dactilar. Son útiles para resolver algunos problemas que resultan intratables en la primera aproximación [25].

En [38] Kekre, Sarode y Vig propusieron un método para extraer vectores de características luego de realizar la sectorización del *cepstrum* de la imagen (transformada de Fourier del logaritmo del espectro de una imagen).

2.3.3 Técnicas basadas en patrones

Los algoritmos basados en patrones comparan los patrones básicos de una huella dactilar (arcos, espiras y vueltas) entre un modelo previamente guardado y una huella candidata. Esto requiere que las imágenes estén alineadas en la misma orientación, para lo cual los algoritmos encuentran un punto central de la imagen de la huella dactilar y se centran en él. En un algoritmo basado en patrones, el modelo contiene el tipo, tamaño y orientación de los patrones en la huella alineada [34].

La extracción de características y generación del modelo se basan en series de crestas en lugar de puntos discretos. La ventaja de estas técnicas en lugar de usar puntos característicos es que estos últimos pueden ser afectados por el deterioro de la imagen, y la desventaja es que son sensibles a la colocación correcta de los dedos y almacenar grandes cantidades de datos [25].

En [39] se propone un método en el que se detectan puntos locales de interés y posteriormente se calculan descriptores mediante la Transformada de Características de Escala Invariante (SIFT) en el vecindario de estos puntos, los cuales se comparan usando procedimientos de *matching* local y global.

Otros ejemplos de la aplicación de la técnica basada en patrones son los trabajos presentados en [40] y [41].

2.3.4 Técnicas basadas en minucias

Se trata de la técnica más popular y más ampliamente utilizada. Estas técnicas tienen dos etapas fundamentales: primero la extracción de minucias y, en segundo lugar, el *matching* de minucias. De esta forma, se extraen las minucias de una huella y se comparan con las previamente

guardadas o extraídas de otra huella u otra fuente de información, dando como resultado la mayor cantidad de coincidencias encontradas [34].

La detección automática de puntos característicos o minucias es un proceso crítico, especialmente cuando las imágenes son de baja calidad o existe una gran cantidad de ruido en la captura (imágenes degradadas), lo cual puede provocar que aparezcan pixeles semejantes a minucias o que las escondan. Es por esto que existen muchos trabajos relacionados con el mejoramiento de las imágenes de huellas dactilares, con distintos grados de eficiencia y robustez. O’Gonnan y Nickerson [42] propusieron un método de filtrado contextual para el realce de las huellas dactilares. Greenberg [43] presenta dos métodos de mejoramiento de imágenes, el primero usando ecualización local del histograma, filtro de Wiener y binarización; el segundo mediante un único filtro anisotrópico en la escala de grises. En [44] Hong realizó el mejoramiento de las imágenes en base a la normalización de la imagen, la estimación de la orientación y frecuencia locales de las crestas, y usando filtros de Gabor debido a sus propiedades de selectividad de frecuencia y orientación. En [45] Maio usó máscaras de forma gaussiana para filtrar secciones seleccionadas pasa a paso, siguiendo las curvas en función del nivel de la escala de grises. Wag [46] propuso un método llamado filtro de Log-Gabor que corresponde a una adaptación de los filtros Gabor. En [47] Çavuşoğlu expone un método de filtrado rápido basado en una máscara de referencia con coeficientes parabólicos con la finalidad de ser utilizado en aplicaciones de tiempo real.

La estructura general de los métodos basados en minucias se presenta en la Figura 10, donde es posible observar sus etapas principales. Se puede distinguir las etapas de preprocesamiento para mejorar la calidad de la imagen, la etapa de mejoramiento de la huella en sí, la extracción de minucias y la aplicación de métodos de *matching* entre la huella dactilar de entrada y las guardadas en una base de datos o una segunda huella.

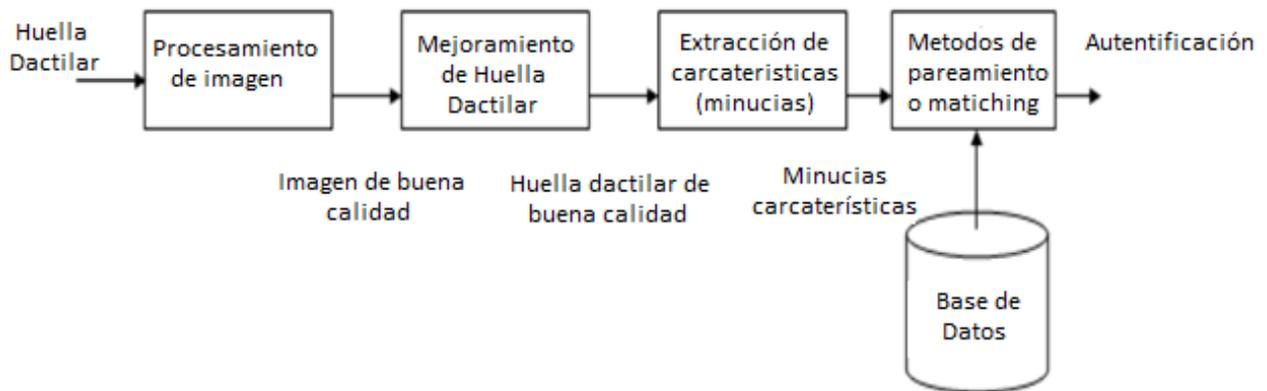


Figura 10. Arquitectura general de los métodos de reconocimiento de identidad en base al análisis de puntos característicos o minucias.

Uno de los métodos utilizados en el mejoramiento de la calidad de la imagen corresponde al proceso de segmentación, cuyo objetivo es separar el área de la huella dactilar del fondo de la imagen, un ejemplo se muestra en la Figura 11.

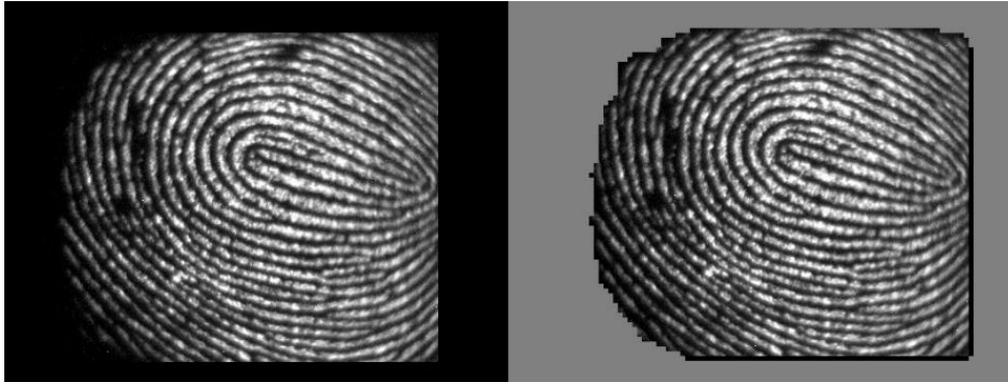


Figura 11. Ejemplo de la aplicación de la técnica de segmentación. A la izquierda la huella original, a la derecha la imagen segmentada eliminando el fondo.

Existe una gran variedad de métodos de extracción de minucias en la literatura. Estos métodos se pueden clasificar en dos categorías (Figura 12) [25]:

- Los métodos que trabajan con imágenes de huellas binarizadas.
- Los métodos que trabajan directamente en las imágenes en niveles de grises.

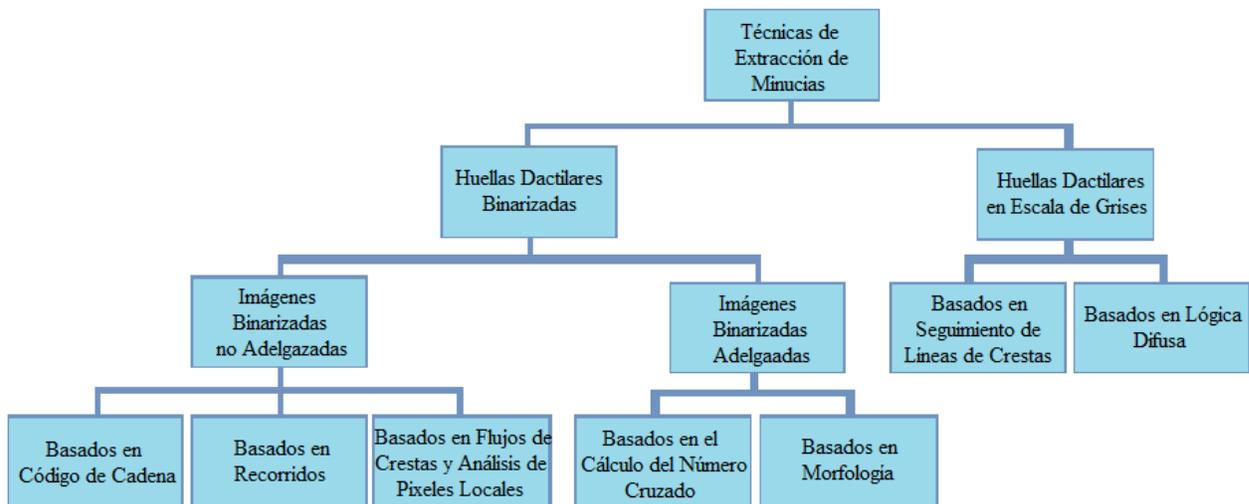


Figura 12. Clasificación de Técnicas de Extracción de Minucias. Imagen tomada de [25].

2.3.4.1 Detección de minucias a partir de huellas dactilares binarizadas

Estos métodos realizan una binarización de la imagen (paso de la imagen a blanco y negro, ver Figura 13) y, en su mayoría, posteriormente adelgazan las líneas obtenidas para dejarlas con un solo píxel de ancho. Es así como estos métodos se pueden clasificar en dos clases: los que trabajan con la imagen binarizada sin adelgazar y los que trabajan con la imagen binarizada y adelgazada.

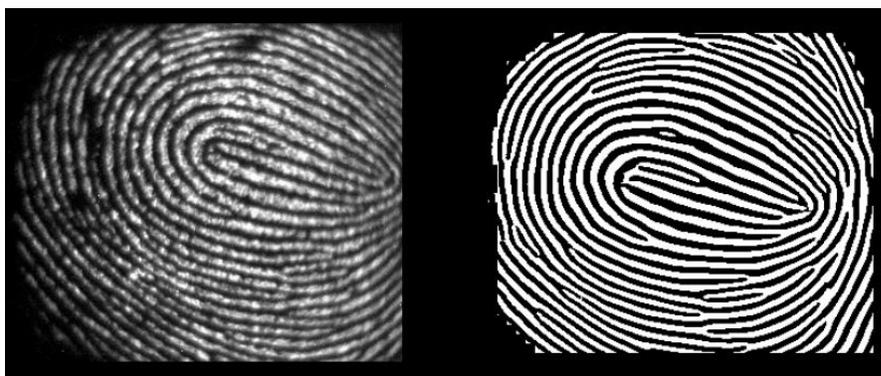


Figura 13. Ejemplo binarización de una huella dactilar. A la izquierda la huella original y a la derecha la huella binarizada.

La mayoría de los métodos de extracción de minucias se basan en el adelgazamiento de la imagen donde el proceso de esqueletización convierte cada cresta a un ancho de un pixel. Los puntos finales son seleccionados si tienen un solo vecino en la línea de la huella y los puntos de bifurcación son encontradas si tienen más de dos puntos vecinos en las crestas adelgazadas (esqueleto), criterios que usualmente conllevan encontrar una gran cantidad de minucias falsas, para lo cual se debe realizar un postprocesamiento basado en información estructural y estadística luego de la detección.

Esta familia de métodos presentan los siguientes problemas [45]:

- Pérdida de información al aplicar la binarización.
- Consumo de tiempo en los procesos de binarización y adelgazamiento.
- Los operadores de binarización y adelgazamiento pueden introducir minucias falsas.
- Baja performance en imágenes de baja calidad.

2.3.4.1.1 Métodos que no utilizan la huella dactilar adelgazada

Dentro de los métodos que no utilizan la imagen adelgazada, justamente para evitar los problemas antes señalados, se encuentran:

- Métodos basados en el procesamiento de código de cadena.
En [48] se presenta un método de extracción de características mediante la representación de los contornos de las crestas de las huellas dactilares, lo cual permite mejorar la calidad de una imagen en forma eficiente y detectar minucias finas. En este método la imagen es escaneada de arriba hacia abajo y de derecha a izquierda detectando las transiciones de blanco a negro, con lo cual se traza el contorno en la dirección de los punteros del reloj y se expresa como un arreglo de elementos de contorno, donde cada uno de estos elementos representan un pixel que contiene las coordenadas x e y , y la dirección. Una minucia de término se encuentra cuando el trazado presenta una vuelta significativa (determinada usando un valor umbral) hacia la izquierda, mientras que si es hacia la derecha esta minucia corresponde a una bifurcación.

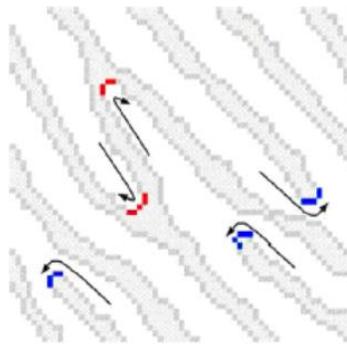


Figura 14. Localización de minucias en un contorno representado como cadena. Imagen de [25].

- Métodos basados en recorridos.
Ejemplos de esta metodología son [49] y [50]. La estructura de crestas de una huella dactilar se representa como un código denominado *Run Length Code* (RLC) donde se buscan las minucias. En primer lugar la imagen es segmentada para extraerla del fondo, y normalizada. Posteriormente, se calcula la orientación y frecuencia de las crestas alrededor de cada pixel, para, con esa información, realizar una convolución con un filtro Gabor que incrementa el contraste entre las líneas y el fondo, reduciendo a la vez el ruido. Luego la imagen es binarizada eligiendo un valor umbral del nivel de gris. La codificación se realiza definiendo pixeles sucesivos horizontales de color negro como un recorrido y guardando la localización de su inicio y su largo o fin. En base a la presencia de recorridos adyacentes se define la existencia de minucias de terminación y bifurcación. También se busca recorridos en el eje vertical para detectar falsas minucias. Un esquema general de estos métodos se observa en la Figura 15.

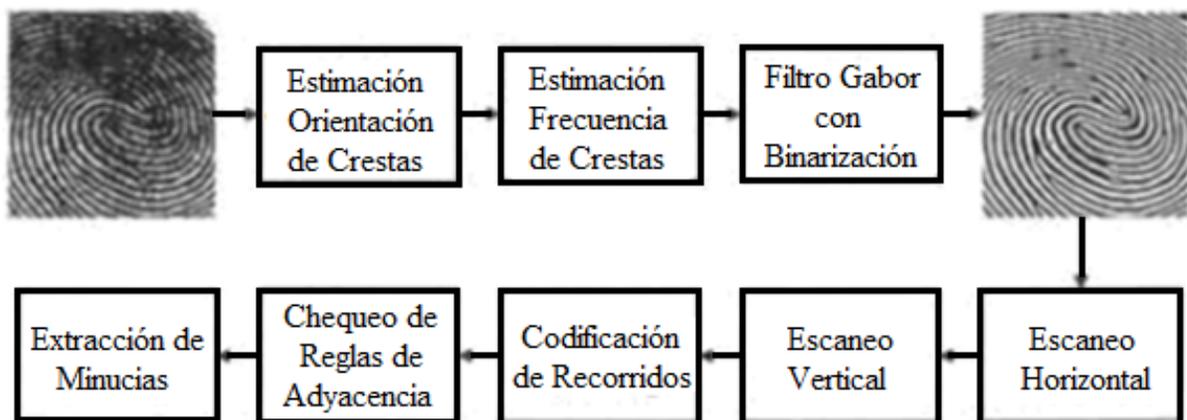


Figura 15. Diagrama de bloques del método de extracción de minucias en base a la codificación RLC. Imagen tomada de [25].

- Métodos basados en flujos de crestas y análisis de pixeles locales.
Estos métodos utilizan pequeñas máscaras para recorrer la imagen calculando promedios locales que son comparados con valores umbral para determinar la presencia de minucias de término o bifurcación. Ejemplos de esta implementación son [51] y [52].

2.3.4.1.2 Métodos que utilizan la huella dactilar adelgazada o esqueletizada.

En estos métodos la imagen es segmentada y binarizada. Posteriormente, las líneas de la huella dactilar son adelgazadas removiendo pixeles hasta que quedan de un ancho igual a uno (un pixel). Un ejemplo de huella esqueletizada o adelgazada se observa en la Figura 16, donde de izquierda a derecha se presentan la huella dactilar original, su versión binarizada y el esqueleto o huella con líneas de ancho uno.



Figura 16. A la izquierda una huella dactilar en escala de grises, al centro la huella binarizada, a la derecha la huella dactilar con sus líneas adelgazadas. Imagen tomada de [45].

Dentro de esta clase de técnicas, se encuentran las siguientes categorías de métodos [25].

- Extracción de minucias usando el valor *Crossing Number*
Para la huella adelgazada, se calcula, en cada pixel, un valor denominado *Crossing Number* (CN), el cual toma en cuenta una vecindad de ocho pixeles alrededor del pixel en estudio. Con estos valores, el coeficiente CN se calcula como la mitad de la suma de la diferencia entre pixeles adyacentes en el vecindario de estudio:

$$CN = 0.5 \sum_{i=1}^8 |P_i - P_{i+1}| \quad (2.2)$$

Donde $P_1 = P_9$.

Usando este valor, cada pixel se puede clasificar como una minucia de término, una minucia de bifurcación o un punto no correspondiente a una minucia de acuerdo a los valores indicados en la Tabla 1.

Tabla 1. Propiedades de un pixel según su valor de coeficiente CN.

CN	Propiedad
0	Punto aislado
1	Punto de término de línea
2	Punto de continuidad de una línea
3	Punto de bifurcación
4	Punto de cruce

Esta metodología puede introducir la detección de falsas minucias, por lo que se suelen introducir técnicas de postprocesamiento como el uso de umbrales o ciertas reglas heurísticas para eliminar tipos específicos de minucias falsas.

Un ejemplo de un trabajo que utiliza este coeficiente para extraer las minucias de la huella dactilar se presenta en [53].

- Extracción de minucias en base a morfología.
Se trata de técnicas de extracción de minucias basadas en operadores de morfología matemática que preprocesan la imagen para reducir los cálculos en la etapa de postprocesamiento. Los operadores morfológicos buscan encontrar algunas formas particulares, por lo que se desarrollan diferentes elementos estructurales para distintos tipos de minucias y también para evitar algunos errores conocidos, esto mediante combinaciones de la imagen con dichos elementos. Ejemplos de la aplicación de esta metodología son los trabajos presentados en [54] y [55]. En [54] se utilizan los operadores morfológicos básicos de erosión y dilatación para reducir y expandir formas, mientras que en [55] se emplea el operador *Hit and Miss*, el cual pretende encontrar patrones de fondo y objeto a la vez en una imagen, siendo útil, por ejemplo, para encontrar estructuras de tipo esquina. Es posible realizar el adelgazamiento de un objeto en una imagen calculando sus partes “sobrantes” con el operador *Hit and Miss*, y luego restándolas al objeto original. La Figura 17 muestra el adelgazamiento de una huella dactilar con y sin la aplicación del operador morfológico *Hit and Miss*, donde se observa una imagen esquelizada más limpia en el segundo caso.

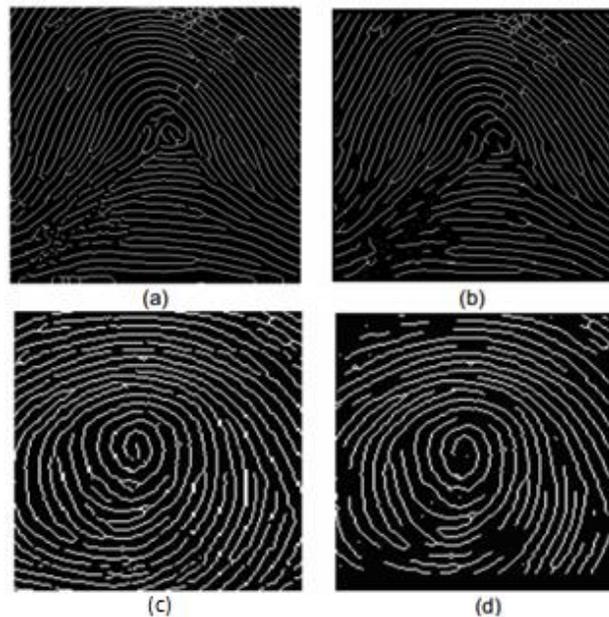


Figura 17. Ejemplo de adelgazamiento de huella dactilar binarizada usando operador morfológico. Las imágenes de la izquierda (a y c) corresponden a huellas adelgazadas sin haber aplicado el operador morfológico *Hit and Miss*, mientras que las imágenes de la derecha (b y d) son las mismas huellas dactilares, pero habiendo realizado el proceso de adelgazamiento en forma posterior a la aplicación del operador. Imagen tomada de [55].

2.3.4.2 Detección de minucias a partir de huellas dactilares en escala de grises

La detección de minucias también se puede hacer directamente a partir de la imagen en escala de grises, sin realizar los procesos de binarización y adelgazamiento. Estos métodos se pueden clasificar en dos categorías:

2.3.4.2.1 Extracción de minucias por seguimiento de líneas de flujo de las crestas

Se basan en la observación de que las líneas de las crestas se componen por un conjunto de píxeles con máximos locales en una dirección que pueden ser encontrados y seguidos. Estos métodos realizan una etapa de preprocesamiento simple en base a un filtrado gaussiano para luego realizar un seguimiento de las curvas en base a niveles de gris detectando sus discontinuidades y almacenando las características principales. El seguimiento se realiza analizando sucesivos cortes transversales de las líneas y ubicando los máximos locales, tal como se observa en la Figura 18 [45] [3].

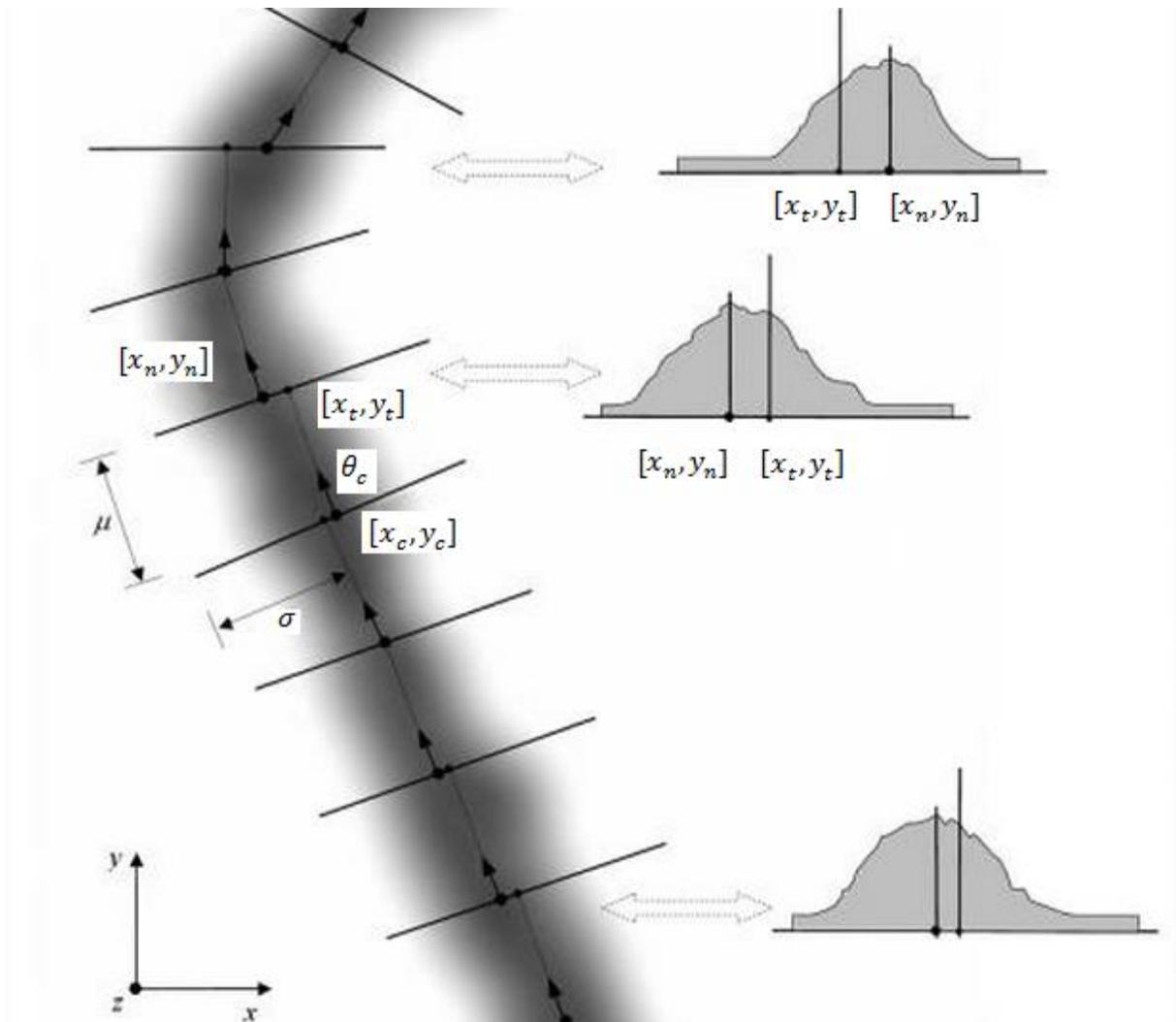


Figura 18. Seguimiento de una línea correspondiente a una cresta de una huella dactilar. A la izquierda el esquema de seguimiento mediante cortes transversales sucesivos, a la derecha el detalle de algunos de estos cortes donde es posible ver los distintos niveles de gris desde donde se escoge el máximo local. Imagen tomada de [45].

2.3.4.2.2 Técnicas difusas para la extracción de minucias desde la imagen de niveles de gris

En [56] se propone la existencia de dos tipos de niveles de gris: oscuros y brillantes, los cuales se modelan usando lógica difusa para definir reglas que permitan encontrar minucias. Con este propósito se obtienen líneas estructurales toscas y adelgazadas, tanto para las crestas como para los valles, que se van siguiendo para testear cada punto junto a sus vecinos y así determinar memberships a cada conjunto (oscuro o brillante). Para la detección de una minucia de término se debe encontrar una membresía al conjunto oscuro seguida de una membresía al conjunto brillante en una cresta, y lo opuesto para una minucia de bifurcación, la cual se busca en las líneas estructurales correspondientes a los valles.

2.4 Reconocimiento de huellas dactilares usando cámaras como sensor

Se han realizado diversos estudios, con mayor o menor éxito, para extraer la huella dactilar usando ya sea la cámara de un teléfono o una cámara digital conectada a un computador. Antes de lograr este objetivo, se deben sortear una serie de dificultades inherentes al problema. Estas dificultades se resumen en forma general en [57], trabajo en el cual se realiza el proceso de reconocimiento de huella dactilar a partir del uso de una cámara de teléfono celular como sensor de captura de huellas dactilares. Estos problemas comunes a todos los sistemas de extracción de huellas dactilares a partir de fotografías de un dedo se pueden resumir de la siguiente forma:

- **Los dispositivos móviles no están diseñados para un uso biométrico.**

No todas las cámaras están habilitadas para enfocar a una distancia suficiente para distinguir los patrones de líneas conformantes de las huellas dactilares. Si la distancia del dedo a la cámara es muy grande, la resolución efectiva de la imagen se reduce considerablemente y no se distinguen detalles suficientes. La baja cantidad de configuraciones posibles en los dispositivos móviles restringe las posibilidades para realizar reconocimiento en base a fotos de huellas dactilares. Otro problema es que los sensores de las cámaras normalmente son pequeños para tener un diseño compacto, lo que tiende a producir altos niveles de ruido en las fotos. Además, se debe tener en cuenta que estos dispositivos presentan recursos de cálculo limitados.

- **Valoración de la calidad de la imagen.**

Es un factor importante en el rendimiento de un sistema de reconocimiento de huellas dactilares que incluya un dispositivo móvil. Esto porque las imágenes de alta calidad requieren de un menor procesamiento y mejoras que las de baja calidad. Así, la imagen se denomina como corrupta si las crestas y valles no son visibles y no es posible extraer de ellas las minucias.

- **Condiciones de iluminación y presencia de un flash en el dispositivo móvil.**

Al ser sistemas portátiles, las condiciones de iluminación en las que se pueden utilizar son diversas, lo que influye directamente en la capacidad de las soluciones propuestas para poder extraer las características de la imagen. El flash del dispositivo se puede usar para estandarizar y mejorar las condiciones de iluminación en la toma de una fotografía, sin embargo, este, además de contribuir para crear una imagen de alta calidad, también, dependiendo del fondo de la imagen, puede producir que esta no sea aceptable para poder extraer minucias.

- **Fondo de la imagen y capacidad de enfoque del dispositivo.**

Si el fondo de la imagen es uniforme, es decir, no contiene texturas, y de color blanco, con o sin flash, la fotografía tiene altas posibilidades de resultar de buena calidad. Si varía a un patrón no uniforme, como por ejemplo madera, la imagen disminuye su calidad. Si el fondo es complejo, es decir, presenta múltiples objetos, es más difícil obtener una imagen de buena calidad, lo cual dependerá exclusivamente de la capacidad de enfoque del dispositivo.

- **Distorsiones angulares y en la posición.**

Podría darse que el usuario presente su dedo en una posición distinta a la definida para el correcto funcionamiento del sistema o que éste rote su dedo involuntariamente durante el proceso de captura. Otra distorsión geométrica se puede dar por imágenes tomadas a distintas distancias del dedo a la cámara. Así, existen varias poses potenciales según la variación del ángulo de orientación, el ángulo de inclinación y la posición, por lo que es necesario realizar un proceso de normalización.

- **Otros factores que afecten la calidad de la huella.**

Además de las limitaciones anteriores, es necesario señalar que aún con una buena imagen la huella a extraer se puede ver afectada por factores como imperfecciones de la piel, desgaste del dedo y presencia de suciedad.

- **Ausencia de una base de datos estándar**

Si bien esta dificultad no es parte del problema en sí mismo, sí resulta fundamental poder medir el rendimiento de los sistemas desarrollados para decidir cuál funciona de mejor forma bajo determinadas condiciones. Si bien no existe una base de datos estandarizada, en algunos sistemas desarrollados también se construye una base de datos para futuros desarrollos. Tal es el caso de [57], donde se construye una base de datos que contiene 6 imágenes de cada dedo (10) de 22 sujetos, con un total de 1320 imágenes; y de [58], donde se construye una base de datos con 6 imágenes de cada dedo índice de 41 sujetos.

En lo que respecta a la captura de huellas dactilares y reconocimiento de identidad usando un dispositivo móvil, el trabajo más completo se presenta en [58], donde se realiza la captura de las fotos de huellas dactilares usando la cámara de un *Smartphone* en forma automática, es decir, sin la necesidad de presionar un botón o usar un sistema *touch* para hacer la captura. En este trabajo, además, se analizan varios métodos de preprocesamiento de las imágenes capturadas evaluando diferentes parámetros y configuraciones de los algoritmos, seleccionando estas operaciones en base al esfuerzo computacional que involucran para garantizar que se puedan ejecutar en un *Smartphone* con capacidad de memoria limitada. El prototipo obtenido fue evaluado en 2 *Smartphones* diferentes. A continuación se resume paso a paso el sistema desarrollado en el estudio citado.

- **Proceso de captura**

Se fija el foco de la cámara en el modo más cerrado posible y se enciende el LED realizando un sistema de doble flash que permite estabilizar las condiciones de luz, hacer resaltar el dedo por sobre el fondo, reducir el ruido de la cámara y disminuir el riesgo de imágenes borrosas. Junto con estos ajustes de hardware, se establecen criterios de verificación de calidad, lo cuales, si se cumplen, permiten realizar el proceso de captura en forma automática.

- **Verificación de calidad**

Se establece que el criterio más importante para determinar la calidad de una foto dactilar es el nivel de nitidez. Para hacer esto, en este trabajo se utilizó un filtro Sobel que permite crear una imagen de bordes (magnitud del gradiente) del dedo donde, si la imagen es nítida, aparecerán las líneas de la huella. Este filtro se aplica sobre el canal rojo de la imagen en formato RGB y se define una métrica denominada “densidad de bordes”, indicada en la ecuación 2.3, que se calcula en una porción central de la imagen (50x50 píxeles) para disminuir el costo computacional. La foto se toma cuando la densidad de bordes excede un valor umbral fijado en forma empírica y se calcula nuevamente en la imagen ya capturada para verificar la posibilidad de que hay existido un movimiento durante el disparo de la cámara. La Figura 19 da muestra del cálculo de esta métrica tanto en una imagen nítida como en una imagen borrosa.

$$ED_I = \frac{1}{M \times N} \sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N E(x, y) \quad (2.3)$$

Dónde:

- $E(x, y)$: magnitud del gradiente del pixel (x, y) de la imagen de bordes.
- M : número de columnas de la imagen de bordes.
- N : número de filas de la imagen de bordes.



Figura 19: A la izquierda, imagen de buena calidad para la extracción de la huella dactilar, a la derecha imagen borrosa. Ambas acompañadas de su análisis de borde, donde se observa claramente que para la imagen borrosa, estos no aparecen. La medida de densidad de bordes es calculada en las áreas remarcadas en rojo. Imagen tomada de [58].

- **Reconocimiento de dedo**

En primer lugar se debe detectar el dedo en la imagen de previsualización de la cámara, lo que se hace a partir de la información del color de los píxeles. Sólo se analiza el canal rojo para reducir el esfuerzo computacional debido a que el color piel es mayoritariamente de este color. El análisis se hace desde los bordes de la imagen hacia el centro realizando la comparación de los valores con un umbral, el cual, si es superado, determina el límite en cada dirección, resultando así un rectángulo que contiene el dedo, denominado región de interés (ROI). Este proceso se observa gráficamente en la Figura 20.

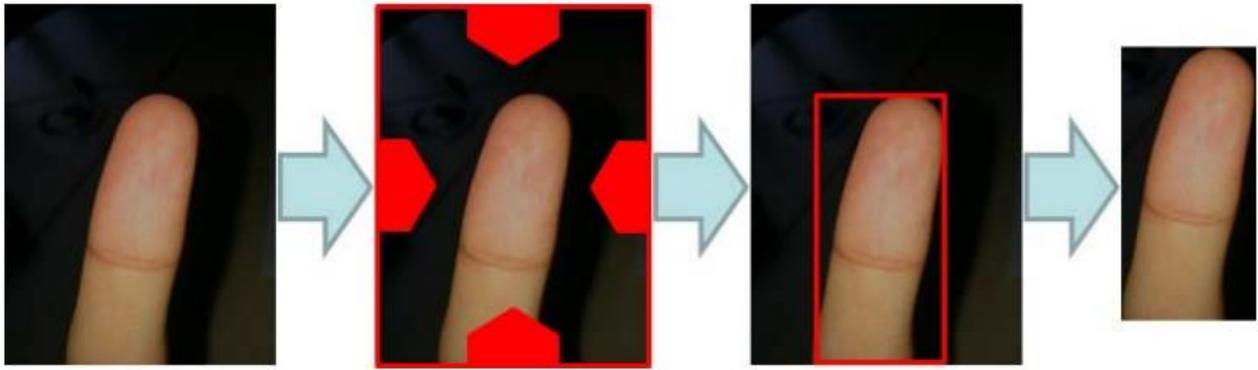


Figura 20: Procedimiento paso a paso de la determinación de la región que contiene al dedo o región de interés. Imagen tomada de [58].

Como es posible tener rotaciones del dedo frente a la cámara, se aplica a la imagen un ángulo de corrección para obtener una orientación uniforme. Para esto se determinan dos puntos cercanos al centro de la imagen, se analizan los píxeles rojos ubicados horizontalmente a estos puntos, hallando los puntos donde se termina el dedo. Finalmente, se encuentra el ángulo de corrección usando las distancias entre estos puntos encontrados y los puntos fijados inicialmente. La forma de determinar los puntos y distancias con los que se calcula el ángulo de corrección se observa en la Figura 21.

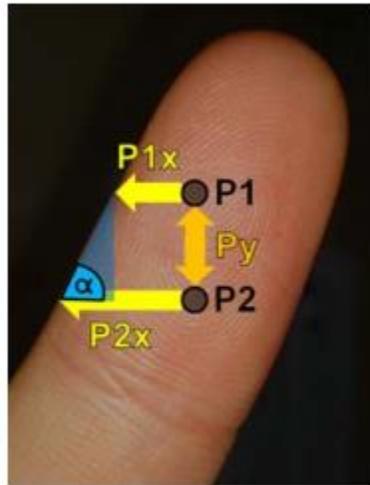


Figura 21: Puntos y distancias utilizadas para calcular el ángulo de corrección de las imágenes que contienen dedos. Imagen tomada de [58].

Con estas distancias se calcula el ángulo de corrección usando la ecuación 2.4.

$$\alpha = \text{atan} \left(\frac{P_y}{P_{2x} - P_{1x}} \right) \quad (2.4)$$

Dónde:

- P_1 y P_2 son los puntos de referencia fijados al interior del dedo.
- P_y es la distancia entre P_{1x} y P_{2x} .
- P_{1x} es la distancia entre P_1 y el punto de intersección encontrado.

- P_x es la distancia entre P_2 y el punto de intersección encontrado.
- α es el ángulo de corrección.

Una vez capturada la imagen, se vuelve a verificar la región de interés del mismo modo utilizado anteriormente verificando el color de la imagen, sin embargo, esta vez el análisis se hace desde el centro hacia los bordes. Los píxeles que se determinan como parte del fondo se fijan en color negro, segmentando así el dedo.

Adicionalmente, se debe cumplir el supuesto de que tanto largo como ancho deben superar una medida que permita extraerla información suficiente para hacer la verificación de identidad.

- **Preprocesamiento del área encontrada para el dedo**

Si el largo es mucho mayor que el ancho, se remueve el extremo inferior de la imagen manteniendo una proporción definida. Además, se escala la imagen para tener un ancho estándar. Posteriormente, se aplica un filtro de mediana para reducir el ruido de la cámara y se hace un proceso de binarización local en el que se compara el valor del canal rojo de cada píxel con el promedio de los píxeles vecinos en un bloque de cierto tamaño. Así la imagen queda en blanco y negro

Las minucias se extraen de la imagen dactilar usando el motor de búsqueda de minucias de código abierto FingerJetFX¹ generándose *templates* que se guardan acorde con el formato estándar ISO/IEC 19794-2 [59], con la información de la posición, ángulo de orientación, tipo de minucia y puntaje de calidad de cada minucia. Se justifica el uso de este extractor debido a su bajo costo computacional, si bien se reconoce la aparición de un alto número de falsas minucias y errores en la determinación de los ángulos de orientación, lo que podría deberse a que fue diseñado para el análisis de huellas dactilares tomadas mediante otro tipo de sensores.

- **Evaluación y resultados**

La evaluación de los algoritmos se hizo en dos dispositivos móviles en forma de una aplicación para el Sistema Operativo Android. Se usó como usuarios de prueba a 41 sujetos en dos sesiones, la primera de las cuales sirvió para realizar el proceso de enrolamiento de ambos índices de cada sujeto, esto es, el proceso mediante el cual se extrajeron las características de las huellas de los dedos y se guardaron como referencia para la futura comparación, seleccionando siempre las imágenes de mayor calidad (mayor densidad de bordes) entre 6 capturas hechas para cada dedo. En una segunda sesión se realizó el proceso de autenticación, en el cual se compara cada minucia encontrada en la imagen de prueba con las de la imagen de referencia. Los criterios para aceptar una minucia son que sea del mismo tipo que la presente en el *template* y que su distancia Euclídeana y orientación no excedan el valor de tolerancia definido.

Las mediciones de resultados fueron hechas para dos dispositivos móviles usando la Falsa Tasa de Coincidencia (FMR) y Falsa Tasa de No-Coincidencia (FNMR), definidas en [57]. Si se toman N muestras de cada uno de M sujetos, es posible calcular puntajes de similitud entre dos

¹ FingerJetFX es un software de código abierto desarrollado por la compañía DigitalPersona. Su utilidad es convertir imágenes de huellas dactilares en una representación matemática codificada, es decir, conteniendo las minucias de la huella. La empresa desarrolladora del software cambió su nombre a Crossmatch y su sitio web a <http://www.crossmatch.com>, donde no es posible encontrar FingerJetFX. Sin embargo, este se encuentra disponible en la dirección web <https://github.com/FingerJetFXOSE/FingerJetFXOSE>.

muestras. Un puntaje de similitud entre dos muestras de la misma fuente es llamado puntaje genuino, mientras que un puntaje impostor es el puntaje de similitud entre dos muestras de diferentes instancias. Entonces, a partir de $N \cdot M$ muestras, se pueden calcular $N_{Gen} = \frac{M \cdot N \cdot (N-1)}{2}$ puntajes genuinos diferentes y $N_{Imp} = \frac{M \cdot N \cdot (M-1) \cdot N}{2}$ puntajes impostores distintos. Luego, para un umbral T , se puede calcular las tasas FMR y FNMR como:

$$FMR(T) = \frac{\#imágenes\ impostoras\ aceptadas\ incorrectamente \geq T}{N_{Imp}} \quad (2.5)$$

$$FNMR(T) = \frac{\#imágenes\ genuinas\ rechazadas\ incorrectamente \geq T}{N_{Gen}} \quad (2.6)$$

Es posible encontrar un punto en el cual FNMR y FMR son iguales, denominado *Equal Error Rate* (EER). La Figura 22 muestra las curvas de *trade-off* de detección (DET) para distintos valores de tolerancia de la distancia euclidea entre las minucias de prueba y las de referencia y también usando como parámetro la distancia modificada de Hausdorff (MHD) [60].

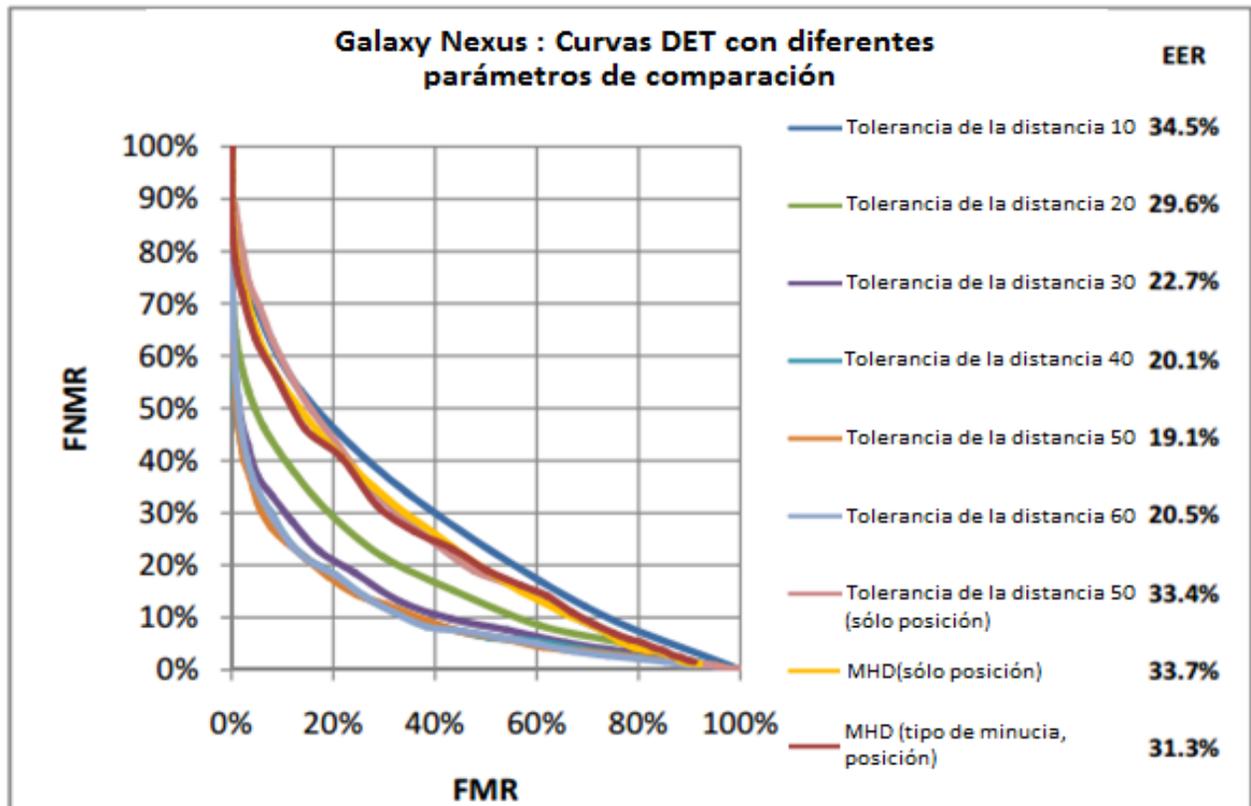


Figura 22: Curvas DET con diferentes parámetros de comparación con una tolerancia de 45° para el ángulo de orientación entre minucias de referencia y prueba. Imagen tomada de [58].

En cuanto a los tiempos de procesamiento, se calculó un promedio de 50[s] para el proceso de enrolamiento y 22[s] promedio para el proceso de autenticación. El primero se indica como más largo debido a que cada *template* se determina a partir del análisis de dos imágenes. En cuanto al tiempo de preprocesamiento de las imágenes, se señala con un promedio de 1.7 [s]. Es posible ver el detalle de los tiempos de procesamiento del algoritmo en la Figura 23 para los dos Smartphones empleados en el estudio.

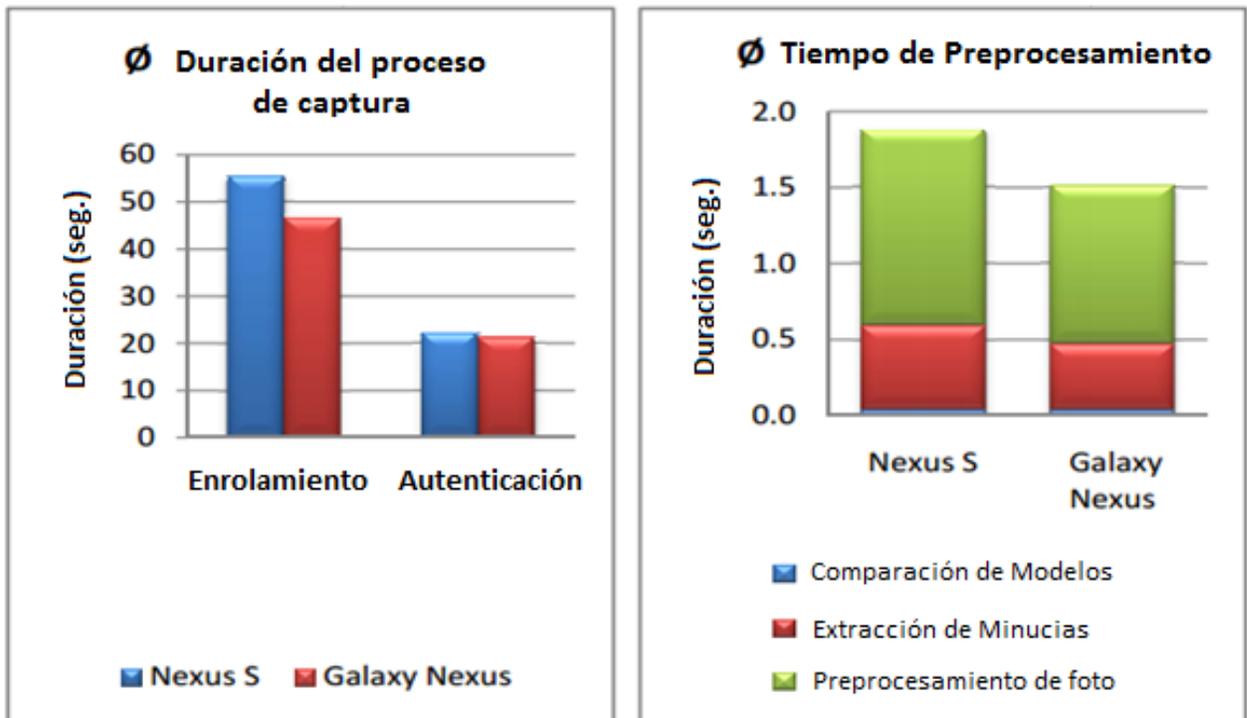


Figura 23: A la izquierda tiempo promedio para el proceso de captura en enrolamiento y autenticación para dos dispositivos móviles. A la derecha tiempos promedio de cada etapa de procesamiento para los mismos dos dispositivos. Imagen tomada de [58].

Como se mencionó previamente, el proceso de extracción de minucias en [58] presenta un gran número de errores.

En [61] se presenta un método en el que el hardware utilizado no corresponde a un dispositivo móvil, sino una *webcam* conectada a un computador por una interfaz USB 2.0 con un enfoque fijo a 8 [cm] del lente de la cámara. Luego de la captura de la imagen, se efectúa un proceso de normalización de la iluminación a través del algoritmo Retinex [62]. La imagen de entrada se convierte al espacio de color HSV y se extrae el componente “V” correspondiente a la Luminancia de la imagen, luego el algoritmo actualiza la estimación de la luminosidad actual para cada pixel de la componente “V” usando la operación “ratio-producto-reset-promedio”. Este algoritmo primero calcula las interacciones de larga distancia entre pixeles y luego las interacciones de corta distancia. Los canales “H”, “S” y “V” normalizado se concatenan nuevamente para continuar procesando la imagen posteriormente. Usando el componente “V” de la imagen HSV, el canal “Cr” de la imagen YCbCr, junto con las componentes R, G y B normalizadas de la imagen RGB se determinan umbrales que permitan eliminar el fondo manteniendo sólo el color piel correspondiente al dedo.

Posteriormente, con la imagen enmascarada (con el fondo eliminado) se realiza una normalización local de la imagen en escala de grises en base a filtros gaussianos. Luego de la normalización local, se aplica un Filtro de Coherencia [63], mediante el cual se realiza un proceso de difusión anisotrópica de la imagen en escala de grises eliminando el ruido de la imagen y preservando los bordes conformantes de la huella, removiendo también cortes inesperados en las líneas. El proceso es iterativo, obteniendo cada vez imágenes más suaves. Cada una de estas imágenes es el resultado de la convolución de la imagen y un filtro Gaussiano isotrópico bidimensional. Para extraer las crestas de la huella perfectamente, la imagen debe ser binarizada

mediante un algoritmo de umbralización adaptiva que, en la imagen dividida en bloques, compara los valores de los píxeles en escala de grises con el valor promedio del bloque de pertenencia. La orientación de la huella dactilar se estima calculando la orientación del flujo local en pequeños bloques de la imagen, calculando los gradientes verticales y horizontales de cada píxel. Posteriormente, se realiza un proceso de adelgazamiento de las líneas, dejándolas de un ancho de un píxel y luego se extraen las minucias de la huella. Eliminando posteriormente las minucias falsas encontradas. La Figura 24 muestra los distintos pasos por los que pasa la imagen capturada para extraer sus minucias.

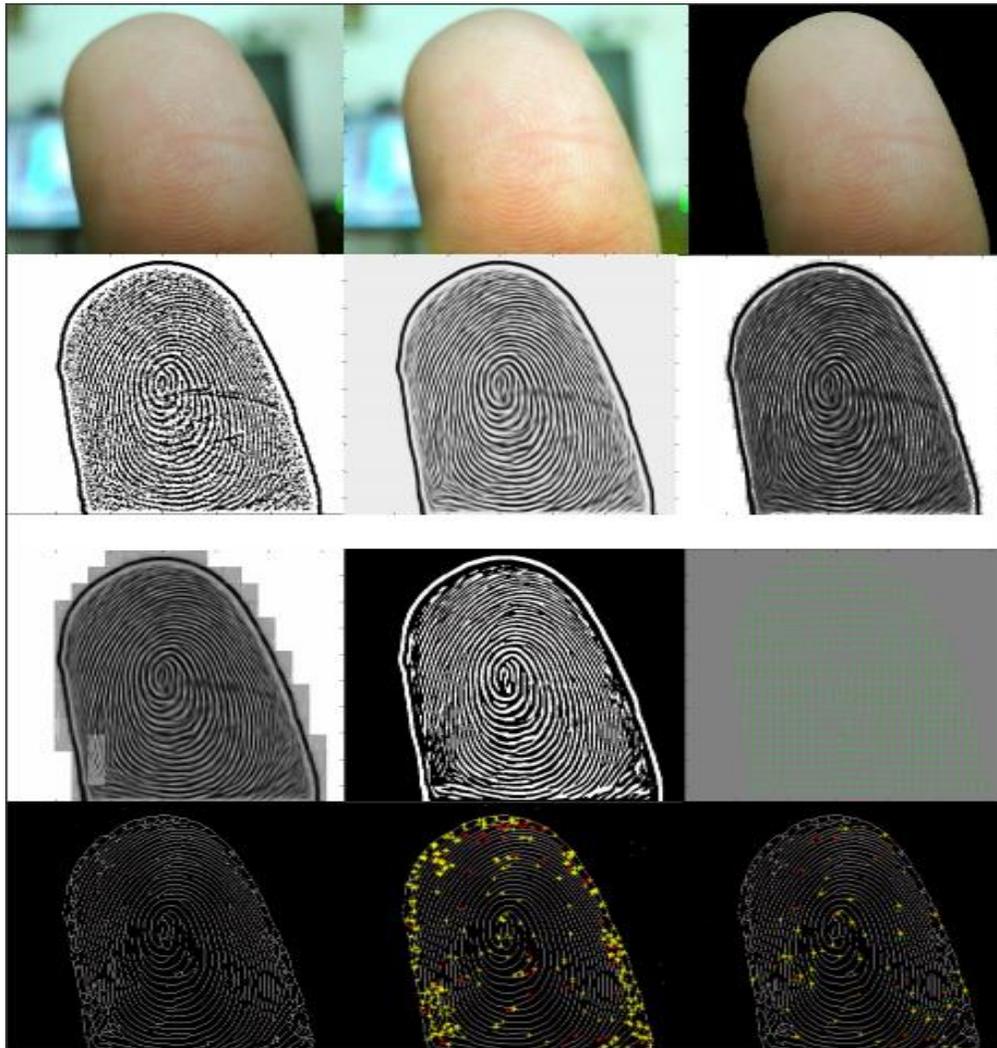


Figura 24: Distintas etapas del procesamiento de la imagen que contiene la huella dactilar. De arriba hacia abajo y de izquierda a derecha la imagen original, el resultado del proceso de normalización de la iluminación, la imagen segmentada luego de la eliminación del fondo, la imagen resultante de la aplicación de filtros gaussianos, la aplicación del filtro de coherencia, el resultado del proceso de mejoramiento de contraste, la imagen binarizada, la imagen con las líneas adelgazadas, la determinación de la orientación de la imagen, la extracción de minucias y la eliminación de falsas minucias. Foto tomada de [61].

En base a los aspectos mencionados anteriormente en la contextualización del proyecto de título, es posible señalar la importancia del trabajo a desarrollar. En primer lugar, se utilizará como sensor para capturar la huella un tipo muy poco empleado en la bibliografía, como lo es una

cámara digital. Más aún, el sistema se intentará implementar completamente en un dispositivo móvil, minimizando los equipos utilizados actualmente para la identificación de personas, pues el contar con varios de ellos funcionando a la vez produce un mayor consumo energético y resulta poco práctico.

Capítulo 3: Metodología de Trabajo

3.1 Antecedentes Generales

A partir de los antecedentes entregados en el capítulo anterior, en el presente se describirá la metodología que permitirá desarrollar el proyecto.

El objetivo principal de este trabajo de título corresponde a lograr capturar una huella dactilar sin la necesidad de contar con un sensor especializado, sino, más bien, reemplazarlo por una imagen capturada con un dispositivo *Android*, ya sea un *Smart Phone* o un *Tablet*. Posteriormente se plantea la necesidad de realizar el procesamiento de la imagen y extraer las características necesarias para un subsecuente reconocimiento de la identidad de un individuo. A partir de esto, es posible definir, en forma general, los siguientes 3 pasos:

1. Realizar una revisión de los métodos que emplean una cámara como sensor para capturar huellas dactilares, comprobando cuáles son las principales dificultades del problema y las simplificaciones que se deben realizar.
2. Subdividir el proyecto en etapas de implementación. Definiendo además las herramientas a utilizar para su resolución.
3. Estudiar la factibilidad de implementar el desarrollo completo en un dispositivo móvil o apoyar el desarrollo con la utilización de un computador. Esto, validando la implementación mediante criterios simples.

3.2 Revisión de métodos, dificultades del problema y simplificaciones

La revisión planteada es la presentada en la última parte del Capítulo 2: Revisión Bibliográfica, en la sección 2.4 Reconocimiento de huellas dactilares usando cámaras como sensor. En ella se definen una serie de dificultades propias del proyecto a desarrollar, que tienen que ver tanto con las condiciones del ambiente de trabajo como con las limitaciones del hardware a utilizar, las cuales de una u otra forma enmarcan la metodología empleada. Considerando dichos factores (para mayor detalle revisar la sección 2.4) se establecen los siguientes aspectos:

- Imágenes para pruebas de funcionamiento y construcción de una base de datos de trabajo.
- Definición de condiciones de iluminación.
- Limitaciones de la capacidad de enfoque y flash en el dispositivo móvil.
- Necesidad de valorar la calidad de la imagen capturada.
- Normalización de distorsiones geométricas en la imagen.

3.2.1 Imágenes para pruebas de funcionamiento y construcción de una base de datos de trabajo

Para la realización de pruebas de funcionamiento, como no se dispone de una base de datos estándar para la resolución de este tipo de problemas, se define que para cada etapa se efectuarán diversas pruebas ad-hoc a ellas, es decir, dependiendo de las necesidades de la misma. Sin embargo, para efectos de poder presentar resultados de la etapa de comparación de huellas, se debe construir una colección de imágenes.

Se define la construcción de una colección de 120 imágenes correspondientes a 24 dedos, con 5 muestras de cada uno. No se establece una condición ambiente estándar para las imágenes capturadas, pudiendo tener cualquier fondo, mientras el dedo aparezca en primer plano. Así mismo, tampoco se establece una condición de iluminación estándar, ni una distancia fija (dependerá de la factibilidad de poder fijar el foco a determinada distancia) a la cámara, la cual corresponderá, a priori, a una cámara con resolución de 13 M.P. Cada imagen es capturada tomando en cuenta las etapas del proyecto correspondientes a la adquisición de fotografías y haciendo uso de un *Smart Phone* con el led (flash del dispositivo) encendido en forma constante y con el dedo en una posición distinta cada vez. Estas imágenes servirán para presentar resultados del trabajo realizado y no obedecen al cumplimiento de un objetivo relacionado con la confección de una base de datos estándar. Por ahora no se contempla la ampliación de esta colección de imágenes para crear una base de datos. La Figura 25 muestra un ejemplo de las imágenes capturadas.



Figura 25: A la izquierda imagen conformante de la Base de Datos Inicial para valorar los métodos a emplear. A la derecha un acercamiento a la misma imagen, donde es posible observar la huella dactilar viva de la persona.

3.2.2 Definición de condiciones de iluminación

Independiente del dispositivo a utilizar, el hecho de ser un sistema móvil implica la posibilidad de ser empleado por el usuario bajo diversas condiciones de iluminación, aspecto crítico para todo sistema de reconocimiento basado en imágenes. Esta gran cantidad de condiciones influyen directamente en el desempeño de cualquier solución propuesta. Como se verá en las secciones posteriores de este documento, para realizar la detección del dedo en la imagen, es necesario fijar parámetros que dependen de la iluminación ambiente, por lo que será un factor importante a considerar.

3.2.3 Limitaciones de capacidad de enfoque y flash en el dispositivo móvil

Tanto el flash, que permite de cierta forma estandarizar las condiciones de iluminación siempre y cuando el fondo de la imagen no sea muy complejo (caso en el que puede tener el efecto de empeorarla), como la capacidad de enfoque, corresponden a los factores que permiten establecer en qué dispositivos es factible o no implementar los métodos para resolver el problema.

La capacidad de enfoque corresponde al factor más importante, pues un dispositivo con una baja capacidad de enfoque no podrá tomar fotografías de calidad suficiente, independiente de la complejidad de la imagen o las condiciones de iluminación. Existe una gran cantidad de dispositivos móviles disponibles en el mercado y no es tema del presente trabajo realizar una investigación de sus características ni un estudio comparativo de su idoneidad en lo que respecta a la solución del problema planteado. Por simplicidad y disponibilidad, se escoge, para la realización de pruebas, el uso de un *Smart Phone* marca Avvio, modelo 792, un *Smart Phone* marca Samsung, modelo Galaxy S3 y un *Smart Phone* marca Huawei, modelo G-Play Mini.

Con respecto al uso de flash, se establece como parte del hardware necesario para poder realizar las pruebas de funcionamiento. Es así como también se usa en el proceso de captura de las imágenes conformantes de la Base de Datos citada en la sección 3.2.1.

Tanto los tipos de flash, como los modos de enfoque disponibles dependerán del hardware del dispositivo y de la versión de Android con la que cuenta. Luego, considerando esto, las posibilidades son cuantiosas, por lo tanto se manejan 3 opciones de enfoque, las cuales parecen ser las más comúnmente presentes en los dispositivos: autoenfoco de imagen, enfoque continuo de imagen y enfoque fijo a una distancia previamente determinada, opción menos común que las anteriores, por lo que, si bien resultaría ideal utilizarla a una distancia de, por ejemplo, unos 15 cm. para evitar problemas en la captura de la huella, se maneja como una alternativa poco factible de emplear. Con respecto al flash, las posibilidades son menos variadas que con el enfoque y para este se establece como requisito que el led pueda encenderse, mantenerse encendido por un tiempo (*torch*²) y luego apagarse, para lo cual se necesita únicamente la presencia del led dentro del hardware disponible.

3.2.4 Necesidad de evaluar la calidad de la imagen capturada

Para poder extraer la huella dactilar, la imagen debe tener un detalle que permita observar las crestas y valles conformantes de dicho patrón biométrico. Con esta consideración es que se estudiarán dos métodos que permitan evaluar la calidad de la imagen capturada: la medición del nivel de nitidez de la imagen a partir de su densidad de bordes (sección 2.4) y la medición del Factor Global de Contraste (GCF) de la imagen [64].

3.2.4.1 Medición del nivel de nitidez de la imagen usando la densidad de bordes

A partir de la revisión hecha en la sección 2.4, se utilizará la medición del nivel de nitidez a través de la “densidad de bordes” para aceptar o rechazar una imagen. Esta densidad de bordes se calcula en una porción central (50x50 píxeles) sobre el canal Rojo de la imagen RGB, filtrada

² Dentro de los nombres predefinidos de Android para los modos de flash, mantener el led encendido por un tiempo se denomina “Torch”. Esta es la opción que utilizan, por ejemplo, las aplicaciones que usan el flash como una linterna.

previamente con un detector de bordes del tipo Sobel. Como se indica en la ecuación 2.3, la expresión matemática de la densidad de bordes es:

$$ED_I = \frac{1}{M \times N} \sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N E(x, y) \quad (2.3)$$

Dónde:

- $E(x, y)$: magnitud del gradiente del pixel (x, y) de la imagen de bordes.
- M : número de columnas de la imagen de bordes.
- N : número de filas de la imagen de bordes.

Para aceptar o rechazar una imagen, se fijará, mediante la experimentación, un valor umbral de esta métrica que permitirá objetar imágenes donde no sea posible extraer una huella dactilar.

No se tienen antecedentes de rangos de valores de la densidad de bordes que permitan aceptar o rechazar una imagen.

3.2.4.2 Medición del Factor Global de Contraste (GCF) de la imagen

Una alternativa a la medición anterior corresponde al método presentado en [64]. Si bien en el procesamiento de imágenes se entiende el concepto de contraste como una relación entre los tonos oscuros y tonos claros observados, en dicho trabajo se introduce el concepto de Factor Global de Contraste (GCF) más bien ligado a la percepción del contraste de la imagen en distintas resoluciones. Para el cálculo de este factor se definen los conceptos de contraste local, referido al contraste de cualquier porción (recuadro interior) de una imagen, y de contraste global, que no es otra cosa que el promedio de los contrastes locales de distintas fracciones de la imagen. El procedimiento indicado para el cálculo del GCF es el siguiente:

- a) En primer lugar se introducen los conceptos de Luminancia lineal y Luminancia perceptiva:

Denotando al valor del pixel de la imagen como k con $k \in \{0, 1, \dots, 255\}$, se define la Luminancia lineal de dicho pixel como:

$$l = \left(\frac{k}{255}\right) \gamma \quad (3.1)$$

Dónde:

- l : Luminancia lineal del pixel k .
- γ : Factor de corrección con un valor de 2.2.

A partir de la Luminancia lineal, se define la Luminancia perceptiva del pixel de valor k mediante la siguiente ecuación:

$$L = 100\sqrt{l} = 100\sqrt{\left(\frac{k}{255}\right) \gamma} \quad (3.2)$$

Dónde:

- L : Luminancia perceptiva.

b) Utilizando estos conceptos y en un proceso iterativo, se calcula el Contraste local de la imagen en diferentes resoluciones, la cual se reduce en cada paso tomando, cada 4 pixeles, el promedio de su valor y asignándolo al nuevo pixel de la imagen de resolución reducida, de manera que cada vez la imagen reduce a la mitad su resolución. A partir de la imagen original y en cada una de estas imágenes de menor resolución se realiza el siguiente procedimiento:

- Considerando una imagen de w pixeles de ancho y h pixeles de alto, la imagen se reordena como un arreglo unidimensional que contiene todas las filas concatenadas y sin traslape. Luego, el contraste local del pixel i estará dado por:

$$l_{C_i} = \frac{|L_i - L_{i-1}| + |L_i - L_{i+1}| + |L_i - L_{i-w}| + |L_i - L_{i+w}|}{4} \quad (3.3)$$

Dónde, si nos remontamos a la imagen previa al reordenamiento, se toman en cuenta los pixeles ubicados a la izquierda, a la derecha, arriba y abajo del pixel i :

- L_i : Luminancia perceptual del pixel i .
- L_{i-1} : Luminancia perceptual del pixel ubicado a la izquierda del pixel i .
- L_{i+1} : Luminancia perceptual del pixel ubicado a la derecha del pixel i .
- L_{i-w} : Luminancia perceptual del pixel ubicado arriba del pixel i .
- L_{i+w} : Luminancia perceptual del pixel ubicado abajo del pixel i .
- l_{C_i} : Contraste local del pixel i .

- Entonces, el Contraste promedio local de la imagen se calcula como:

$$C = \frac{1}{w \cdot h} \sum_{i=1}^{w \cdot h} l_{C_i} \quad (3.4)$$

Dónde:

- C : Contraste promedio local de la imagen.

- El procedimiento se repite N veces para la imagen con una resolución reducida, cada vez, a la mitad de la resolución anterior, lo cual se obtiene tomando el valor del nuevo pixel como el promedio de bloques de 4 pixeles de la resolución anterior.
- De esta forma es posible calcular el Factor de Contraste Global según la siguiente ecuación:

$$GCF = \sum_{j=1}^N w_j C_j \quad (3.5)$$

Dónde:

- GCF : Factor de Contraste Global de la imagen.
- C_j : Contraste promedio local de la imagen j – ésima.
- w_j : Factor de ponderación de la resolución.

Tanto el valor de los factores de ponderación como el número de resoluciones empleadas para cada imagen son determinados en forma empírica en [64], llegando a un óptimo de $N = 9$ y para los factores de ponderación:

$$w_j = \left(-0.406385 \cdot \frac{j}{9} + 0.334573\right) \frac{j}{9} + 0.0877526 \quad (3.6)$$

El valor del Factor Global de Contraste depende del problema a resolver y, de lo que se puede observar en el trabajo citado, no tiene un rango de valores definido. A modo de ejemplo, se presenta Figura 26, con tres imágenes totalmente distintas y su respectivo GCF.



Figura 26: Tres imágenes con distinto valor de GCF. De izquierda a derecha sus GCF corresponden a 0.711, 3.511 y 8.493. Imagen tomada de [64].

3.2.5 Normalización de distorsiones geométricas en la imagen

El usuario puede disponer el dedo a capturar con cualquier ángulo de orientación, con cualquier ángulo de inclinación y en cualquier posición. Como existen muchas poses potenciales, esto puede constituir un problema y se debe hacer un proceso de normalización, una vez encontrado el dedo dentro de la imagen (la secuencia de pasos a seguir para llegar a la etapa de corrección de la pose se indica en la sección 3.3 Etapas del proyecto y métodos a utilizar).

Con la imagen aceptada según el criterio de nitidez, se abordarán dos problemas en la pose del dedo: variaciones en el ángulo de orientación y área del dedo a utilizar para extraer la huella dactilar.

3.2.5.1 Variaciones en el ángulo de orientación

Se considera la aplicación de un ángulo de corrección sobre la imagen, de manera que el dedo capturado quede en posición vertical. Para esto se analizan dos opciones, explicadas a continuación.

Una primera alternativa es calcular el ángulo de orientación según lo indicado en la ecuación 2.4 de la sección 2.4. El procedimiento empleado para su determinación corresponde a la aplicación de los siguientes pasos:

- Se fijan dos puntos dentro del dedo previamente encontrado: P_1 y P_2 , estando este último en la misma coordenada horizontal, pero abajo en la coordenada vertical. La distancia entre ambos puntos se denomina P_y .

- Se hace un seguimiento de color horizontalmente desde P_1 hasta el límite de la piel encontrada. A la distancia entre P_1 y el punto de intersección encontrado, se le denomina P_{1x} .
- Se hace un seguimiento de color horizontalmente desde P_2 hasta el límite de la piel encontrada. A la distancia entre P_2 y el punto de intersección encontrado, se le denomina P_{2x} .
- El ángulo de corrección se calcula según la ecuación 2.4, presentada en la Sección 2.4.

$$\alpha = \text{atan}\left(\frac{P_y}{P_{2x} - P_{1x}}\right) \quad (2.4)$$

- La corrección de la orientación se efectúa utilizando como Factor de Corrección (FC):

$$FC = \text{SIN}(\alpha) \quad (3.7)$$

Como opción al método anterior se establece un procedimiento alternativo de carácter más exhaustivo con respecto al análisis efectuado en la imagen. Dicho procedimiento considera los siguientes pasos aplicados sobre la imagen en escala de grises:

- Recorrido horizontal de los pixeles de la imagen enmascarada utilizando la piel encontrada, es decir, sin el fondo y sólo con el dedo, para determinar los bordes del mismo. Un pixel se determina como parte del borde de la imagen si existe un cambio de color blanco (fondo) a nivel de gris (dedo) o viceversa. De esta forma se encuentran los bordes tanto a la izquierda como a la derecha del dedo. El mismo recorrido se realiza en forma vertical para hallar los ubicados en la parte superior e inferior del dedo³.
- Se establecen los puntos medios entre los bordes de la izquierda y su respectivo borde derecho, y entre los bordes superiores y los respectivos bordes inferiores.
- Para la colección de puntos medios de los bordes izquierdo y derecho se realiza una regresión lineal de manera tal que se obtengan ecuaciones de la recta que aproximen dichos puntos. Lo mismo para los puntos medios de los bordes superior e inferior.
- Una vez obtenidas estas ecuaciones se calcula el error de ambas rectas respecto a las coordenadas de los puntos medios.

³ La denominación de borde a la izquierda, derecha, superior o inferior, obedece a la forma en la que se encuentra dicho borde al analizar los cambios de blanco a nivel de gris. En dicho sentido, si durante el análisis horizontal la imagen se revisa de izquierda a derecha y se encuentra un cambio de blanco a gris, este se denominará borde izquierdo, y si el cambio es de gris a blanco, este se denominará como borde derecho; en cambio, si los puntos se encuentran en el recorrido vertical, de arriba hacia abajo, si el cambio detectado es de blanco a gris el punto se marca como un borde superior, mientras que si el cambio es de gris a blanco, este se enlista como borde inferior. Lo anterior siempre conservando como puntos de borde los encontrados más externamente, considerando que la superficie del dedo corresponde a una superficie cerrada, es decir, cóncava (esto por si hubiese existido un problema en el paso de enmascarar la imagen utilizando la piel encontrada, derivado de no haber obtenido la totalidad de la piel en el proceso de detección).

- Teniendo como base el hecho de que los dedos presentan una simetría aproximada respecto a un eje situado longitudinalmente, se considera que la recta que presenta un menor error de aproximación corresponderá a dicho eje de simetría.
- Considerando el eje de simetría encontrado, se calcula su ángulo

$$\alpha = \text{atan}(m) \quad (3.8)$$

Dónde:

- *m*: Pendiente de la recta encontrada mediante la regresión lineal de los puntos encontrados.

- Se aplica el factor de corrección sobre la imagen en relación al ángulo encontrado.
- Se realiza una nueva estimación del ángulo y, si este presenta una diferencia sustancial (valor señalado en la sección de implementación y resultados) respecto al eje vertical (ángulo de 90°), se vuelve a realizar la corrección.

3.2.5.2 Área del dedo que contiene la huella dactilar

El área del dedo que contiene la huella dactilar sólo corresponde al primer tercio de este. Sin embargo, dentro de la imagen puede aparecer un área mucho mayor, ya sea por el posicionamiento que hace el usuario o por las limitaciones de distancia de enfoque del dispositivo móvil. Por esto, si el largo es mucho mayor que el ancho, se remueve el extremo inferior de la imagen manteniendo una proporción definida entre ambas medidas.

Junto con lo anterior, debido a que el dedo puede ser ubicado a una distancia variable desde la cámara, se considera la aplicación de un escalamiento de la imagen de manera de dejar el dedo encontrado de un tamaño estándar.

3.3 Etapas del proyecto y métodos a utilizar

Para llevar a cabo el proyecto en forma completa, este se puede dividir en distintas etapas:

- Detección de la presencia de un dedo en la imagen.
- Captura, corrección de pose y estimación de la calidad de la imagen.
- Extracción de la huella dactilar viva.
- Extracción de minucias a partir de la huella dactilar obtenida.
- Con la finalidad de obtener resultados comparativos, se define una quinta etapa del proyecto, correspondiente a la aplicación de un algoritmo de comparación de imágenes que permita aceptar o rechazar la identidad de un individuo en base a la imagen de huella dactilar obtenida mediante el dispositivo móvil. Esto en forma independiente a la extracción de minucias.

3.3.1 Detección de la presencia de un dedo en la imagen

En forma previa a la captura de la imagen, el sistema a implementar deberá ser capaz de detectar la presencia de un dedo en la escena y ubicarlo en la misma. Esto en la imagen de previsualización de la cámara. En la sección 2.4 se hace referencia a métodos que emplean el análisis del canal Rojo de la imagen en formato RGB con estos fines, sin embargo se decide

implementar un método más robusto para la detección de piel en la imagen, y que a la vez no requiere una gran cantidad de recursos computacionales, pensando en su implementación en el dispositivo móvil.

El método considerado corresponde a la Aplicación de Modelos Estadísticos de Color a la Detección de Piel [65], el cual permite clasificar cada pixel como piel o no piel en base a modelos probabilísticos obtenidos para ambas clases. Este método recibe como entrada una imagen a color de 3 canales en formato RGB y cada pixel es etiquetado como piel si se cumple que:

$$\frac{P(rgb|piel)}{P(rgb|no\ piel)} \geq \theta \quad (3.9)$$

Donde $0 < \theta < 1$ es un valor umbral que se puede ajustar según los requerimientos del sistema, y tanto $P(rgb|piel)$ como $P(rgb|no\ piel)$ son probabilidades estimadas mediante modelos de múltiples gaussianas entrenados para ambas clases. Esta función de densidad de probabilidad es expresada como la suma de kernels gaussianos según la siguiente ecuación:

$$P(x) = \sum_{i=1}^N \omega_i \frac{1}{(2\pi)^2 |\Sigma_i|^2} e^{-\frac{1}{2}(x-\mu_i)^T \Sigma_i^{-1} (x-\mu_i)} \quad (3.10)$$

Donde x es un vector de color RGB y la contribución de la i – ésima gaussiana es determinada por un peso escalar ω_i , el vector de medias μ_i y la matriz de covarianza diagonal Σ_i .

3.3.2 Captura, corrección de pose y estimación de la calidad de la imagen

Con el dedo ya detectado en la imagen de previsualización de la cámara, se debe pasar a la captura de la imagen. Los pasos a seguir son los siguientes:

1. Se crea una máscara de imagen a partir del resultado de la detección de piel previamente realizada. Sobreponiendo esta máscara en la imagen original es posible eliminar el fondo.
2. Se aplican los procedimientos de corrección de la pose del dedo, es decir, la corrección del ángulo de rotación (ver sección 3.2.5.1) y la selección del área que contiene la huella dactilar junto con el escalamiento de tamaño (ver sección 3.2.5.2). Para realizar la corrección del ángulo de rotación, primeramente se transforma la imagen de colores en formato RGB a escala de grises.
3. Se debe efectuar la valoración de la calidad de la misma analizando su nitidez, como se indica en la sección 3.2.4. En esta medición de nitidez tendrá influencia directa la calidad del enfoque.
4. Si se encontró la presencia de un dedo frente a la cámara y si la imagen es lo suficientemente clara, esto es, permite realizar el procesamiento necesario para extraer la huella dactilar, se acepta la imagen y se pasa a las etapas siguientes, de lo contrario es necesario volver a capturar una nueva imagen.

3.3.3 Extracción de la huella dactilar viva

Con la imagen capturada, recortada y enmascarada conteniendo el dedo en posición vertical, se debe extraer la huella dactilar presente en el dedo (huella dactilar viva). El método a utilizar es el

seguido en [61] y que fue descrito en la sección 2.4. Así, el procedimiento a realizar es el siguiente:

1. Transformación de la imagen a escala de grises (realizada en el proceso de corrección de ángulo de rotación del dedo), si no ha sido transformada previamente. Esto permite disminuir el procesamiento de la imagen al reducir los canales de la misma de 3 a sólo 1.
2. Normalización de la imagen en escala de grises para reducir las diferencias en la iluminación. Esto porque, inclusive bajo condiciones controladas, la forma del dedo produce diferencias en la iluminación de sus distintas áreas, las cuales se pueden ver acentuadas debido a la utilización del flash de la cámara del dispositivo móvil.
3. Aplicación del algoritmo Filtro de Coherencia. Consistente en un proceso de difusión anisotrópica de la imagen en escala de grises eliminando el ruido de la imagen y preservando los bordes conformantes de la huella, removiendo también cortes inesperados en las líneas. El proceso es iterativo, obteniendo cada vez imágenes más suaves. Cada una de estas imágenes es el resultado de la convolución de la imagen y un filtro Gaussiano isotrópico bidimensional. En forma iterativa y fijando previamente un tiempo de difusión, los pasos a seguir son:
 - a) La imagen se suaviza mediante la aplicación de un Filtro Gaussiano.
 - b) Cálculo del Hessiano de la imagen suavizada.
 - c) Suavizado Gaussiano del Hessiano y cálculo de sus valores y vectores propios.
 - d) Los vectores propios son usados como direcciones de los tensores de difusión. La amplitud de la difusión se basa en los valores propios y se determina mediante la ecuación de Weickerts [66].
 - e) Se usa un esquema de diferencias finitas para hacer la difusión.
 - f) Se regresa al punto (a) hasta que se cumpla con el tiempo de difusión fijado previamente.

Más detalles de este método se pueden observar en el “Anexo A: Filtro de Coherencia”.

4. Mejora de la huella obtenida. La aplicación del Filtro de Coherencia produce una huella notoria, pero un tanto difusa, por lo que resulta necesario utilizar otra herramienta en forma posterior para obtener una imagen binaria, es decir, en blanco y negro. Para estos efectos se realizará un umbralizado adaptivo consistente en la comparación de cada pixel con un valor determinado como el promedio de la vecindad de pertenencia del pixel suavizada con un filtro gaussiano.

3.3.4 Extracción de minucias a partir de la huella obtenida

Con la huella dactilar viva ya obtenida a partir de la imagen, se deben extraer las características utilizadas para el reconocimiento de identidad, es decir, las minucias. En la sección 2.3.4 se describen algunos métodos utilizados para la detección de minucias. Se opta en este proyecto por trabajar sobre la imagen binarizada, a la cual se le realiza un proceso de adelgazamiento que permite dejar las líneas de la huella con un ancho de 1 pixel, para luego, usando el método de *Crossing Number* (ver sección 2.3.4.1.1), identificar las minucias presentes.

3.3.5 Comparación de huellas dactilares obtenidas

En la mayor parte de los sistemas de verificación de identidad donde se utilizan huellas dactilares, el paso posterior a la adquisición de la huella corresponde a la comparación con otra huella, normalmente perteneciente a una base de datos.

En la sección 2.3 se presentó una clasificación de diferentes técnicas utilizadas para el reconocimiento de personas en base a huellas dactilares. Dentro de los métodos basados en patrones se mencionó el uso de la Transformada de Características de Escala Invariante (SIFT) [67] la cual permite detectar puntos de interés y calcular descriptores en el vecindario de dichos puntos, que se utilizan para efectuar una comparación entre huellas.

Debido que las características encontradas son invariantes tanto a rotaciones como a diferentes escalamientos de la imagen, es posible realizar este proceso de comparación sin usar las minucias. En el presente trabajo se realizará la comparación de huellas dactilares usando esta técnica.

A grandes rasgos, el algoritmo SIFT consta de 4 pasos: detección de posibles puntos de interés invariantes a escala y orientación mediante la aplicación de la diferencia gaussiana sobre la imagen en diferentes tamaños; localización de los puntos que se mantienen en los cambios de escala de la imagen analizando cada pixel comparándolo con sus pixeles vecinos, parte de este paso es la eliminación de los bordes de la imagen; se asigna una dirección a cada punto de interés encontrado mediante el cálculo de la magnitud y dirección del gradiente de su zona vecina; para el área a la que pertenece el punto de interés se crean descriptores que contienen la orientación de sub bloques del vecindario de pertenencia. La correspondencia entre dos puntos de interés de dos imágenes se obtiene buscando el punto más cercano en el espacio de los descriptores. El criterio de decisión de aceptar o rechazar el reconocimiento se tomará a partir del número de coincidencias encontradas.

3.4 Estudio de factibilidad de implementación en un dispositivo móvil

Resulta necesario discernir acerca de la posibilidad de implementar el sistema completo en el dispositivo móvil o, si es necesario, implementar sólo una parte de los algoritmos en él y el resto en un computador. La metodología para tomar esta decisión consiste en la implementación de los algoritmos primero en forma separada (cada etapa por separado) en el dispositivo para analizar su factibilidad. El criterio principal corresponde al tiempo de ejecución, aspecto fundamental en aplicaciones en dispositivos móviles.

Es así como, según se verá en el Capítulo 4: Resultados y Análisis, del presente documento, el método escogido para la segmentación de la huella dactilar a partir de la imagen del dedo, resulta de un alto costo computacional y, por ende, con un tiempo de procesamiento prohibitivo para aplicaciones en dispositivos móviles.

Así mismo, también se debe establecer si el dispositivo móvil resulta útil para obtener una imagen lo suficientemente detallada para encontrar la huella dactilar. Previo a la medición de los índices previamente explicados para evaluar la calidad de una imagen, resulta necesario hacer un análisis exploratorio de las características de la cámara del dispositivo observando las imágenes que se pueden obtener con ella con sus distintos modos de enfoque y resoluciones disponibles, y así determinar si resulta factible de emplear para los usos requeridos.

3.5 Esquema resumen del algoritmo a implementar

El esquema de la Figura 27 resume las distintas etapas conformantes del sistema diseñado, de cuya implementación en forma secuencial se da cuenta a continuación, en el Capítulo 4: Resultados y Análisis

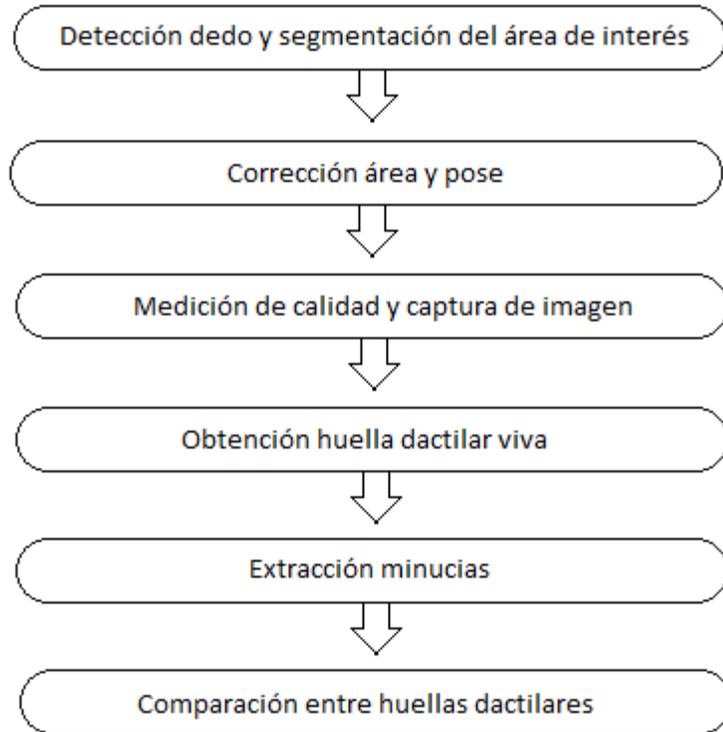


Figura 27: Esquema resumen de las etapas del algoritmo a implementar en el desarrollo del proyecto.

Capítulo 4: Resultados y Análisis

De acuerdo a lo planteado en el capítulo previo, el objetivo de este apartado es presentar los detalles y resultados de la implementación de cada una de las etapas definidas en este trabajo. Así mismo, se analizan estos resultados.

En primer lugar se presentan los antecedentes generales donde se enmarcan la implementación descrita y los resultados obtenidos.

La sección 4.2 da cuenta de la etapa inicial del sistema desarrollado, correspondiente a la detección del dedo frente a la cámara del dispositivo móvil y la eliminación del fondo de la imagen.

El título 4.3 describe las modificaciones que se deben realizar a la imagen para posicionar el dedo encontrado en la forma preestablecida para su análisis.

El apartado 4.4 describe la medición de calidad de la imagen para establecer si es factible extraer una huella dactilar de ella y su aceptación para pasar a las etapas siguientes.

El acápite 4.5 presenta la implementación y resultados de la obtención de la huella dactilar a partir de la imagen preprocesada.

El punto 4.6 da cuenta de la etapa de extracción de minucias a partir de la huella dactilar viva encontrada en la etapa previa.

Por último, en la sección 4.7 se observan los detalles de implementación y resultados del proceso de comparación entre huellas dactilares obtenidas mediante el sistema implementado.

4.1 Antecedentes generales

Los algoritmos aplicados para funcionar en el dispositivo móvil con Sistema Operativo Android son programados en lenguaje Java mediante el SDK de Android y el entorno de desarrollo Eclipse. Así mismo, dentro de este mismo entorno se utiliza el paquete de herramientas para el procesamiento de imágenes de OpenCV para Android.

De los dispositivos disponibles, mencionados en la sección 3.2.3, se determinó que el *Smart Phone* marca Avvio, modelo 792 (cámara de 8 MP y baja capacidad de enfoque), no cuenta con las características suficientes para el desarrollo de este proyecto, pues todas las pruebas preliminares de uso de su cámara mostraron imágenes de una calidad insuficiente, sin llegar a lograr el enfoque necesario; mientras que los *Smart Phones* Samsung, modelo Galaxy S3 (cámara de 8MP y capacidad de enfoque en modo autofocus y enfoque táctil) y Huawei, modelo G-Play Mini (cámara de 13 MP y capacidad de enfoque en modo autofocus y enfoque táctil), resultaron factibles de usar en las pruebas preliminares, es decir, las huellas resultaron notorias en las imágenes tomadas con estos dispositivos. Se utilizó este último *Smart Phone* para la implementación aquí descrita.

Los algoritmos dispuestos para funcionar fuera del dispositivo móvil fueron desarrollados en el entorno Matlab para Windows 7 debido a las facilidades en la depuración de códigos y manejo de imágenes de este entorno.

4.2 Detección dedo y segmentación del área de interés

Como se mencionó en el capítulo correspondiente a la metodología de trabajo, la detección del dedo en la imagen y el proceso de segmentación del mismo para separarlo del fondo presente en la foto, se realizan en base a la aplicación de un algoritmo detector de piel a partir del análisis del color de la imagen.

Un primer paso es fijar el led de la cámara del dispositivo en posición de encendido constante para estandarizar en la mayor medida posible las condiciones de iluminación del ambiente. Un factor en contra de este procedimiento es la posibilidad de producir reflejos que eliminen detalles en algunas zonas del dedo.

En forma previa a la aplicación del algoritmo de detección de piel, como resultado del proceso de experimentación, se determinó la necesidad de desenfocar la imagen para difuminar el color de la misma y así obtener una detección más pareja. Esto se debe a que la forma del dedo no es plana, sino que es una superficie tridimensional y rugosa, lo cual, como resultado del reflejo de la luz, ya sea ambiente o del led, produce oclusiones que no son detectadas como piel por el algoritmo implementado. Estas se producen mayoritariamente al centro de la yema del dedo.

Posterior a la detección de piel se aplican sucesivamente la operación morfológica de dilatación 5 veces y luego la operación morfológica de erosión otras 5 veces, con el fin de recuperar pequeñas zonas útiles que se hayan eliminado, y también para cerrar formas que hayan quedado abiertas (esto apuntando al hecho de que los dedos presentan superficies cerradas, sin aperturas o huecos).

Como medida extra de seguridad para evitar disminuir el rechazo de zonas que sí pertenecen al dedo buscado, debido al hecho de que la forma del dedo es una forma cerrada, es decir, sin espacios internos que no correspondan a él, se establece que si existe alguna detección de color interior que no es reconocida como piel, esta se debe omitir.

Otro problema posible a resolver es que dentro del cuadro de imagen visualizado por la cámara pueden aparecer más objetos semejantes a la piel por su color. Para esto se aplica el supuesto de que el objeto más grande captado corresponderá al dedo, pensando en que el usuario dispondrá de él en primer plano frente a la cámara.

Teniendo las consideraciones antes descritas y a partir de la imagen a color en formato RGB, el algoritmo implementado, correspondiente a la Aplicación de Modelos Estadísticos de Color a la Detección de Piel y que fue descrito en la sección 3.3.1, requirió establecer un valor umbral para decidir, en base a la ecuación 2.9, si cada pixel es o no piel. Dicho valor umbral se fijó en 0.7 probando distintos valores y observando el resultado obtenido.

Como referencia para el usuario, en la pantalla del dispositivo móvil se muestra la previsualización de la cámara (imagen en movimiento) con un recuadro de color rojo que encierra la zona detectada como piel.

La Figura 28 muestra la detección de piel realizada con valores umbral de 0.1, 0.2 y 0.3, en la Figura 29 se observa la detección considerando los umbrales 0.4, 0.5 y 0.6, mientras que en la Figura 30 se observa un ejemplo de la detección usando umbrales con valores de 0.7, 0.8 y 0.9. En las tres figuras se mantuvo el fondo de la imagen, donde además se presentan elementos de

colores que resultan conflictivos en la detección, como lo son el amarillo, el rojo y el café. A medida que se aumenta el umbral, es posible notar como va disminuyendo el área detectada como piel. Es posible notar también cómo sólo se encierra en rojo la región con el área mayor encontrada. Posteriormente, las regiones de menor área son eliminadas. A partir de diversas pruebas como la ejemplificada en las figuras siguientes, se fijó el umbral con un valor de 0.7, como se mencionó anteriormente.

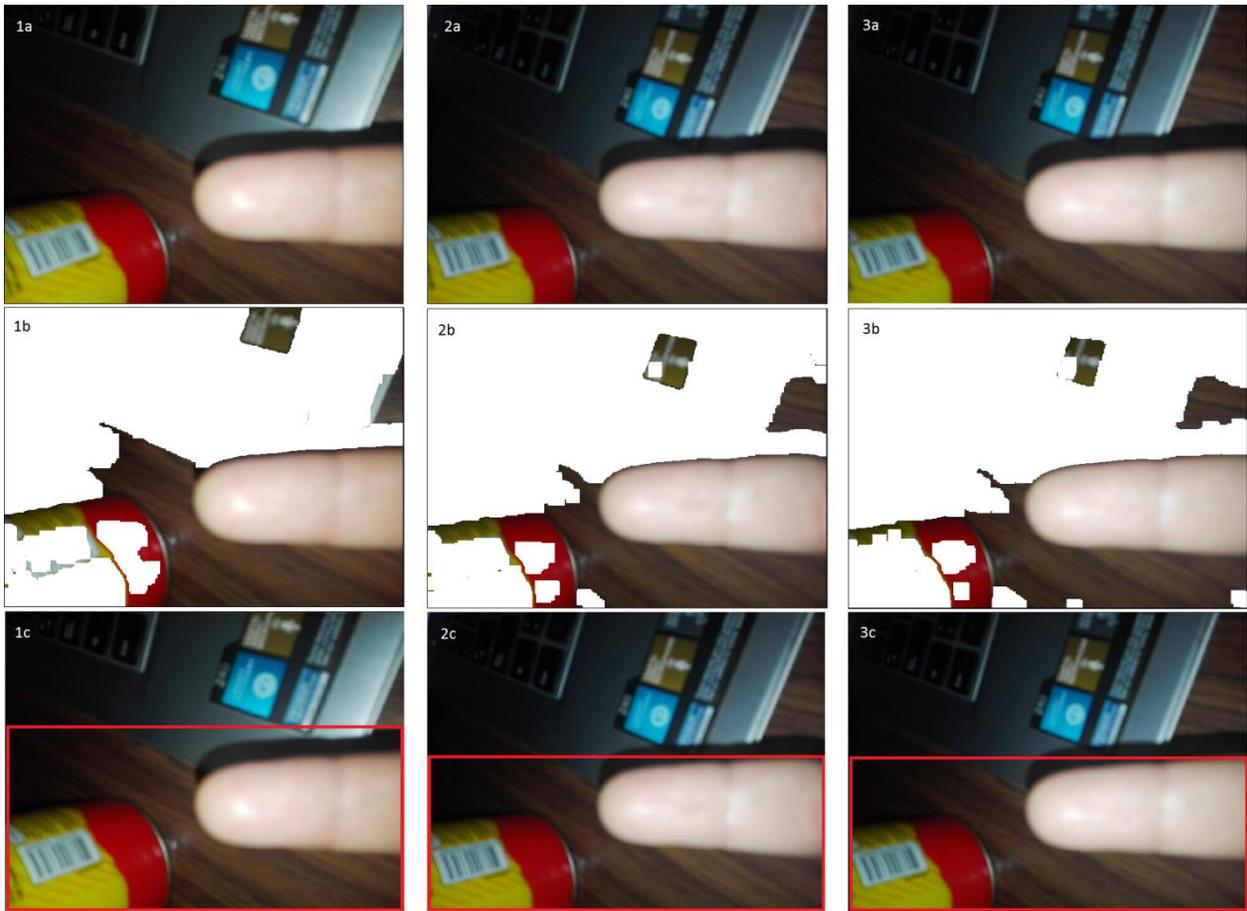


Figura 28: Detección del dedo frente a la cámara mediante detección de piel con valores umbral 0.1, 0.2 y 0.3. De izquierda a derecha, las imágenes marcadas con el número 1 corresponden al valor umbral 0.1, las marcadas con el número 2 corresponden al valor umbral 0.2 y aquellas con el número 3 corresponden al valor umbral 0.3. De arriba a abajo, con la letra “a” se presenta l imagen captada originalmente por la cámara del dispositivo móvil, con la letra “b” el resultado de la detección de piel con el respectivo umbral y con la letra “c” la imagen visualizada inmediatamente después en la pantalla con el recuadro rojo demarcando la zona con la piel encontrada.

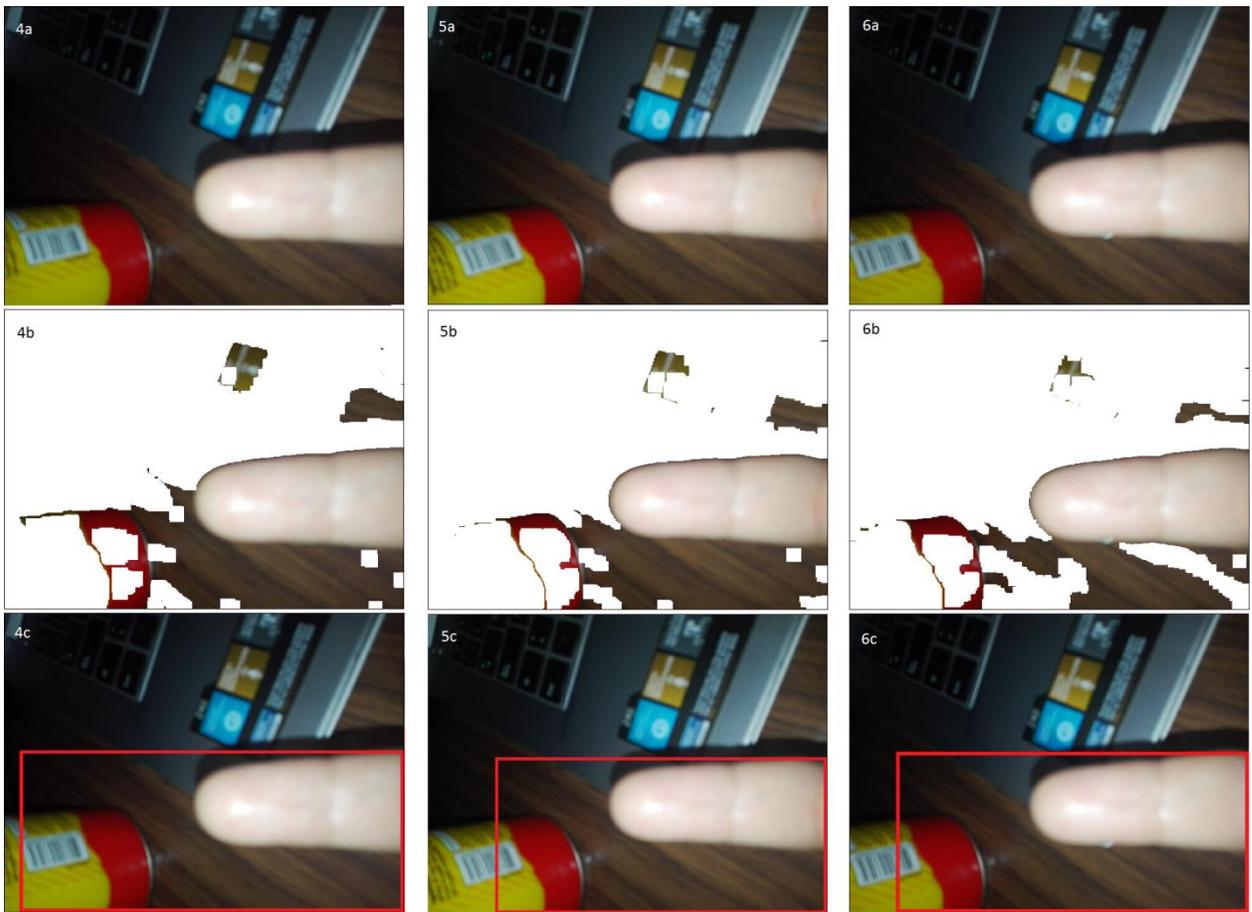


Figura 29: Detección del dedo frente a la cámara mediante detección de piel con valores umbral 0.4, 0.5 y 0.6. De izquierda a derecha, las imágenes marcadas con el número 4 corresponden al valor umbral 0.4, las marcadas con el número 5 corresponden al valor umbral 0.5 y aquellas con el número 6 corresponden al valor umbral 0.6. De arriba a abajo, con la letra “a” se presenta la imagen captada originalmente por la cámara del dispositivo móvil, con la letra “b” el resultado de la detección de piel con el respectivo umbral y con la letra “c” la imagen visualizada inmediatamente después en la pantalla con el recuadro rojo demarcando la zona con la piel encontrada.

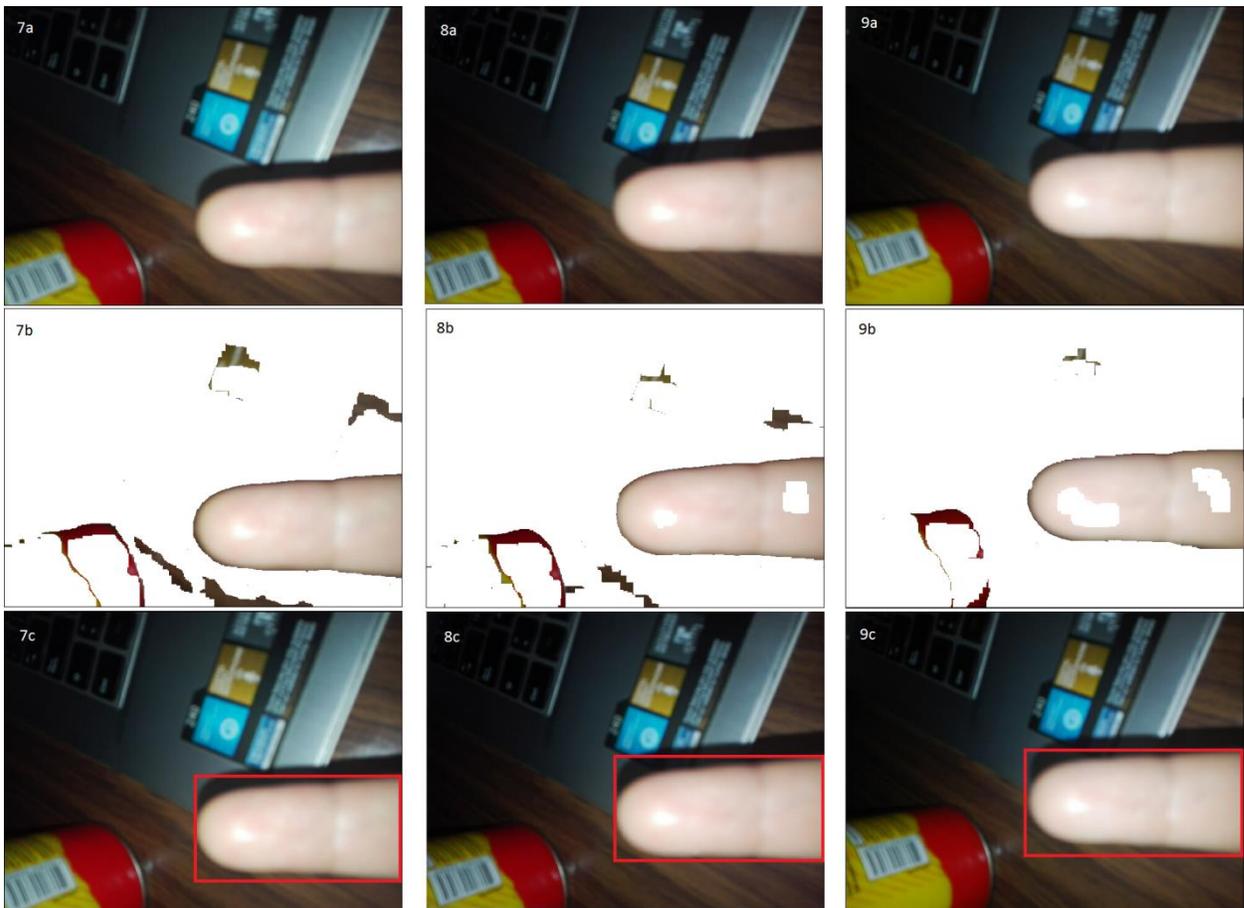


Figura 30: Detección del dedo frente a la cámara mediante detección de piel con valores umbral 0.7, 0.8 y 0.9. De izquierda a derecha, las imágenes marcadas con el número 7 corresponden al valor umbral 0.7, las marcadas con el número 8 corresponden al valor umbral 0.8 y aquellas con el número 9 corresponden al valor umbral 0.9. De arriba a abajo, con la letra “a” se presenta la imagen captada originalmente por la cámara del dispositivo móvil, con la letra “b” el resultado de la detección de piel con el respectivo umbral y con la letra “c” la imagen visualizada inmediatamente después en la pantalla con el recuadro rojo demarcando la zona con la piel encontrada.

Posterior a la detección del dedo, se realiza el proceso de enfoque. Se optó por usar el enfoque automático del dispositivo aprovechando el ambiente de luminosidad creado por efecto del flash, el cual provoca una iluminación del primer plano (en este caso el dedo), y un oscurecimiento del fondo.

En la siguiente imagen es posible observar 3 ejemplos donde primero se encuentra el dedo (con un valor umbral de 0.7 para la detección de piel) y posteriormente se logra su enfoque. El proceso, en resumen, consiste en detectar la piel presente en la imagen (dedo), mostrar al usuario el área donde esta fue encontrada, enfocar el dedo, y segmentar la imagen capturada enmascarándola con el resultado del proceso de detección.

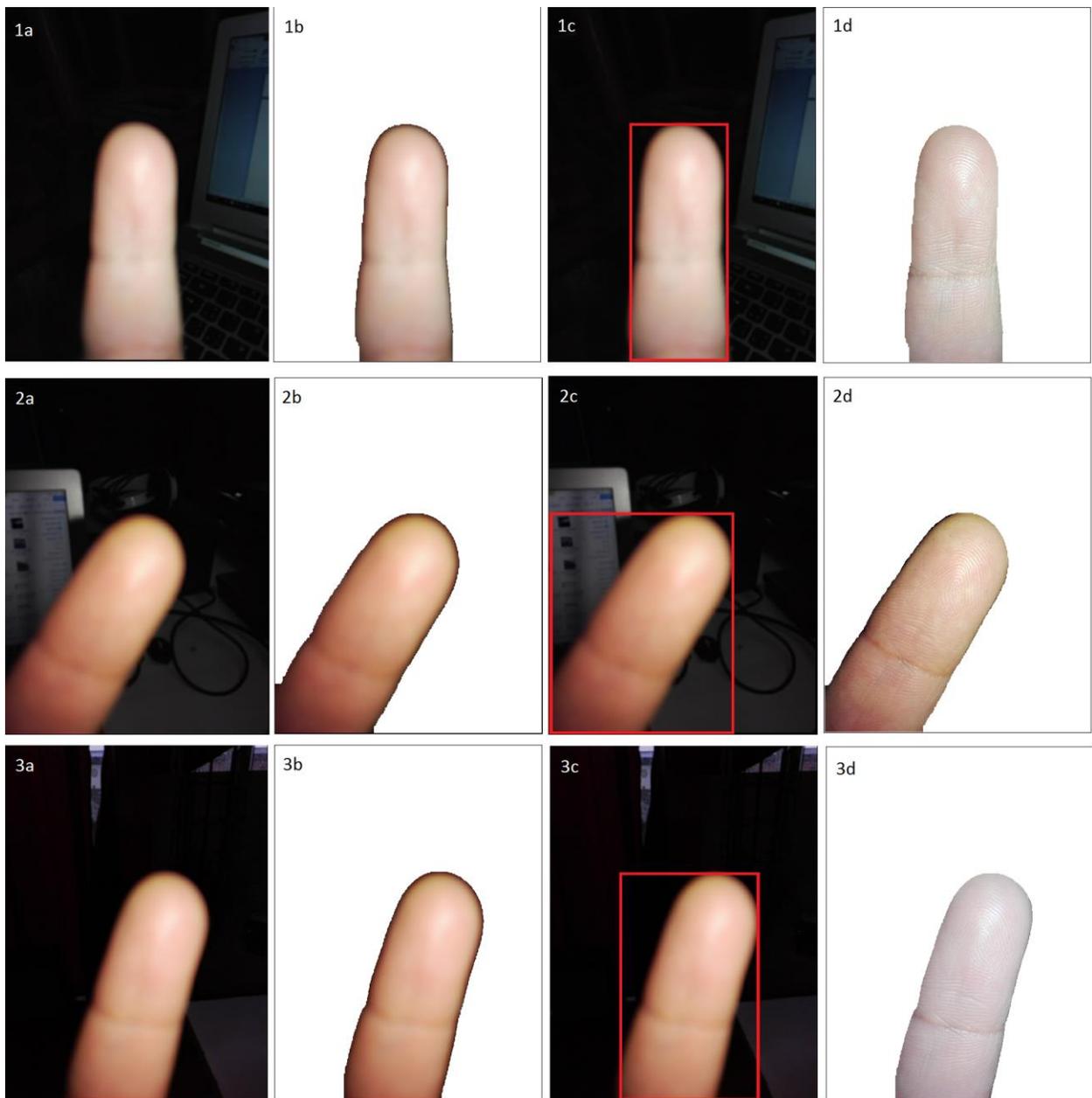


Figura 31: Ejemplos de detección del dedo en la imagen, segmentación mediante el enmascaramiento con el resultado del detector, recuadro mostrado al usuario como referencia y enfoque del dedo encontrado. De arriba abajo los ejemplos 1, 2 y 3. De izquierda a derecha una captura de la imagen en movimiento (imagen de previsulización) captada por el dispositivo, el resultado del proceso de detección de piel, el rectángulo rojo que encierra el dedo encontrado y que es mostrado como referencia al usuario, y el resultado del enfoque y segmentación de la región de interés.

La Figura 32 corresponde a una ampliación del caso 1 de la Figura 31 con el fin de poder notar con claridad el detalle del dedo encontrado y enfocado.



Figura 32: Acercamiento de la figura anterior, imagen 1d, donde se observa el detalle logrado al capturar la imagen con la presencia de un dedo.

La principal dificultad observada es el tiempo que transcurre entre la detección y creación de la máscara, y la captura de la imagen enfocada, pues un movimiento brusco durante estos pasos provoca la pérdida del área correcta del dedo. Esto depende directamente del usuario, lo que pudo notarse en el proceso de construcción de la colección de imágenes mencionada en la sección 3.2.1, en el que se debió repetir la captura en, aproximadamente, un 10% de las imágenes.

Previo a pasar al análisis y procesamiento de la imagen para lograr obtener la huella dactilar, se llevan a cabo la corrección de área y pose del dedo encontrado, y medición de calidad.

4.3 Corrección de área y pose

La etapa de corrección de área y pose, como se indica en la sección 3.2.5, es efectuada como respuesta a la libertad de uso por parte del usuario producto de la utilización de un dispositivo móvil, pudiendo disponer su dedo frente a la cámara de diversas maneras. El procedimiento elegido para la implementación de la rotación de la imagen para disponer el dedo en posición vertical, correspondió al segundo método expuesto en la sección 3.2.5.1. Al considerarse satisfactorio, no se prosiguió con la implementación del otro método propuesto.

La Figura 33 presenta un esquema de la búsqueda de los límites del dedo en la imagen, la cual se implementó desde los bordes hacia dentro buscando el fin de los “blancos” en la imagen segmentada. En los casos en los que el dedo se encuentra pegado al borde (en la Figura 33 la búsqueda desde abajo hacia arriba indicada por la flecha fuera del recuadro), no se encuentra el color blanco al inicio de la búsqueda y esta inmediatamente termina, fijándose aquellos pixeles como parte de los límites.

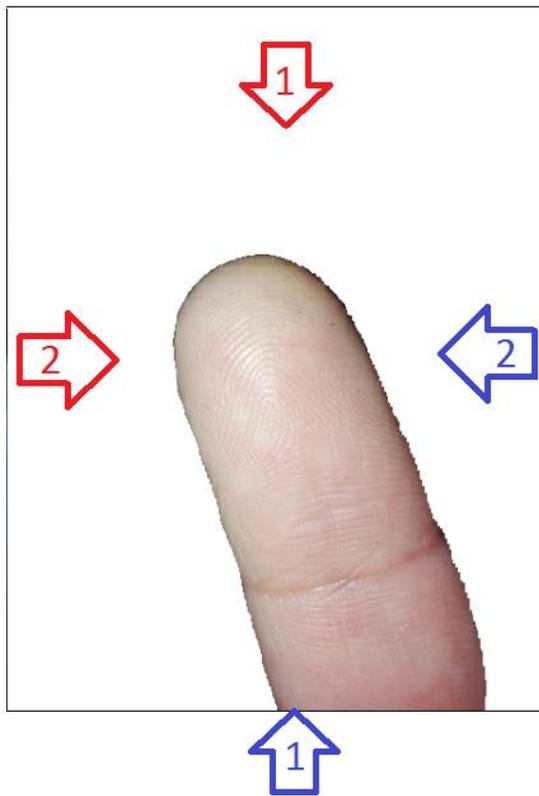


Figura 33: Esquema general de la búsqueda de los límites del dedo en la imagen segmentada. Las flechas indican las direcciones de las búsquedas hechas, las cuales fueron implementadas en dos etapas: primero las búsquedas de arriba hacia abajo y de abajo hacia arriba, y luego de izquierda a derecha y de derecha a izquierda. Los colores de las flechas son referenciales a los mostrados en la Figura 34.

La Figura 34 muestra en detalle un ejemplo del proceso efectuado para lograr la rotación y el ajuste del área. La búsqueda de los límites se efectúa en la imagen en escala de grises, de manera que se hace un seguimiento del color blanco hasta que este cambie a gris, momento en el que se determina un límite del dedo como encontrado.

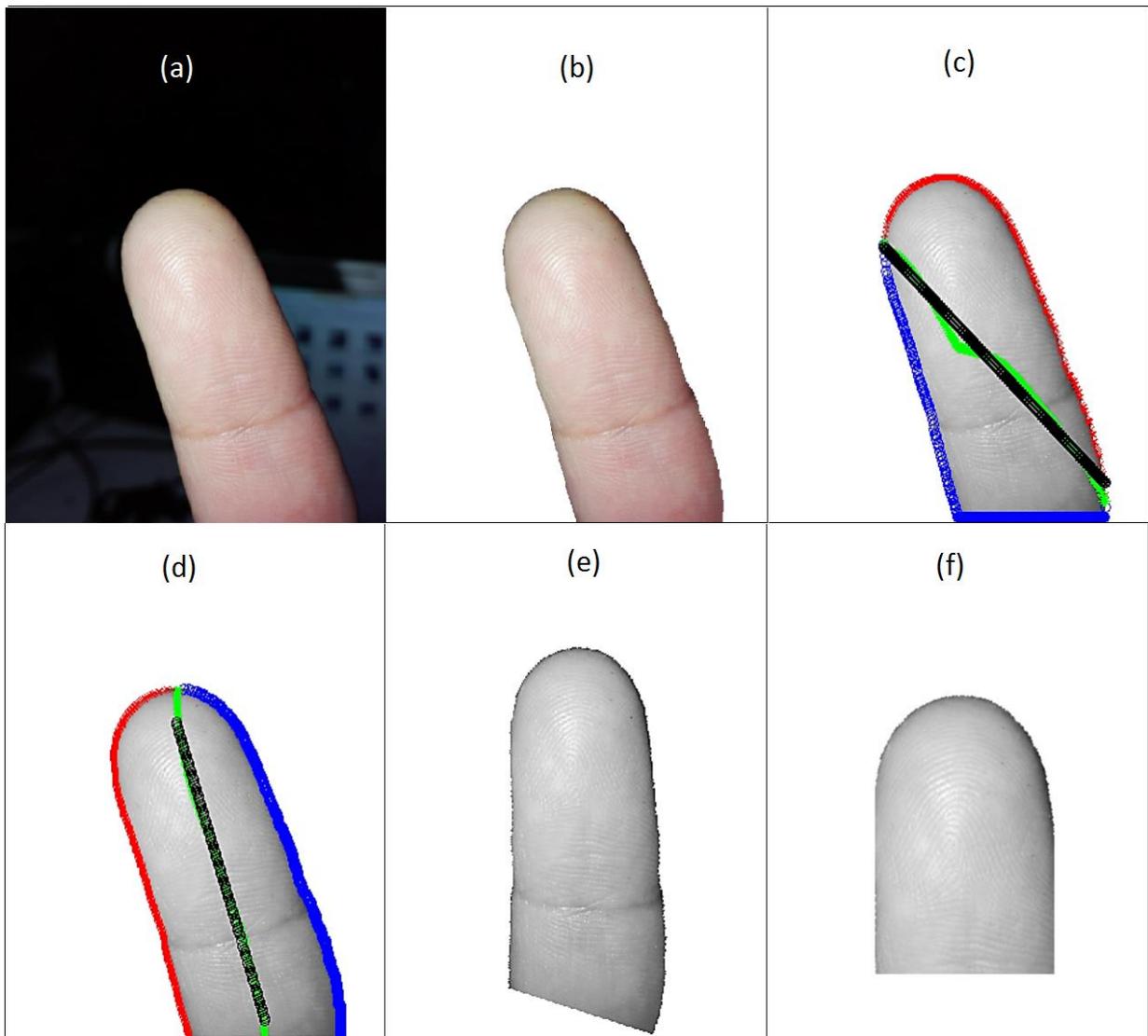


Figura 34: Etapa de corrección de área y pose del dedo encontrado en la imagen. De izquierda a derecha y de arriba a abajo: con la letra (a) la imagen capturada; con la letra (b) el dedo segmentado; con la letra (c) los bordes superior (en rojo) e inferior (en azul) encontrados haciendo un barrido de la imagen, en verde el punto medio entre cada punto superior e inferior encontrado, en negro la estimación de estos puntos usando un modelo de regresión lineal de los mismos; con la letra (d) los bordes izquierdo (en rojo) y derecho (en azul) encontrados, en verde el punto medio entre estos, en negro la estimación de dichos puntos con el modelo lineal encontrado; con la letra (e) el dedo rotado usando el ángulo de la línea con menor error encontrada; con la letra (f) la primera porción del dedo ya escalada al tamaño determinado.

En base a los resultados obtenidos se pudo observar que pueden existir casos en los que no siempre se logra la posición vertical del dedo en la imagen de inmediato, por lo que se dispuso de un proceso iterativo hasta llegar a un ángulo de menos de 10° respecto del eje vertical. Los casos en los que se debe realizar el proceso iterativo corresponden a aquellos en los que el dedo presenta una inclinación tal que la estimación del ángulo se realiza con la recta incorrecta, por lo que la rotación efectuada en la primera iteración no es la suficiente. Se dispuso este ángulo de diferencia porque el dedo puede no ser completamente recto y presentar una forma levemente curva o el usuario puede disponer de él frente a la cámara en una posición que no resulte

completamente derecha y frontal (puede flexionar el dedo). Se observó que un ángulo de 10° no provoca la pérdida de la huella en el proceso de recorte del área que la contiene.

Una vez colocado el dedo en posición vertical se selecciona un segmento correspondiente a su primer tercio, sector donde se encuentra la huella dactilar. Se mantiene el supuesto de que el extremo más alejado del borde de la imagen corresponde a la punta del dedo (determinado con anterioridad a la rotación). El ancho del dedo se determinó como la distancia entre sus límites izquierdo y derecho en la zona media. Con la posición de la punta del dedo y su ancho, se fijó el largo conservado como 1.5 veces la medida del ancho. El área seleccionada corresponde, entonces, a aquella que va, en la horizontal, desde el eje central vertical del dedo menos la mitad del ancho medido hasta el eje central vertical más la mitad del ancho medido; y, en la dirección vertical, desde la altura de su límite superior hasta una distancia equivalente a 1.5 veces el ancho encontrado, medido hacia abajo.

Se fijó el escalamiento de la imagen de manera tal que su resolución final corresponda a 300×200 píxeles.

Se plantea la realización de esta etapa con anterioridad a la medición de calidad de la imagen debido a que esta medición requiere de la selección de un área interior del dedo, lo que se asegura si el dedo se encuentra en una posición preestablecida.

4.4 Medición de calidad y captura de imagen

En la sección 3.2.4 se plantean dos opciones para medir la calidad de la imagen a capturar: medición de su nivel de nitidez usando la densidad de bordes y medición del Factor Global de Contraste de la imagen. A continuación se da cuenta de los resultados obtenidos con ambos métodos.

En relación a la medición de la nitidez de la imagen, esta se calculó posterior a la aplicación de un filtro detector de bordes del tipo Sobel en el canal "R" de la imagen RGB. El área utilizada para su determinación, como se indica en la sección 3.2.4.1, corresponde a una porción central-superior del dedo de 50×50 píxeles, encontrada buscando los límites del dedo en la imagen que presenta su segmentación respecto al fondo (eliminación del fondo). Para la medición se emplea la ecuación 1.3.

En la Figura 35 es posible observar el resultado de la aplicación del filtro Sobel sobre una imagen con una evidente baja cantidad de detalles. Se demarca en rojo el área donde se calcula la densidad de bordes de la imagen. La Figura 36, por otro lado, corresponde a un ejemplo donde la imagen presenta un grado de detalle mayor, pudiéndose observar la presencia de una huella dactilar en el dedo observado en la previsualización de la cámara del dispositivo móvil. La diferencia entre ambas secciones de cada imagen demarcadas en rojo se observa claramente.

El valor a partir del cual una imagen es aceptada, se fijó en forma experimental a través de la realización de pruebas de funcionamiento.

En lo que respecta a la segunda alternativa propuesta, es decir, al cálculo del Factor Global de Contraste de la imagen, se implementó de acuerdo a la secuencia de pasos indicados en la sección 3.2.4.2 sobre la imagen previamente convertida a escala de grises. Si bien en el trabajo citado se fijan en 9 las iteraciones de submuestreo de la imagen para calcular el índice en cuestión, este

número depende directamente del tamaño de la imagen, por lo que es necesario determinarlo para este trabajo. Así como para el cálculo de la densidad de bordes se utilizó una porción interior de la imagen, en este caso también, correspondiendo esta a una sección de 200x130 píxeles, lo que permite realizar 6 iteraciones sin incluir los límites del dedo. Además, se debe fijar un valor umbral de decisión para aceptar o rechazar una imagen como factible para encontrar su huella dactilar.

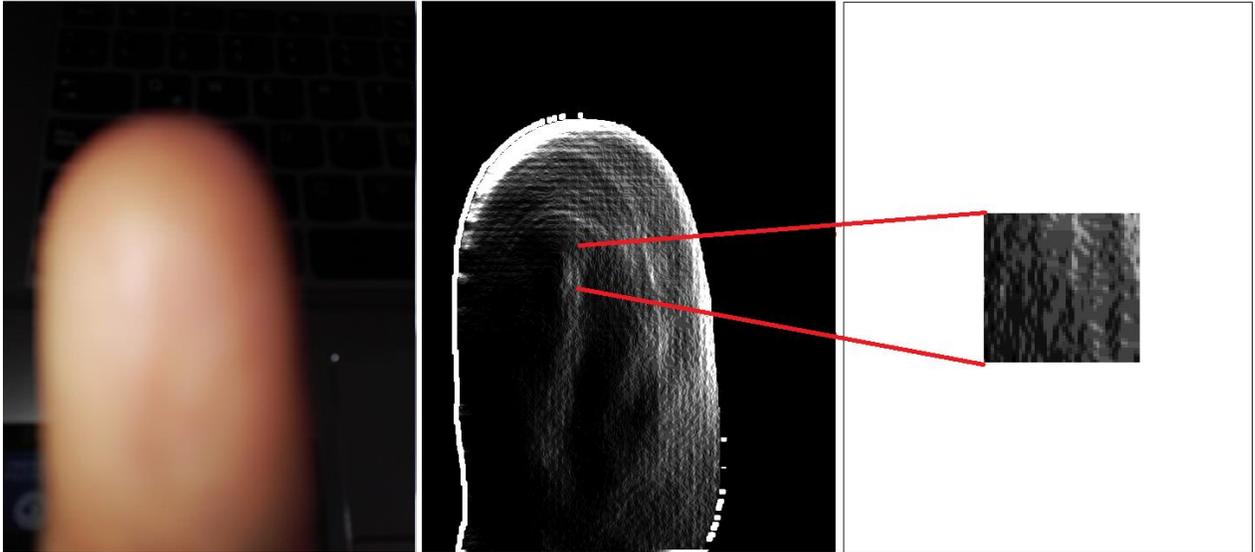


Figura 35: Etapa de determinación de la calidad de la imagen midiendo su nitidez. De izquierda a derecha la imagen captada mediante la cámara del dispositivo, detección de bordes usando filtro Sobel sobre la imagen enmascarada (resultado de la segmentación usando un detector de piel), y acercamiento de los bordes encontrados mostrando en rojo el área sobre la cual se calcula la densidad de bordes. Caso en que la imagen no resulta lo suficientemente clara.

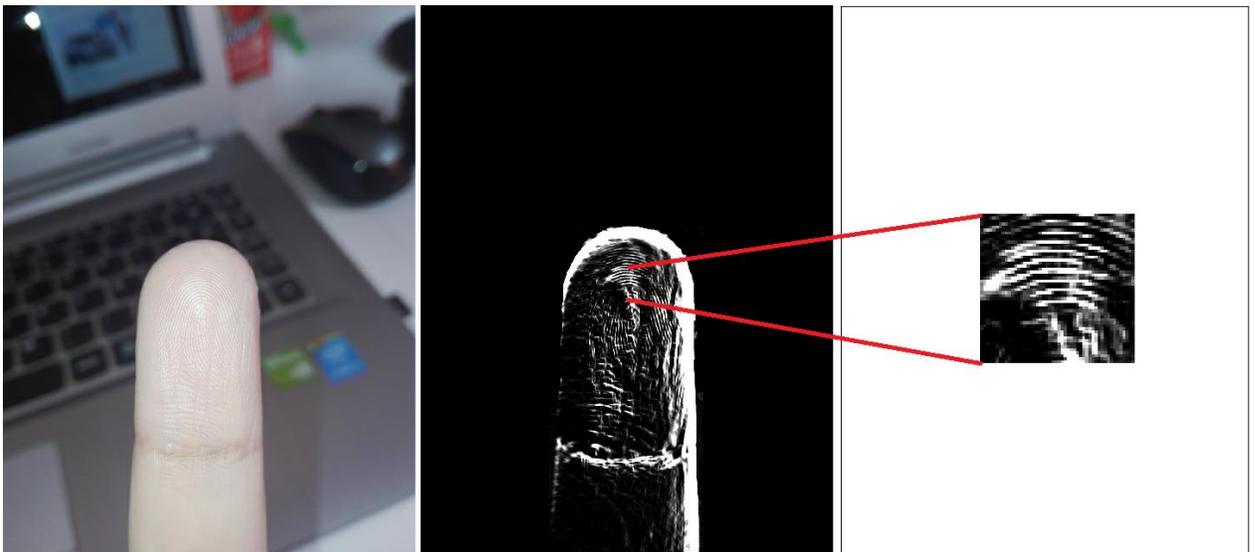


Figura 36: Etapa de determinación de la calidad de la imagen midiendo su nitidez. De izquierda a derecha la imagen captada mediante la cámara del dispositivo, detección de bordes usando filtro Sobel sobre la imagen enmascarada (resultado de la segmentación usando un detector de piel), y acercamiento de los bordes encontrados mostrando en rojo el área sobre la cual se calcula la densidad de bordes. Caso en que la imagen sí resulta lo suficientemente clara.

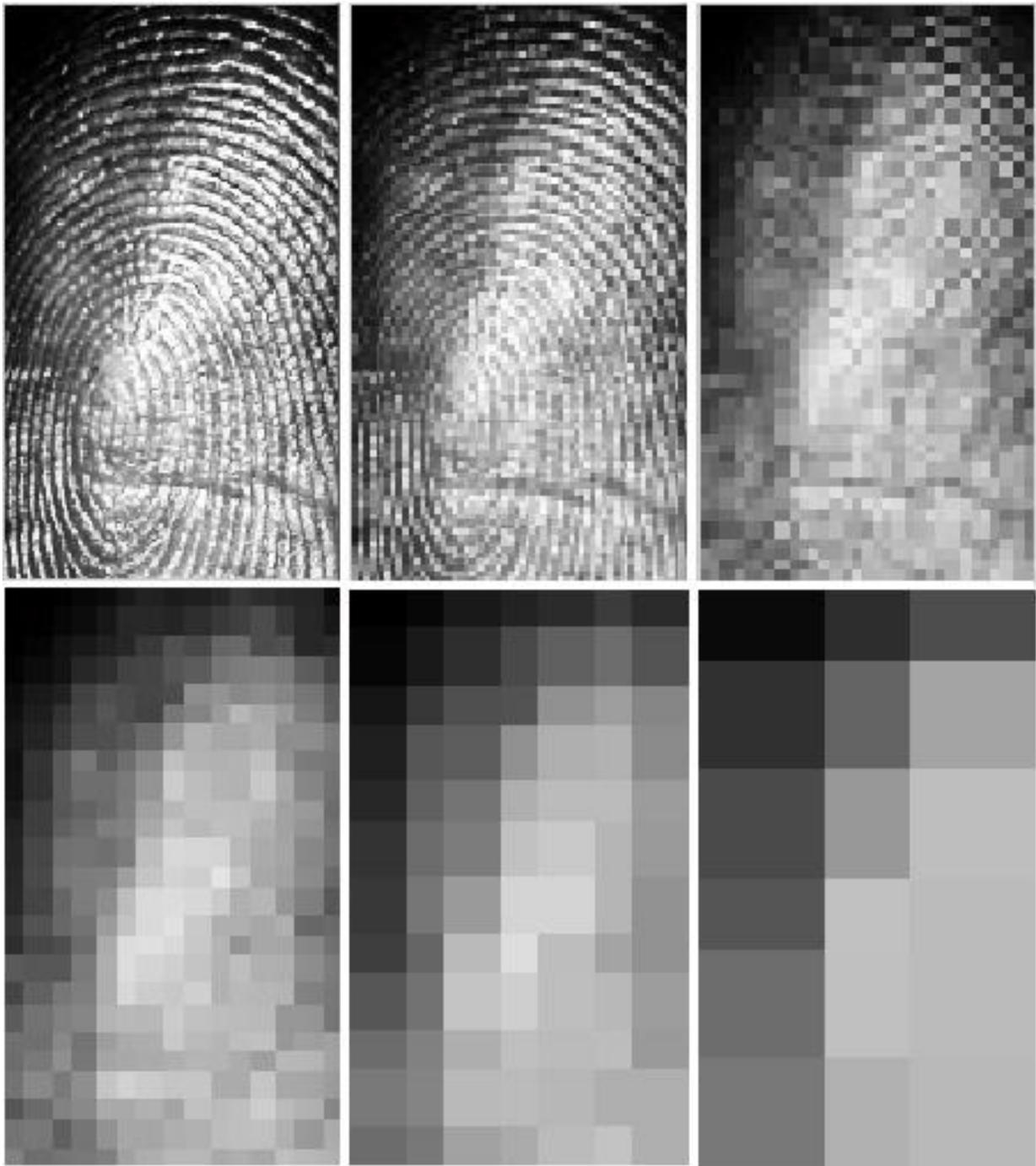


Figura 37: Serie de imágenes que permiten calcular el Factor Global de Contraste (GCF). Del 1 al 6 la imagen va disminuyendo su resolución a la mitad de la anterior asignando a cada pixel un valor igual al promedio de 4 píxeles de la imagen de la etapa previa. De cada imagen se obtiene un Factor Local de Contraste, resultados que son usados para calcular el GCF. El algoritmo se realiza sobre la imagen en escalada de grises.

La Figura 37 da cuenta del proceso iterativo de disminución de la resolución de la imagen que permite calcular el Contraste Promedio Local para cada una de dichas resoluciones, medidas que

servirán para luego obtener el Factor Global de Contraste. La disminución de la resolución es perceptible a la vista desde la imagen 1 a la 6. La resolución de cada etapa corresponde a la mitad de la anterior.

Como se indicó anteriormente, los umbrales de decisión para ambos métodos expuestos se fijaron en función de la realización de pruebas de funcionamiento en un procedimiento de dos etapas: captura de imagen y observación de detalles presentes junto con los valores de los índices de calidad.

Para 30 imágenes se calificó su calidad mediante la observación de qué tan clara es la huella que contienen, asignándoles un valor entre 0 y 7, donde 0 indica la menor calidad encontrada (imagen completamente borrosa) y 7 indica la mejor nitidez obtenida. La siguiente figura muestra un ejemplo de diferentes imágenes con diferentes valoraciones. A partir de la valoración con un 5 es posible distinguir la huella dactilar.

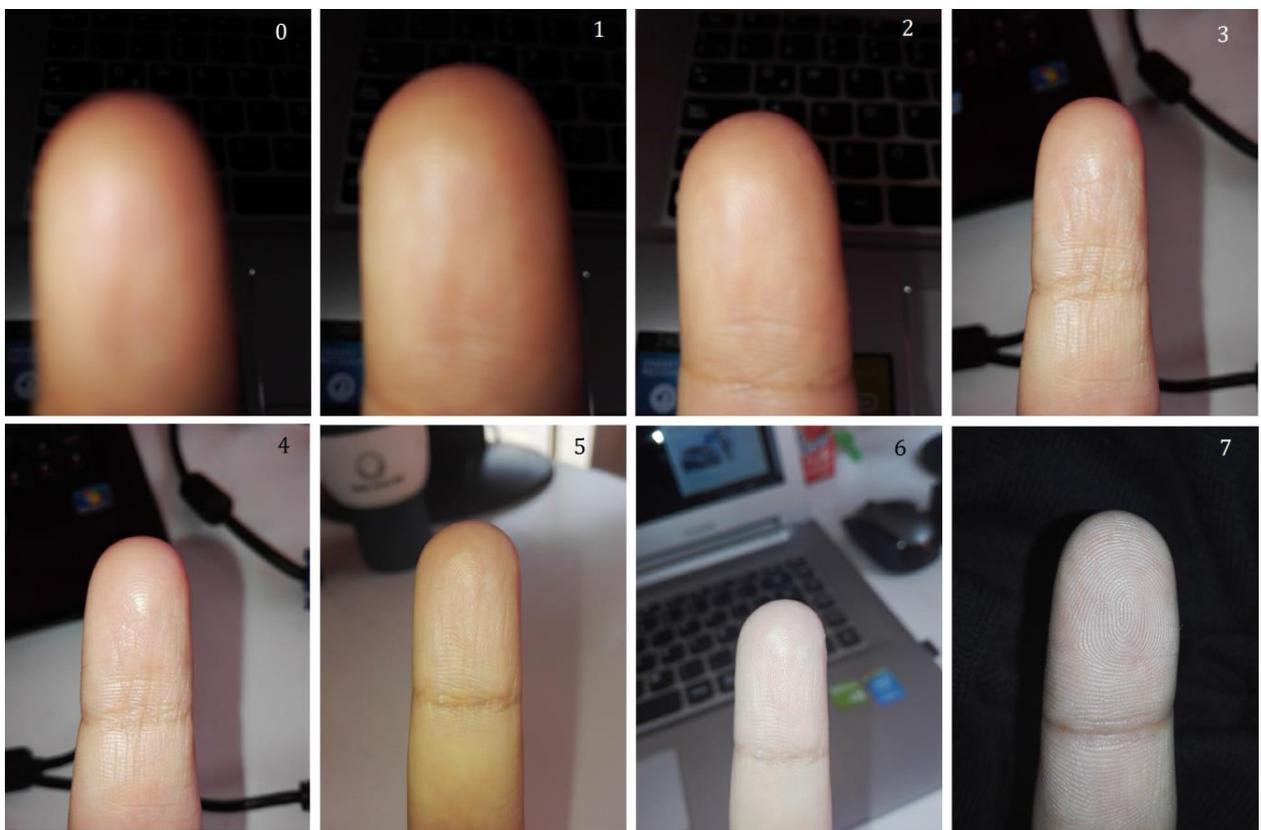


Figura 38: Ejemplos de valoración de calidad de la imagen en forma visual. El número en cada foto indica su valoración. Progresivamente la nitidez de la imagen va a aumentando.

A partir de la observación de resultados obtenidos mediante el método del Factor Global de Contraste, se consideró la opción de aplicar en forma previa un aumento de la diferencia de tonos de la imagen mediante una Ecuación por Histograma. Si bien también se observaron resultados preliminares con este paso previo para el método de Densidad de Bordes, no se notaron cambios relevantes en los resultados. La Tabla 2 presenta los resultados obtenidos para 30 imágenes con distintos grados de calidad.

Tabla 2: Resumen de resultados obtenidos para la medición de calidad en 30 imágenes de dedos obtenidas mediante el sistema implementado.

Imagen	Valoración visual de Calidad	Densidad de Bordes (ED)	Factor Global de Contraste (GCF) sin ajuste de contraste	Factor Global de Contraste (GCF) con ajuste de contraste
1	0	5,2768	1,5237	5,9794
2	0	5,2951	1,5317	5,9682
3	0	3,1494	1,2215	6,2138
4	0	7,0808	1,4598	6,0464
5	0	6,3578	1,9348	5,8883
6	0	1,7758	1,0276	6,1413
7	0	1,8198	1,0340	6,0735
8	0	0,6189	0,6554	7,0503
9	1	0,7123	0,6957	7,2230
10	1	2,4372	1,0961	6,2925
11	1	1,8566	1,0421	6,5398
12	2	6,9250	1,0438	6,4634
13	2	5,9083	1,0622	6,9521
14	2	6,1988	1,0646	7,1073
15	3	6,3096	1,0818	8,0467
16	3	7,4461	1,2040	7,9912
17	3	8,0592	1,8709	8,1603
18	4	8,7907	0,9939	8,8537
19	4	6,2831	1,1223	8,5381
20	4	8,5058	1,0723	9,3355
21	5	5,1651	0,9199	9,9337
22	5	5,9555	1,2394	10,3250
23	5	4,5016	1,0821	10,3249
24	6	6,6014	1,0101	11,3021
25	6	8,1395	2,2580	9,6172
26	7	8,8747	1,9241	11,3448
27	7	9,2396	1,9917	11,4972
28	7	7,9320	1,8429	11,1537
29	7	8,5134	1,4206	10,1343
30	7	9,6278	1,9234	11,0644

Al analizar los resultados anteriores, es posible notar que para los casos de la medición de la Densidad de Bordes y del Factor Global de Contraste sin la etapa previa de mejoramiento del contraste, no resultan separables a partir de la determinación de un valor umbral. Separación que sí se puede hacer mediante el cálculo del Factor Global de Contraste considerando una etapa previa de mejora de contraste mediante una ecualización de histograma. El siguiente gráfico hace más evidente este hecho.

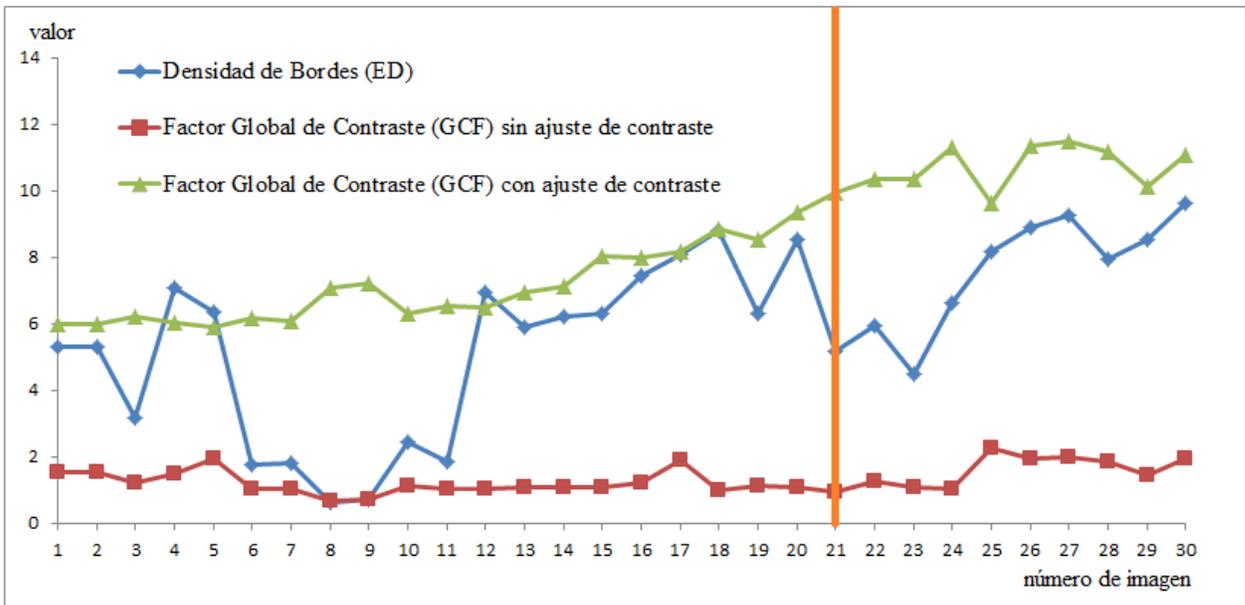


Figura 39: Índices indicadores de la calidad de la imagen vistos en forma gráfica. La línea naranja se ubica a la altura de la primera imagen correspondiente a la valoración 5 (establecida como la mínima para aceptar una imagen).

A partir de los valores encontrados, se acepta una imagen si su Factor Global de Contraste es mayor o igual a 9.5.

Si la imagen es aceptada, el rectángulo de color rojo dispuesto en la imagen de previsualización de la cámara para indicar la región donde se encontró el dedo, se cambia a color verde. Además, entonces se realiza la captura de la imagen para continuar el procesamiento con miras a obtener la huella dactilar. Es necesario mencionar que la resolución de una fotografía tomada (captura) es mayor a la resolución de la imagen en movimiento presentada en la pantalla del dispositivo móvil (imagen de previsualización), por lo que el detalle puede aumentar.

4.5 Obtención huella dactilar viva

Posterior a la selección y escalamiento del área de interés y a la medición de la calidad, si la imagen es aceptada, sigue el proceso que permite obtener la huella dactilar que, como ha sido mencionado anteriormente, se puede denominar como huella dactilar viva al ser extraída directamente desde la imagen del dedo, sin un sensor especializado.

Como se indica en la sección 3.3.3, la primera etapa consiste en la normalización de la imagen en escala de grises del dedo, para posteriormente aplicar un Filtro de Coherencia sobre la imagen normalizada. Finalmente, se obtiene una imagen binarizada, es decir, en blanco y negro, como resultado de la implementación de un proceso de umbralización adaptativa. La Figura 40 da cuenta de este proceso.

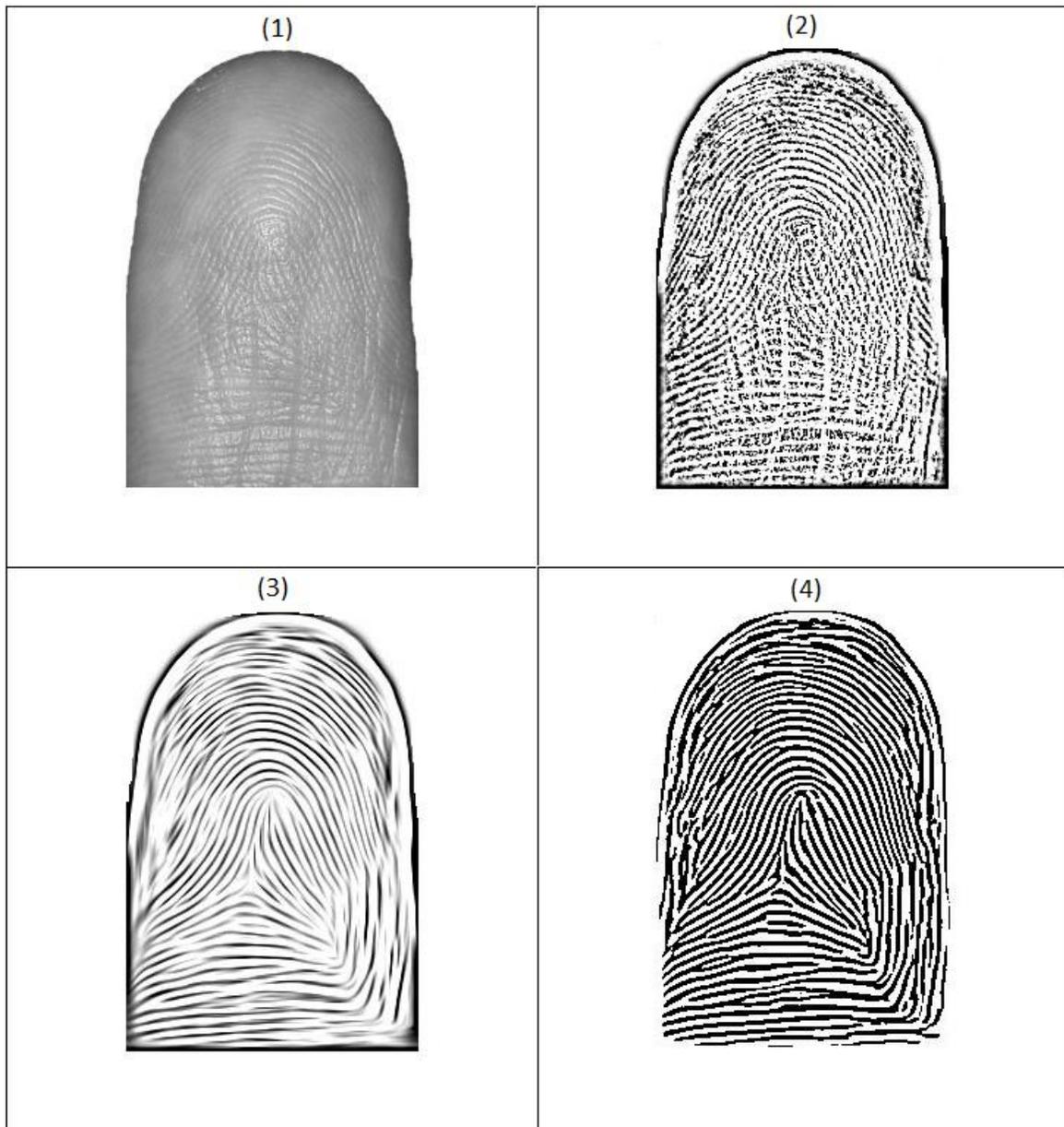


Figura 40: Huella dactilar obtenida a partir de una foto de un dedo. En (1) la porción del dedo que contiene la huella ya segmentado, enderezado, recortado y escalado; en (2) el resultado del proceso de normalización de la imagen; en (3) la imagen resultante de la aplicación del Filtro de Coherencia; en (4) el resultado de la umbralización adaptativa de la imagen.

La etapa de Normalización Local incluye el uso de 2 filtros gaussianos, ambos con parámetro sigma igual a 3. Su aplicación, como se observa en la imagen anterior, permite la compensación de la iluminación de la imagen. El Filtro de Coherencia utilizado considera un tiempo de difusión igual a 15, un sigma igual a 1 para la suavización gaussiana previa al cálculo del Hessiano de la imagen, un sigma igual a 15 para el suavizado del Hessiano y un de discretización no-negativa para realizar la difusión. La binarización se implementó mediante un proceso de umbralización adaptativa que compara el valor de cada pixel con la media de su vecindad aplicando un filtro gaussiano de sigma 4.

4.6 Extracción de minucias

Ya obtenida la huella dactilar, se implementa la extracción de minucias. Para esto primero se adelgazan las líneas de la huella dejándolas de un ancho de 1 píxel. Luego se recorren las líneas encontrando los puntos en los cuales estas terminan (minucias de tipo término) o se dividen en 2 nuevas líneas (minucias de tipo bifurcación).

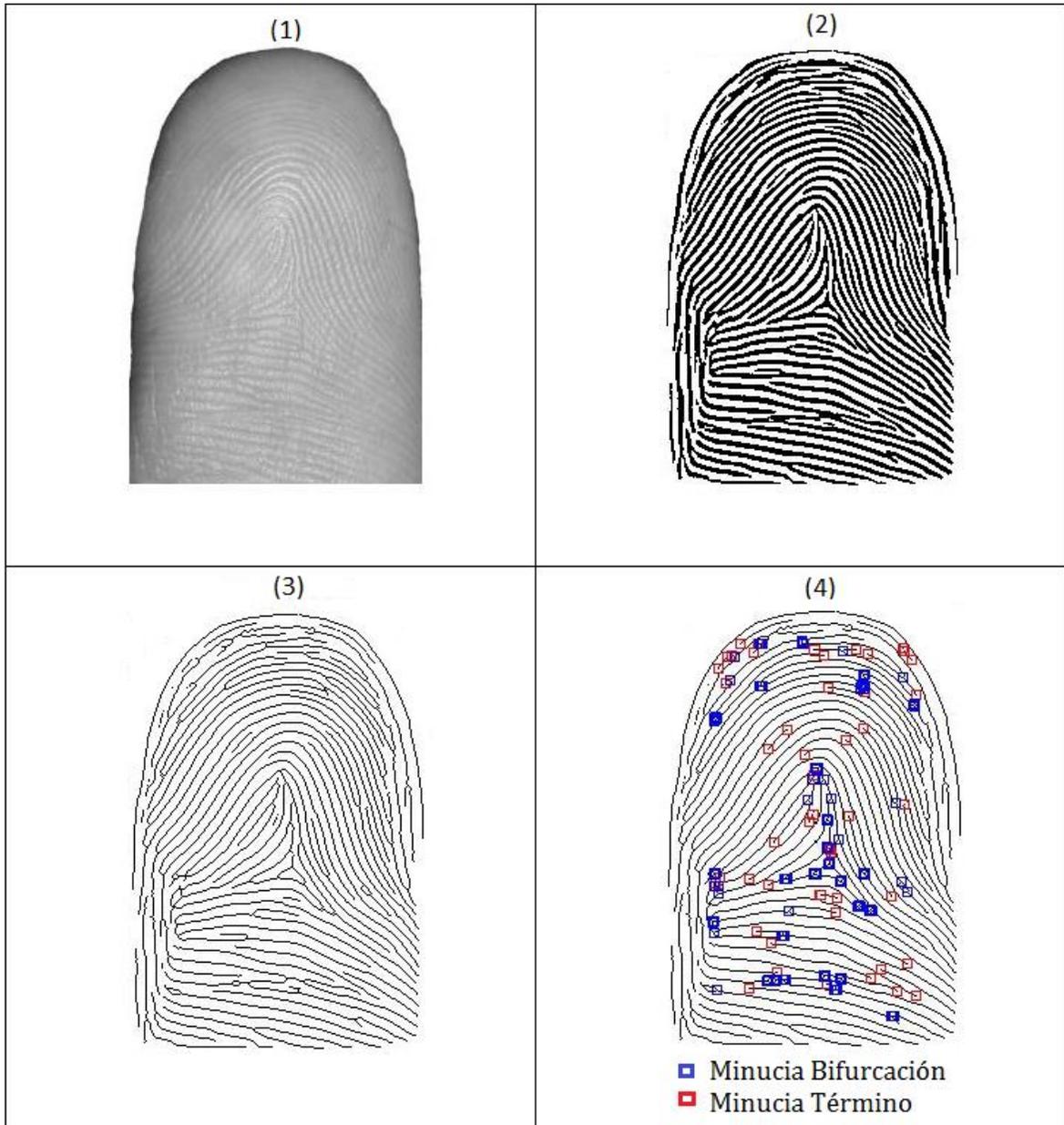


Figura 41: Minucias extraídas de la huella dactilar viva. Con el número (1) la porción del dedo que contiene la huella ya segmentado, enderezado, recortado y escalado; con el número (2) el resultado del proceso de obtención de la huella dactilar viva; con el número (3) el proceso de adelgazamiento o esqueletización de la huella dactilar; con el número (4) la huella dactilar adelgazada mostrando las minucias encontradas, mostrándose en rojo las minucias del tipo término y en azul las del tipo bifurcación.

La Figura 41 muestra los pasos seguidos y las minucias encontradas en la foto presentada. Se observan en ella la porción de dedo previamente recortada y escalada, la huella dactilar viva y las minucias encontradas en ella. En azul se muestran las minucias del tipo bifurcación y en rojo las minucias del tipo término.

Considerando que todas las huellas son extraídas de fotografías y estas presentan de forma más clara los centros de las yemas que las áreas cercanas a los bordes debido a la forma de los dedos, la búsqueda de minucias se hace dentro de un área rectangular interior de la imagen, dejando 30 píxeles arriba y 30 píxeles abajo, y otros 20 a la derecha y 20 a la izquierda, donde no se buscan estos puntos característicos. Esto se debe a que las huellas obtenidas pueden presentar líneas con falsas minucias en dichas áreas, afirmación que se apoya en la observación de los resultados del algoritmo. Otra razón para obviar estas secciones en la búsqueda de minucias, corresponde al hecho de que las huellas capturadas mediante sensores especializados no alcanzan esas áreas. La siguiente figura muestra el resultado de la extracción de minucias considerando el área de los bordes de la imagen y también excluyéndola, obteniéndose, en el ejemplo, más de 300 minucias de diferencia.

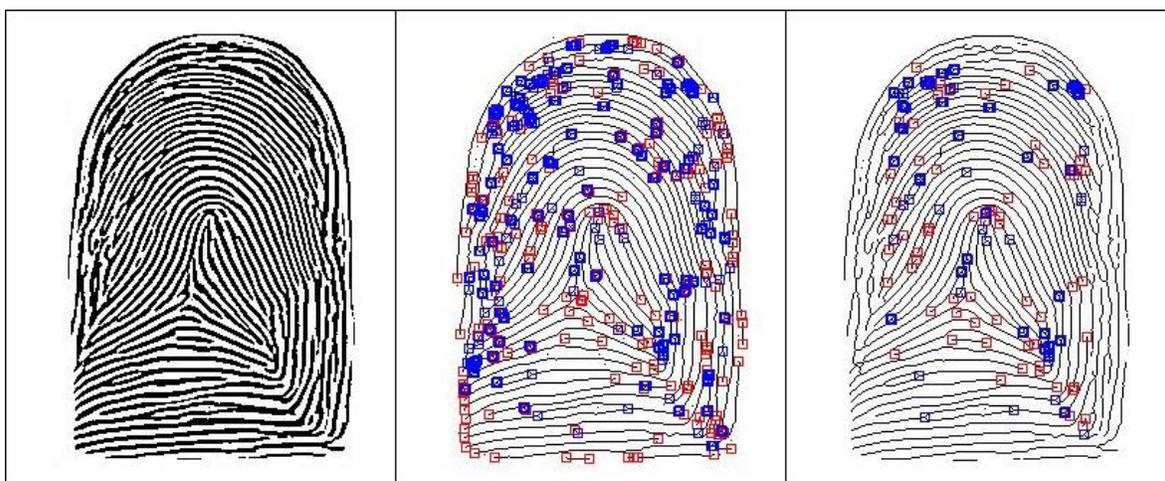


Figura 42: Extracción de minucias de una huella dactilar considerando la región exterior y sin hacerlo. A la izquierda la huella dactilar viva; al centro las minucias encontradas considerando el borde exterior y en la que se hallaron 378 minucias de bifurcación y 187 de término; a la derecha las minucias encontradas sólo haciendo la búsqueda al centro de la imagen (excluyendo el borde exterior), encontrándose 122 minucias del tipo bifurcación y 65 del tipo término.

Para detallar resultados de esta etapa y la siguiente, se construyó la colección de imágenes descrita en la sección 3.2.1. La Tabla 3 muestra los resultados promedio de la extracción de minucias para estos 24 dedos, considerando las 5 muestras distintas para cada uno. Se presentan el promedio de minucias del tipo bifurcación y del tipo término, y se agrega también el promedio del GCF calculado. Un detalle de los resultados obtenidos para cada muestra se presenta en el Anexo B: Detalle de resultados para la extracción de minucias.

En la Figura 43 es posible ver las minucias encontradas para una serie de ejemplos de imágenes. Se muestran en ella el recorte del dedo, la huella dactilar viva y las minucias encontradas.

De los resultados obtenidos es posible notar la detección de una alta cantidad de minucias muy pegadas unas de otras, principalmente entre las del tipo bifurcación. No se dispone de la

estadística al respecto, pero se plantea la necesidad de incorporar una etapa de reducción de minucias falsas como trabajo futuro. En la Figura 43 esto se puede notar en que suelen aparecer minucias de bifurcación muy juntas unas a otras, visibles en color azul. De todas formas este es un hecho discutible considerando los procesos de reconocimiento de huellas adquiridas mediante sensores especializados, debido a que en ellos suelen utilizarse la mayor cantidad de minucias posibles. En dichos casos, más minucias en la extracción de características representan mayor probabilidad de reconocimiento en la comparación con otra huella dactilar.

Tabla 3: Resumen de resultados para las 120 imágenes de huellas dactilares obtenidas a partir de fotos de dedos. Se muestran los valores promedio del Factor Global de Contraste, número de minucias del tipo bifurcación y número de minucias del tipo término. Cada valor se calculó como el promedio de 5 muestras para cada dedo.

Dedo	GCF	Minucias Bifurcación	Minucias Término
1	11,14698	109	70
2	10,68662	130	90
3	10,97706	125	72
4	11,25104	115	69
5	10,81406	120	59
6	10,95962	116	47
7	11,01680	108	66
8	10,55482	124	91
9	11,07314	135	73
10	11,02974	87	59
11	10,60390	121	82
12	11,14240	100	65
13	10,47836	93	54
14	10,52064	99	58
15	10,88890	112	59
16	10,46660	95	47
17	10,53252	128	75
18	10,92460	69	37
19	11,12460	104	52
20	10,77432	113	58
21	10,77366	111	64
22	10,93030	80	36
23	10,67434	107	61
24	10,73188	97	50

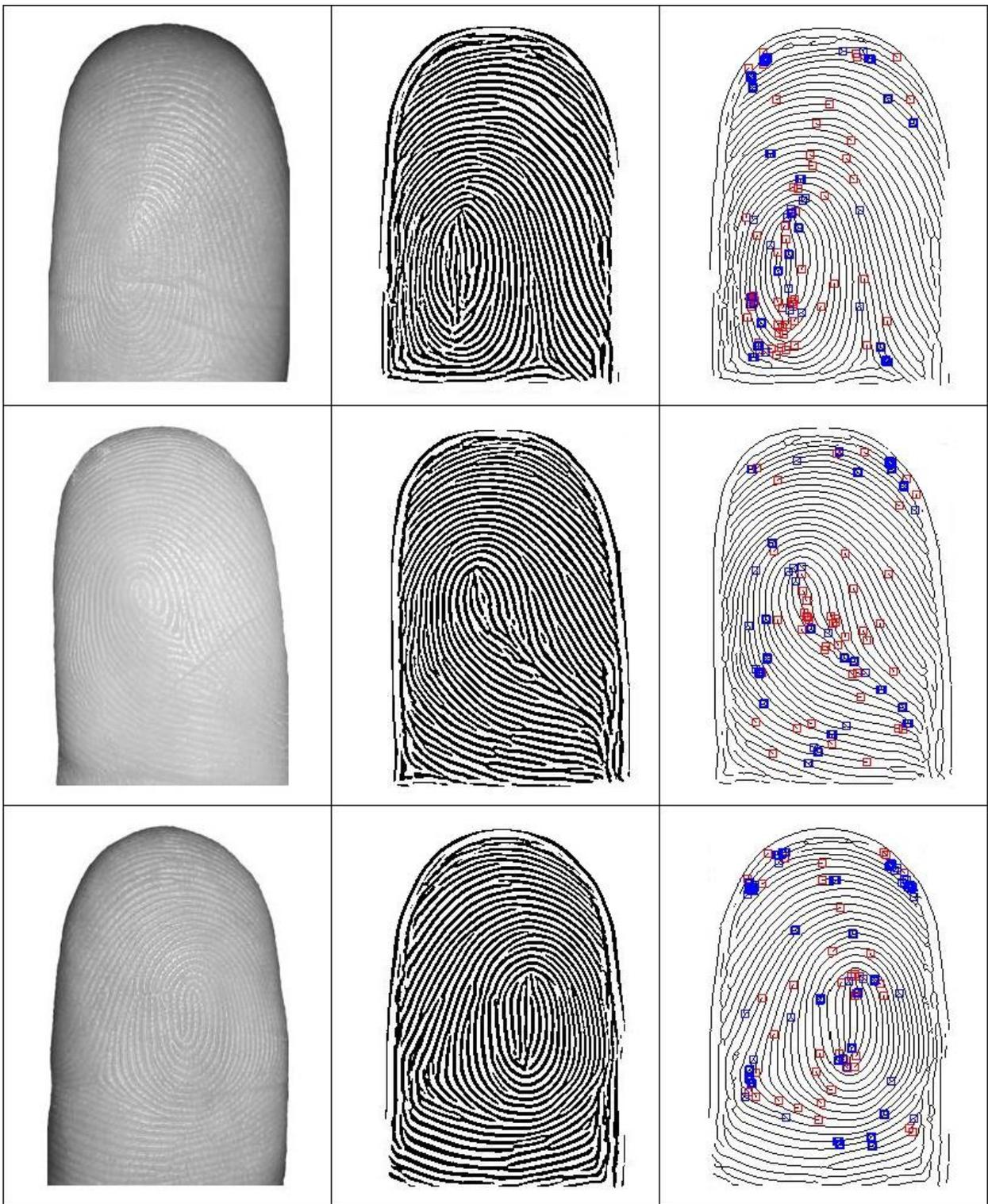


Figura 43: Ejemplos de extracción de minucias. De izquierda a derecha cada imagen, su respectiva huella dactilar y las minucias encontradas.

Posterior a la extracción de minucias, se procede a la comparación de huellas dactilares. A continuación se da cuenta de esta etapa, pero considerando una alternativa distinta al uso de minucias.

4.7 Comparación entre huellas dactilares

Como se indicó en la sección 3.3.5, la comparación de huellas dactilares se llevó a cabo mediante el algoritmo SIFT. La implementación utilizada correspondió a la disponible en [68], donde se presenta una librería de código abierto que contiene, entre otras herramientas, el algoritmo SIFT.

SIFT involucra tanto un detector de características como un descriptor de dichas características. El detector extrae de la imagen un número de *frames* o regiones de interés, mientras que el descriptor asocia a estas regiones información que identifica su apariencia compacta y robustamente. De esta forma la implementación utilizada permite encontrar *frames* y su correspondiente descriptor.

El *matching* entre dos huellas dactilares se realiza encontrando los pares de descriptores más semejantes entre los presentes en cada una de las imágenes, calculando la norma L2 entre ellos. El *matching* entre dos descriptores D1 (descriptor en imagen 1) y D2 (descriptor en imagen 2) se realiza sólo si la distancia euclidiana entre D1 y D2, multiplicada por un valor umbral fijado en 1.5 (valor por defecto del algoritmo), no es mayor que la distancia de D1 a todos los demás descriptores de la segunda imagen. Se incorporó una etapa de eliminación de falsos *matches* mediante el algoritmo RANSAC⁴.

La Figura 44 presenta el resultado de la aplicación del algoritmo sobre un par de huellas dactilares. La imagen 1 de la figura muestra la aplicación directamente sobre la huella dactilar. La imagen 2 muestra el resultado sobre la huella adelgazada, observándose un notorio aumento de *matchings* (líneas azules) respecto del caso de la imagen 1. La imagen 3 presenta la misma aplicación de SIFT sobre la huella adelgazada, pero añadiendo la eliminación de *matches* mediante RANSAC. En este último caso es posible notar la eliminación de emparejamientos erróneos.

Mediante la comparación de las 120 huellas obtenidas anteriormente, en un proceso de 1 versus el resto, lo que da un total de 14280 pareos, se determinó la aceptación o rechazo del *matching* en función del número de *matches* entre características encontradas. Los resultados se muestran en la Tabla 4 y la Tabla 5, además de la Figura 45 y la Figura 46. La primera tabla y primera figura resumen los resultados usando la transformada SIFT, mientras que la segunda tabla y segunda figura resumen los resultados usando la transformada SIFT seguida de RANSAC. Se presentan los resultados en términos de Verdaderos Positivos (TP), Falsos Positivos (FP), Verdaderos Negativos (TN) y Falsos Negativos (FN), además de los índices de Sensibilidad ($\frac{TP}{TP+FN}$), Especificidad ($\frac{TN}{FP+TN}$) y Exactitud ($\frac{TP+TN}{Total}$). Ambas figuras corresponden a las respectivas curvas ROC, construidas usando la Tasa de Verdaderos Positivos (equivalente a la Sensibilidad) y la Tasa de Falsos Positivos (calculada como 1-Especificidad). En ambas tablas se observan bajas tasas de Sensibilidad y Especificidad y, si bien la aplicación de RANSAC para reducir *matches* efectivamente lo hace, el resultado final no produce mejoras sustanciales respecto de usar sólo SIFT. Si se establece una alta sensibilidad, es a costa de una baja especificidad y viceversa. La exactitud se presenta alta al ser alto el rechazo, pues en las imágenes utilizadas los casos de comparaciones entre huellas distintas son la mayoría. Si se debe elegir un resultado, manteniendo

⁴ El algoritmo RANSAC (Consenso de Muestreo Aleatorio) consiste, a grande rasgos, en la creación, en forma iterativa, de un modelo matemático a partir de un conjunto de datos, decidiendo si estos se ajustan o no a dicho modelo, lo que permite eliminar *outliers*.

el equilibrio entre Sensibilidad y Especificidad, corresponde a la obtención de al menos 5 *matches* para aceptar una comparación como correcta, con una sensibilidad del 59%, una especificidad del 76% y una exactitud del 75%.

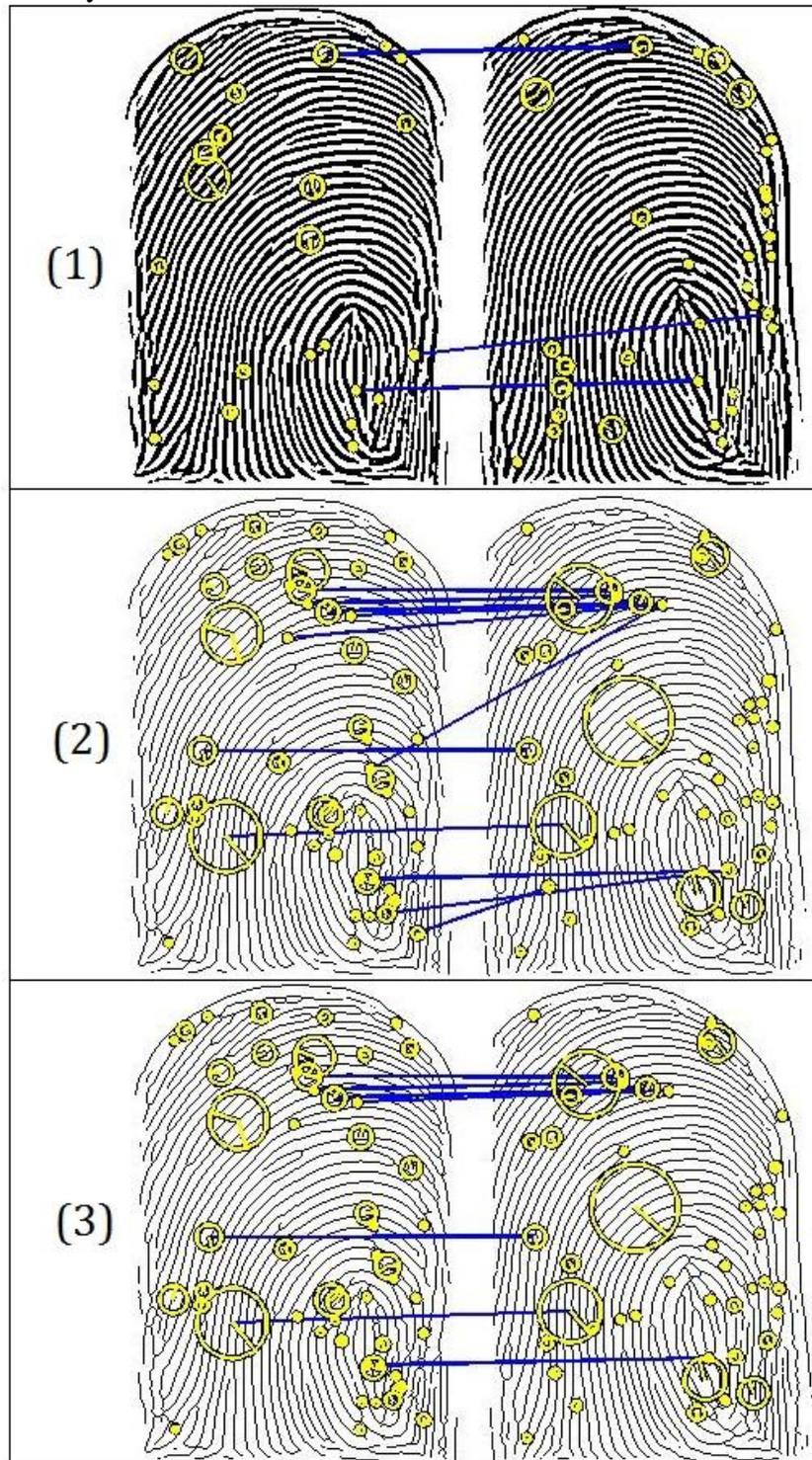


Figura 44: Matching de huellas dactilares. De arriba abajo: matching usando la huella y SIFT, matching usando SIFT sobre la huella adelgazada, matching usando SIFT y RANSAC. En amarillo los frames encontrados por el algoritmo SIFT con su respectiva escala y orientación (tamaño y línea interior de cada circunferencia) y en azul los matches entre ellos.

Tabla 4: Resultados de comparación de huellas dactilares en procedimiento 1 versus el resto usando *matching* de características obtenidas con SIFT. El número de *matches* presentado corresponde al número de estos a partir del cual se acepta como correcta la comparación. Se presentan el número de Verdaderos Positivos (TP, Falsos Positivos (FP), Verdaderos Negativos (TN), Falsos Negativos (FN) y los índices de Sensibilidad, Especificidad y Exactitud para cada caso.

Nro matches :	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
TP	449	411	371	329	282	245	206	179	145	119	93	76	61	48	28
FP	10938	8722	6563	4757	3312	2288	1571	1074	756	524	371	267	197	130	93
TN	2862	5078	7237	9043	10488	11512	12229	12726	13044	13276	13429	13533	13603	13670	13707
FN	31	69	109	151	198	235	274	301	335	361	387	404	419	432	452
Sensibilidad	0,94	0,86	0,77	0,69	0,59	0,51	0,43	0,37	0,30	0,25	0,19	0,16	0,13	0,10	0,06
Especificidad	0,21	0,37	0,52	0,66	0,76	0,83	0,89	0,92	0,95	0,96	0,97	0,98	0,99	0,99	0,99
Exactitud	0,23	0,38	0,53	0,66	0,75	0,82	0,87	0,90	0,92	0,94	0,95	0,95	0,96	0,96	0,96

Tabla 5: Resultados de comparación de huellas dactilares en procedimiento 1 versus el resto usando *matching* de características obtenidas con SIFT seguido de RANSAC. El número de *matches* presentado corresponde al número de estos a partir del cual se acepta como correcta la comparación. Se presentan el número de Verdaderos Positivos (TP, Falsos Positivos (FP), Verdaderos Negativos (TN), Falsos Negativos (FN) y los índices de Sensibilidad, Especificidad y Exactitud para cada caso.

Nro matches :	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
TP	447	405	360	272	199	128	94	61	41	31	26	18	14	8	5
FP	10893	8358	6031	3480	1917	1175	747	516	360	251	197	140	103	69	58
TN	2907	5442	7769	10320	11883	12625	13053	13284	13440	13549	13603	13660	13697	13731	13742
FN	33	75	120	208	281	352	386	419	439	449	454	462	466	472	475
Sensibilidad	0,93	0,84	0,75	0,57	0,41	0,27	0,20	0,13	0,09	0,06	0,05	0,04	0,03	0,02	0,01
Especificidad	0,21	0,39	0,56	0,75	0,86	0,91	0,95	0,96	0,97	0,98	0,99	0,99	0,99	1,00	1,00
Exactitud	0,23	0,41	0,57	0,74	0,85	0,89	0,92	0,93	0,94	0,95	0,95	0,96	0,96	0,96	0,96

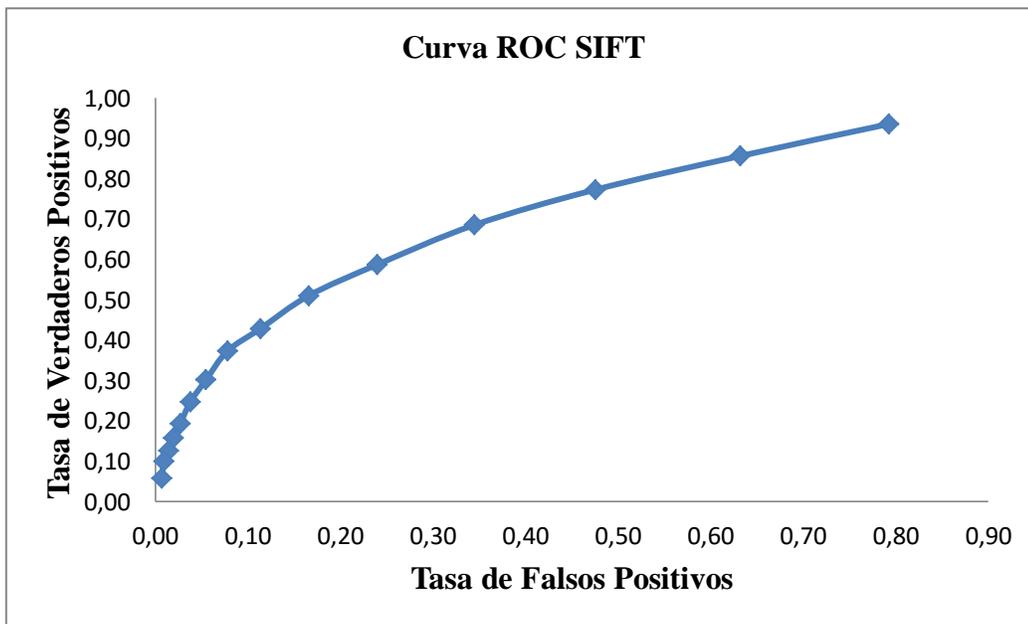


Figura 45: Curva ROC método de comparación usando el algoritmo SIFT.

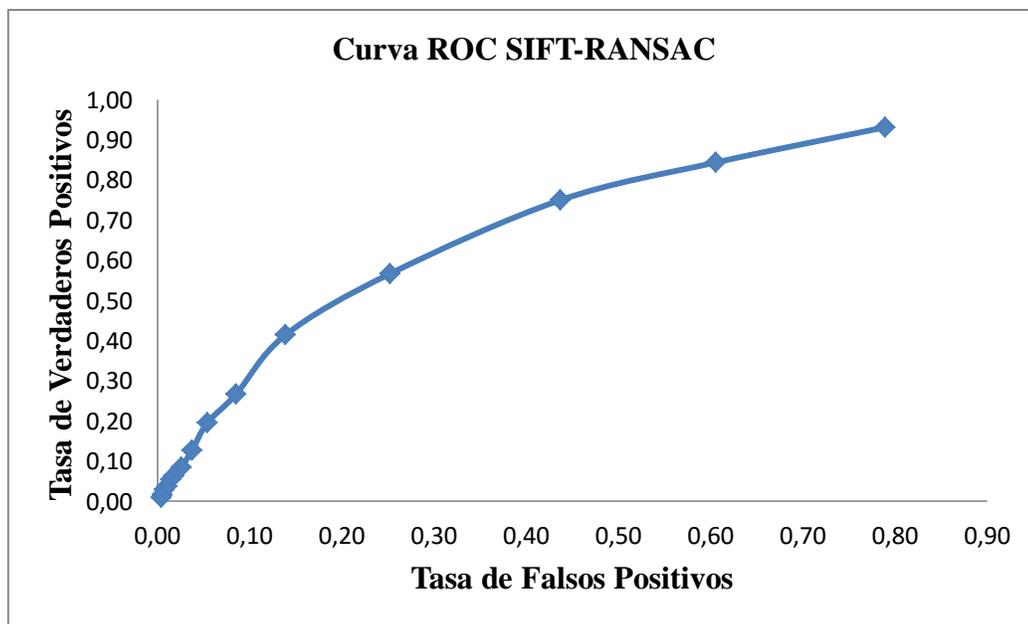


Figura 46: Curva ROC método de comparación usando el algoritmo SIFT seguido de RANSAC.

Capítulo 5: Conclusiones y Trabajo Futuro

5.1 Discusión Final

Los continuos avances en la tecnología de los dispositivos móviles inteligentes y su uso masivo ya no sólo en telefonía, sino que también en diferentes aspectos de la vida cotidiana reflotan el tema siempre presente de la seguridad, tanto en el acceso de los dispositivos como en su uso como una herramienta para lograrla. En este contexto se desarrolló el presente trabajo con el objetivo principal de estudiar la posibilidad de utilizar la cámara de un dispositivo móvil para adquirir huellas dactilares, esto sin la necesidad de contar con un sensor desarrollado para estos fines, y posteriormente poder extraer las características necesarias para el reconocimiento de la identidad de un individuo.

El proceso en cuestión se separó en diferentes etapas, estudiando su factibilidad y dificultades e implementando soluciones a las mismas. De esta forma, se procedió a realizar un estudio del estado del arte para encontrar métodos que permitieran detectar el dedo en la imagen y realizar la segmentación para separarlo del fondo, corregir su posición y seleccionar el área de interés, medir la calidad de la imagen para decidir si es factible o no obtener una huella dactilar (huella viva), hacerlo si es posible, extraer sus puntos característicos o minucias y, adicionalmente, comparar las huellas.

Un paso previo necesario fue determinar la factibilidad de desarrollar el sistema completo en el dispositivo móvil o sólo la etapa de adquisición de la imagen. Las pruebas realizadas permitieron concluir que, si bien los dispositivos móviles hoy en día tienen amplias capacidades de cómputo, aún no es posible desarrollar un sistema robusto y completo con el objetivo planteado funcionando cien por ciento en el dispositivo. Lo anterior debido a que la carga computacional y, por ende, el tiempo de cómputo de los métodos implementados resultan altos para el uso cotidiano en el dispositivo móvil, pensando también en que estos se encuentran ejecutando en forma continua procesos que exigen al máximo sus recursos. Con este hecho, se implementó una parte del sistema en el entorno Matlab.

Además, se reconoce como un requisito crítico la consideración de las características del hardware contenido en el dispositivo móvil, más específicamente de su cámara, siendo el factor más importante la capacidad de enfoque. Se concluye que una cámara que no permita enfocar el dedo de manera correcta (que la huella resulte visible en la captura realizada), independiente de su resolución, no permitirá extraer una huella dactilar. No es posible obtener mayores conclusiones acerca de los equipos debido a que los considerados en este estudio no representan una muestra significativa del universo existente.

Se desarrollaron las etapas de adquisición, de la imagen, detección del dedo, segmentación, corrección de pose y área, y medición de calidad para ser ejecutadas en el dispositivo mediante el SDK de Android y las librerías de OpenCV para Android.

Con respecto a la etapa de adquisición y detección del dedo en la imagen, se implementó un sistema en base al análisis de color apoyado del hardware de un *Smart Phone*. El sistema en cuestión permitió obtener imágenes a partir de la cámara en interacción con la pantalla y usando el flash para estandarizar de la mejor manera posible las condiciones de iluminación. Sin embargo, este presenta las dificultades propias del uso de los dispositivos móviles: el usuario no se encuentra fijo y puede mover su dedo justo en el momento en el que se obtiene la imagen a

analizar y su portabilidad permite el uso en cualquier condición de iluminación. Si bien el flash ayuda a mejorar esta última, no es una mejora absoluta. Se observó también, como se mencionó anteriormente, la influencia de la capacidad de enfoque de la cámara, la cual tiene implicancia directa en la adquisición de una imagen de calidad suficiente. Considerando estas dificultades, fue posible obtener imágenes detectando la presencia del dedo en la misma mediante el análisis de color y un detector de piel.

Fue posible también realizar de manera efectiva la corrección de la posición y área del dedo mediante una estimación de su ángulo de inclinación y un escalamiento a un tamaño estándar. La estimación del ángulo presenta como dificultad principal que el usuario pueda disponer frente a la cámara no sólo el dedo, sino también otras áreas de la mano, lo que podría provocar un cálculo erróneo.

Ya ubicado el dedo y separado del fondo se estudiaron dos métodos para medir la calidad de la imagen: el cálculo de la densidad de bordes usando un detector de bordes del tipo Sobel y la determinación del Factor Global de Contraste, resultando este último efectivo para cumplir el objetivo deseado.

Las etapas de obtención de la huella dactilar, extracción de minucias y comparación entre huellas dactilares fueron implementadas en Matlab.

Se aplicaron los algoritmos de Normalización Local, para compensar las diferencias de iluminación en la imagen; Filtro de Coherencia, el cual permite “rellenar” los espacios y hacer notoria una huella suavizada; y binarización mediante la aplicación de un umbral adaptivo para cada pixel de la imagen. Estos pasos permitieron obtener huellas dactilares a partir de las fotografías. Se estableció que si la imagen cumple con las condiciones de la etapa anterior al medir su calidad, resulta posible extraer la huella con surcos y valles, y por ende minucias, visibles.

El paso natural posterior a la obtención de la huella en los métodos clásicos de verificación de identidad corresponde a la extracción de puntos característicos o minucias. Estos puntos se utilizan de manera estándar estando inclusive incluidos como parte del código de las cédulas de identidad, por lo que podría compararse una huella dactilar obtenida con un sensor o, en este caso, con una cámara, con la información presente en las cédulas de identidad, verificación de identidad que permitiría obviar la necesidad de una base de datos. Por esto, en este trabajo se implementó un método de extracción de minucias mediante el seguimiento de las líneas adelgazadas al ancho de 1 pixel, eliminando falsas minucias presentes en los bordes del dedo. El método aplicado sobre las huellas vivas permitió extraer minucias del tipo bifurcación y término que permitirían comparar estas huellas con huellas dactilares guardadas en una base de datos y obtenidas mediante sensores especializados.

Se extrajo la huella viva de 120 imágenes correspondientes a 24 dedos distintos (5 muestras por dedo) y se obtuvieron minucias de cada una de ellas. A partir de las huellas binarizadas y adelgazadas se implementó el proceso de comparación, pero no mediante la comparación de minucias, sino mediante el análisis de patrones de las imágenes a través de la aplicación de la transformada SIFT para realizar el *matching* de características, considerando también la eliminación de *matches* incorrectos mediante el algoritmo RANSAC. El proceso de *matching* de huellas con este método arrojó resultados con bajas tasas de Sensibilidad y Especificidad y, si

bien la aplicación de RANSAC sirvió para reducir *matches*, el resultado final no produce mejoras sustanciales respecto de usar sólo SIFT. Se estableció que si se requiere una alta sensibilidad, esta sería a costa de una baja especificidad. Así, equilibrando ambos indicadores, se llegó a una sensibilidad del 59%, una especificidad del 76% y una exactitud del 75%. Una mejoría y cumplimiento cabal del objetivo de poder comparar favorablemente dos huellas son parte de un trabajo futuro del cual se hace mención a continuación.

5.2 Trabajo Futuro

Existen diversas aristas que merecen ser estudiadas en profundidad para mejorar la precisión de los algoritmos y sobrepasar obstáculos de la implementación. Parte de estos aspectos se relacionan con las etapas de adquisición, extracción de minucias y comparación de huellas dactilares.

Respecto a la etapa de adquisición, al desarrollarse un sistema que puede ser utilizado por un usuario en distintas condiciones de iluminación, es necesario explorar nuevos métodos para poder estandarizar este aspecto. Así mismo, podría acelerarse el proceso de detección-enfoque y captura, para evitar movimientos involuntarios.

En la extracción de minucias, queda propuesto el estudio de la eliminación de aquellas que correspondan a minucias falsas, enfocándose en aquellas que se detectan a una distancia muy pequeña entre sí.

Acerca del proceso de comparación de huellas, quedan como problemas propuestos: la construcción de una base de datos aún mayor que presente un equilibrio entre los casos de comparación positiva y negativa y con más muestras para el estudio; la construcción paralela de una base de datos con huellas a partir de sensores clásicos para compararlas con las obtenidas con la cámara; y la implementación de nuevos métodos de comparación en base a patrones de la imagen. Inclusive podría mejorarse el uso de la transformada SIFT implementando el sistema propuesto en [39].

El desafío está en mejorar el sistema implementado, pudiendo hacerse esto en cada una de sus etapas y también, a futuro, implementarlo completamente en un dispositivo móvil.

Bibliografía

- [1] D. Maio, D. Maltoni y C. Rizzi, «An Efficient Approach to On-Line Fingerprint Verification,» de *VIII Int. Symp. on Artificial Intelligence*, Mexico, 1995.
- [2] A. K. Jain, A. Ross y S. Prabhakar, «An Introduction to Biometric Recognition,» *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, vol. 14, n° 1, pp. 4-20, 2004.
- [3] E. Morales, Memoria para Optar al Título de Ingeniero Civil Electricista: Detección Automática de Vectores de Características en Huellas Dactilares, Santiago: Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento de Ingeniería Civil Eléctrica, 2000.
- [4] J. L. Wayman, «Fundamentals of Biometric Authentication Technologies,» *Int J. Image Graphics*, vol. 1, n° 1, pp. 93-113, 2001.
- [5] J. Shea, Handbook of Fingerprint Recognition, Electrical Insulation Magazine, IEEE, 2004.
- [6] Z. Singhal, P. Gupta y K. Garg, «Biometric Recognition: Personal Identification Technique,» *IJCEM International Journal of Computational Engineering & Management*, vol. 15, n° 3, pp. 6-10, 2012.
- [7] Hashiyada, Masaki. DNA biometrics, Biometrics, Dr. Jucheng Yang (Ed.), ISBN: 978-953-307-618-8, «InTech,» 2011. [En línea]. Available: <http://www.intechopen.com/books/biometrics/dna-biometrics>.
- [8] B. Victor, K. Bowyer y S. Sarkar, «An Evaluation of Face and Ear Biometrics,» de *Proceedings of International Conference on Pattern Recognition*, 2002.
- [9] R. Brunelli y T. Poggio, «Face Recognition: Features Versus Templates,» *Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions*, vol. 15, n° 10, pp. 1042-1052, 1993.
- [10] E. Bagherian y R. Rahmat, «Facial Feature Extraction for Face Recognition: a Review,» *Information Technology, 2008. ITSIM 2008. International Symposium on*, vol. 2, pp. 1-9, 26-28 Aug. 2008.
- [11] C. Perez y L. Castillo, «Illumination Compensation for Face Recognition by Genetic Optimization of the Self-Quotient Image Method,» *Optomechatronic Technologies, 2009. ISOT 2009. International Symposium*, pp. 322-327, 21-23 Sept. 2009.
- [12] Sanchit, M. Ramalho, P. Correia y L. Soares, «Biometric Identification Through Palm and Dorsal Hand Vein Patterns,» *EUROCON - International Conference on Computer as a Tool (EUROCON), 2011 IEEE*, pp. 1-4, 27-29 April 2011.
- [13] A. Yuksel, L. Akarun y B. Sankur, «Hand Vein Biometry Based on Geometry and Appearance Methods,» *Computer Vision, IET*, vol. 5, n° 6, pp. 398-406, 2011.

- [14] M. Hofmann y G. Rigoll, «Exploiting Gradient Histograms for Gait-Based Person Identification,» *Image Processing (ICIP), 2013 20th IEEE International Conference*, pp. 4171-4175, 15-18 Sept. 2013.
- [15] O. Ayurzana, B. Pumbuurei y H. Kim, «A Study of Hand-Geometry Recognition System,» *Strategic Technology (IFOST), 2013 8th International Forum*, vol. 2, pp. 132-135, 2013.
- [16] R. Wildes, «Iris Recognition: An Emerging Biometric Technology,» *Proceedings of the IEEE*, vol. 85, n° 9, pp. 1348-1363, 1997.
- [17] J. Daugman, «How iris recognition works,» *Circuits and Systems for Video Technology, IEEE Transactions*, vol. 14, n° 1, pp. 21-30, 2004.
- [18] S. Venkatachalam, P. Kannan y V. Palanisamy, «Combining Cryptography with Biometrics for Enhanced Security,» *Control, Automation, Communication and Energy Conservation, 2009. INCACEC 2009. 2009 International Conference*, pp. 1-6, 4-6 June 2009.
- [19] C. Wongchoosuk, M. Lutz, T. Puntheeranurak, T. Youngrod, H. Phetmung y T. Kerdcharoen, «Identification of People from Armpit Odor Region Using Networked Electronic Nose,» *Defense Science Research Conference and Expo (DSR), 2011*, pp. 1-4, 3-5 Aug. 2011.
- [20] E.-S. Saad, M. Eladawy y R. Aly, «Person Identification Using Palmprint,» *Radio Science Conference, 2008. NRSC 2008. National*, pp. 1-9, 18-20 March 2008.
- [21] L. Latha, M. Pabitha y S. Thangasamy, «A Novel Method for Person Authentication Using Retinal Images,» *Innovative Computing Technologies (ICICT), 2010 International Conference*, pp. 1-6, 12-13 Feb. 2010.
- [22] A. A. M. Abushariah, T. Gunawan, J. Chebil y M. A. M. Abushariah, «Automatic Person Identification System Using Handwritten Signatures,» *Computer and Communication Engineering (ICCCE), 2012 International Conference*, pp. 560-565, 3-5 July 2012.
- [23] P. Phillips, A. Martin, C. Wilson y M. Przybocki, «An Introduction Evaluating Biometric Systems,» *Computer*, vol. 33, n° 2, pp. 56-63, 2000.
- [24] R. Cappelli, D. Maio, D. Maltoni, J. L. Wayman y A. K. Jain, «Performance Evaluation of Fingerprint Verification Systems,» *IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence*, vol. 28, n° 1, pp. 3-18, 2006.
- [25] R. Bansal, P. Sehgal y P. Bedi, «Minutiae Extraction from Fingerprint Images - a Review,» *IJCSI International Journal of Computer Science Issues*, vol. 8, n° 3, 2011.
- [26] L. H. Thai y H. N. Tam, «Fingerprint Recognition Using Standardized Fingerprint Model,» *IJCSI International Journal of Computer Science*, vol. 7, n° 7, pp. 11-17, 2010.
- [27] R. Cappelli y D. Maio, «The State of the Art in Fingerprint Classification,» de *Automatic Fingerprint Recognition Systems*, New York, Springer, 2004, pp. 183-205.

- [28] F. Galton, *Finger Prints*, Mc Millan, 1892.
- [29] R. Cappelli y D. Maltoni, «On the Spatial Distribution of Fingerprint Singularities,» *Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transaction*, vol. 31, n° 4, pp. 742-748, 2009.
- [30] E. Newham, «The Biometric Report,» New York: SJB Services, 1995.
- [31] A. Mishra y M. Shandilya, «Fingerprint's Core Point Detection Using Gradient Field Mask,» *International Journal of Computer Applications*, vol. 2, n° 8, pp. 19-23, 2010.
- [32] S. Basak, I. Islam y M. R. Amin, «Detection of a Virtual Core Point a Fingerprint: a New Approach,» *International Journal of Soft Computing and Engineering (IJSCE)*, vol. 2, n° 2, pp. 2231-2307, 012.
- [33] S. Prabhakar, A. Ivasinov y A. Jain, «Biometric Recognition: Sensor Characteristics and Image Quality,» *IEEE Instrumentation and Measurement Magazine*, vol. 14, n° 3, pp. 10-16, 2011.
- [34] V. M. Agrawal, V. H. Shah y A. P. Patel, «Review of Three Categories of Fingerprint Recognition,» *International Journal of Management Research and Development (IJMRD)*, vol. 4, n° 1, pp. 85-89, 2014.
- [35] K. Nandakumar y A. K. Jain, «Local Correlation-Based Fingerprint Matching,» *Proceedings of ICVGIP*, pp. 503-508, 2004.
- [36] A. Lindoso, L. Entrena, C. Lopez-Ongil y J. Liu, «Correlation-Based Fingerprint Matching Using FPGAs,» *Field-Programmable Technology, 2005. Proceedings. 2005 IEEE International Conference*, pp. 87-94, 2005.
- [37] D. Karna, S. Agarwal y S. Nikam, «Normalized Cross-Correlation Based Fingerprint Matching,» *Computer Graphics, Imaging and Visualisation, 2008. CGIV '08. Fifth International Conference*, pp. 229-232, 2008.
- [38] H. Kekre, T. Sarode y R. Vig, «Fingerprint Identification Using Sectorized Cepstrum,» *International Journal of Computer Applications*, vol. 8, n° 1, pp. 12-15, 2010.
- [39] J. Ruiz del Solar, P. Loncomilla y C. Devia, «A New Approach for Fingerprint Verification Based on Wide Maseline Matching Using Local Interest Points and Descriptors,» *D. Mery and L. Rueda (Eds.): PSIVT 2007, LNCS 4872*, pp. 586-599, 2007.
- [40] K. Ito, A. Morita, T. Aoki, H. Nakajima, K. Kobayashi y T. Higuchi, «A Fingerprint Recognition Algorithm Combining Phase-Based Image Matching and Feature-Based Matching,» *Proc. of International Conference on Biometrics (ICB)*, pp. 316-325, 2005.
- [41] A. Jain, Y. Chen y M. Demirkus, «Pores and Ridges: Fingerprint Matching Using Level 3 Features,» *Pattern Recognition, 2006. ICPR 2006. 18th International Conference*, vol. 4, n° 2006, pp. 477-480.

- [42] L. O'Gonnan y J. Nickerson, «Matched Filter Design for Fingerprint Image Enhancement,» *International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, pp. 916-919, 1988.
- [43] S. Greenberg, M. Aladjem, D. Kogan y I. Dimitrov, «Fingerprint Image Enhancement Using Filtering Techniques,» *Pattern Recognition, 2000. Proceedings. 15th International Conference*, vol. 3, pp. 322-325, 2000.
- [44] L. Hong, Y. Wan y A. Jain, «Fingerprint Image Enhancement: Algorithm and Performance Evaluation,» *Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions*, vol. 20, n° 8, pp. 777-789, 1998.
- [45] D. Maio y D. Maltoni, «Direct Gray-Scale Minutiae Detection in Fingerprints,» *Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions*, vol. 19, n° 1, pp. 27-40, 1997.
- [46] W. Wang, J. Li, F. Huang y H. Feng, «Design and Implementation of Log-Gabor Filter in Fingerprint Image Enhancement,» *Pattern Recognition Letters*, vol. 29, n° 3, pp. 301-308, 2008.
- [47] A. Çavuşoğlu y S. Görgünoğlu, «A Fast Fingerprint Image Enhancement Algorithm Using a Parabolic Mask,» *Computers & Electrical Engineering*, vol. 34, n° 3, pp. 250-256, 2008.
- [48] V. Govindaraju y Z. Shi, «A Chaincode Based Scheme for Fingerprint Feature Extraction,» *Pattern Recognition Letters*, vol. 27, n° 5, p. 462–468, 2006.
- [49] S. Di Zenzo, L. Cinque y S. Levialdi, «Run-Based Algorithms for Binary Image Analysis and Processing,» *Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions*, vol. 18, n° 1, pp. 83-89, 1996.
- [50] J.-H. Shin, H.-Y. Hwang y S.-I. Chien, «Detecting Fingerprint Minutiae by Run Length Encoding Scheme,» *Pattern Recognition*, vol. 39, n° 6, pp. 1140-1154, 2006.
- [51] M. Gamassi, V. Piuri y F. Scotti, «Fingerprint Local Analysis for High-Performance Minutiae Extraction,» *Image Processing, 2005. ICIP 2005. IEEE International Conference*, vol. 3, pp. 265-268, 2005.
- [52] E. Alibeigi, M. Rizi y P. Behnamfar, «Pipelined Minutiae Extraction from Fingerprint Images,» *Electrical and Computer Engineering, 2009. CCECE '09. Canadian Conference*, pp. 239-242, 2009.
- [53] R. Kaur, P. Sandhu y A. Kamra, «A Novel Method for Fingerprint Feature Extraction,» *Networking and Information Technology (ICNIT), 2010 International Conference*, pp. 1-5, 2010.
- [54] V. Humbre, S. Gornale, R. Manza y K. V. Kale, «Mathematical Morphology Approach for Genuine Fingerprint Feature Extraction,» *Vikas Humbe, S. S. Gornale, Ramesh Manza & K. V. Kale International Journal of Computer Science and Security*, vol. 1, n° 2, pp. 53-59, 2007.

- [55] R. Bansal, P. Sehgal y P. Bedi, «Effective Morphological Extraction of True Fingerprint Minutiae based on the Hit or Miss Transform,» *International Journal of Biometrics and Bioinformatics(IJBB)*, vol. 4, n° 2, pp. 71-85, 2010.
- [56] V. Sagar y K. Alex, «Hybrid Fuzzy Logic and Neural Network Model for Fingerprint Minutiae Extraction,» *Neural Networks, 1999. IJCNN '99. International Joint Conference*, vol. 5, pp. 3255-3259, 1999.
- [57] M. O. Derawi, B. Yang y B. Christoph, «Fingerprint Recognition With Embedded Cameras on Mobile Phones,» *Security and privacy in mobile information and communication systems. Lecture notes of the Institute for Computer Sciences, Social Informatics and Telecommunications Engineering*, vol. 94, pp. 136-147, 2012.
- [58] C. Stein, C. Nickel y C. Busch, «Fingerphoto Recognition with Smartphones Cameras,» de *Biometrics Special Interest Group (BIOSIG), 2012 BIOSIG - Proceedings of the International Conference of the*, Darmstadt, 2012.
- [59] (. International Organization for Standarization, *Information Technology. Biometric Data Interchange Formats. Part 2: Finger Minutiae Data. Norma ISO/IEC 19794-2:2011*, 2011.
- [60] M.-P. Dubuisson y A. Jain, «A Modified Hausdorff Distance for Object Matching in Pattern Recognition,» de *Conference A: computer vision and image processing, proceedings of 12th IAPR*, Israel, 1994.
- [61] H. Ravi y S. Kuduwa Sivanath, «A Novel Method for Touch-Less Fingerprint Authentication,» de *Technologies for Homeland Security (HST), 2013 IEEE International Conference on*, Waltham, MA, 2013.
- [62] K. E Ikeuchi, «Retinex Algorithm,» de *Computer Vision*, Springer US, 2014, p. 677.
- [63] D. Kroon y C. Slump, «Coherence Filtering to Enhance the Mandibular Canal in Cone-Beam CT Data,» *Signal and Systems, University of Twente, Netherlands, IEEE-EMBS Benelux Chapter Symposium*, Nov 2009.
- [64] K. Matkovic, L. Neumann, T. Psik y W. Purgathofer, «Global Contrast Factor - a New Approach to Image Contrast,» *Computational Aesthetics in Graphics, Visualization and Imaging*, pp. 159-168, 2005.
- [65] M. J. Jones y J. M. Rehg, «Statistical Color Models with Application to Skin Detection,» de *Computer Vision and Pattern Recognition, 1999. IEEE Computer Society Conference on. (Volume 1)*, Fort Collins, CO, 1999.
- [66] J. Weickert y H. Schar, «A Scheme for Coherence-Enhancing Diffusion Filtering with Optimized Rotation Invariance,» *Journal of Visual Communication and Image Representation*, vol. 13, n° 1-2, pp. 103-118, 2002.
- [67] D. G. Lowe, «Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints,» *International Journal of Computer Vision*, vol. 60, n° 2, pp. 91-110, 2004.

A. Vedaldi y B. Fulkerson, «VLFeat: An Open and Portable Library of Computer Vision
[68] Algorithms,» 2008. [En línea]. Available: <http://www.vlfeat.org>.

L. Hong y A. Jain, «Fingerprint Enhancement,» de *Automatic Fingerprint Recognition
[69] Systems*, Springer New York, 2004, pp. 127-143.

Anexos

Anexo A: Filtro de Coherencia

Le método de filtrado mediante una difusión anisotrópica [63] consiste en dos pasos. El primero es la descripción de la estructura de la imagen con un tensor estructural o matriz de momentos de segundo orden. El segundo paso es transformar el tensor estructural en un tensor de difusión mediante un filtro de difusión que permite mejorar los bordes.

El tensor estructural está dado por:

$$J(\nabla u_\sigma) = G_\rho * (\nabla u_\sigma \nabla u_\sigma^T) \quad (0.1)$$

Donde la función G_ρ denota una Gaussiana con desviación estándar ρ , y u_σ es una versión regularizada de la imagen u , definida como $u_\sigma = G_\rho * u$. Los vectores propios de J dan orientaciones locales preferenciales y los correspondientes valores propios denotan el contraste local a lo largo de esas direcciones.

Los valores propios de $J = \begin{pmatrix} J_{11} & J_{12} \\ J_{12} & J_{22} \end{pmatrix}$ están dados por:

$$\mu_1 = \frac{1}{2} \left(J_{11} + J_{22} + \sqrt{(J_{11} - J_{22})^2 + 4J_{12}^2} \right) \quad (0.2)$$

$$\mu_2 = \frac{1}{2} \left(J_{11} + J_{22} - \sqrt{(J_{11} - J_{22})^2 + 4J_{12}^2} \right) \quad (0.3)$$

Y su primer vector propio $(\cos \alpha, \sin \alpha)^T$ satisface:

$$\begin{pmatrix} \cos \alpha \\ \sin \alpha \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2J_{12} \\ J_{22} - J_{11} + \sqrt{(J_{11} - J_{22})^2 + 4J_{12}^2} \end{pmatrix} \quad (0.4)$$

Es posible ver el filtrado de difusión anisotrópica con un tensor de difusión como una evolución de la imagen inicial mediante una ecuación del tipo:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \nabla \cdot (D \nabla u) \quad (0.5)$$

Donde $u(x, t)$ es la imagen en evolución, t denota el tiempo de difusión, y $D = \begin{pmatrix} D_{11} & D_{12} \\ D_{12} & D_{22} \end{pmatrix}$ es el tensor de difusión, una matriz simétrica definida positiva que se puede adaptar a la estructura local de la imagen.

Los elementos conformantes de la matriz D se pueden determinar a partir de los valores y vectores propios de J , pues hace uso de sus mismos vectores propios y es posible obtener sus valores propios mediante la llamada ecuación de Weickert de 2 dimensiones:

$$\lambda_1 = c_1 \quad (0.6)$$

$$\lambda_2 = \begin{cases} c_1 & \text{si } \mu_1 = \mu_2 \\ c_1 + (1 - c_1) \exp\left(-\frac{c_2}{(\mu_1 - \mu_2)^2}\right) & \text{si no} \end{cases} \quad (0.7)$$

Donde $c_1 \in (0,1)$ es una constante de suavizado global, y $c_2 > 0$ una constante de mejoramiento de los bordes suavizados.

De esta forma, los elementos del tensor e difusión D son:

$$D_{11} = \lambda_1 \cos^2 \alpha + \lambda_2 \sin^2 \alpha \quad (0.8)$$

$$D_{12} = (\lambda_1 - \lambda_2) \sin \alpha \cos \alpha \quad (0.9)$$

$$D_{22} = \lambda_1 \sin^2 \alpha + \lambda_2 \cos^2 \alpha \quad (0.10)$$

El procedimiento se repite en forma iterativa según el tiempo t fijado por el usuario.

Anexo B: Detalle de resultados para la extracción de minucias

La siguiente tabla muestra los resultados de minucias encontradas en las imágenes conformantes de la base de datos construida.

Tabla 6: Detalle de resultados para la extracción de minucias a partir de las huellas obtenidas. Se indican, de izquierda a derecha el dedo capturado, la muestra tomada del respectivo dedo, su respectivo valor del Factor Global de Contraste y las minucias encontradas, del tipo bifurcación y término. Parte 1

Dedo	Muestra	GCF	Minucias Bifurcación	Minucias Término
1	1	11,6163	122	65
	2	11,1783	124	71
	3	11,1517	108	75
	4	10,9567	87	69
	5	10,8319	105	70
2	1	11,5115	98	68
	2	10,3942	132	76
	3	10,6638	135	90
	4	10,0618	168	133
	5	10,8018	119	85
3	1	11,2523	141	109
	2	11,2156	110	58
	3	10,4027	99	50
	4	11,1003	106	48
	5	10,9144	168	94
4	1	11,8486	115	76
	2	11,3933	98	50
	3	10,9226	145	76
	4	11,1980	121	89
	5	10,8927	96	52
5	1	11,2586	81	63
	2	10,3091	139	53
	3	10,6061	98	45
	4	11,1067	195	89
	5	10,7898	88	46
6	1	11,5656	109	32
	2	11,0551	144	54
	3	10,1579	122	52
	4	11,4167	110	49
	5	10,6028	95	49

Tabla 7: Detalle de resultados para la extracción de minucias a partir de las huellas obtenidas. Se indican, de izquierda a derecha el dedo capturado, la muestra tomada del respectivo dedo, su respectivo valor del Factor Global de Contraste y las minucias encontradas, del tipo bifurcación y término. Parte 2

Dedo	Muestra	GCF	Minucias Bifurcación	Minucias Término
7	1	11,1708	80	55
	2	11,2840	130	51
	3	11,0548	72	70
	4	10,2794	152	88
	5	11,2950	104	65
8	1	10,6260	137	83
	2	10,8693	133	88
	3	10,0226	127	99
	4	10,2106	122	116
	5	11,0456	100	68
9	1	11,3172	80	57
	2	11,3538	114	71
	3	11,1844	161	93
	4	11,5847	129	47
	5	9,9256	193	97
10	1	11,2977	91	64
	2	11,0587	66	51
	3	11,2289	99	64
	4	10,7265	89	53
	5	10,8369	90	65
11	1	10,8388	96	55
	2	10,5082	136	107
	3	11,0145	126	72
	4	10,0229	115	100
	5	10,6351	132	78
12	1	11,0064	96	60
	2	10,6897	69	36
	3	10,9489	86	58
	4	11,1737	69	49
	5	11,8933	180	121

Tabla 8: Detalle de resultados para la extracción de minucias a partir de las huellas obtenidas. Se indican, de izquierda a derecha el dedo capturado, la muestra tomada del respectivo dedo, su respectivo valor del Factor Global de Contraste y las minucias encontradas, del tipo bifurcación y término. Parte 3

Dedo	Muestra	GCF	Minucias Bifurcación	Minucias Término
13	1	10,5154	75	44
	2	10,7246	115	55
	3	10,1690	63	48
	4	10,9587	82	46
	5	10,0241	131	79
14	1	10,2567	166	66
	2	10,5629	79	71
	3	10,7118	82	53
	4	10,6624	100	49
	5	10,4094	67	49
15	1	10,7122	80	45
	2	11,1586	103	50
	3	10,7858	135	72
	4	11,2696	113	61
	5	10,5183	129	68
16	1	11,0842	86	36
	2	10,9162	81	52
	3	10,1321	127	54
	4	10,1194	84	43
	5	10,0811	97	48
17	1	10,8410	127	87
	2	10,4074	126	78
	3	10,0609	128	63
	4	10,3212	172	86
	5	11,0321	89	60
18	1	11,1415	55	34
	2	11,0138	59	33
	3	10,5776	93	42
	4	10,4336	71	36
	5	11,4565	68	39

Tabla 9: Detalle de resultados para la extracción de minucias a partir de las huellas obtenidas. Se indican, de izquierda a derecha el dedo capturado, la muestra tomada del respectivo dedo, su respectivo valor del Factor Global de Contraste y las minucias encontradas, del tipo bifurcación y término. Parte 4

Dedo	Muestra	GCF	Minucias Bifurcación	Minucias Término
19	1	10,6836	104	55
	2	11,2607	77	50
	3	10,7100	111	52
	4	10,5013	125	58
	5	12,4674	101	47
20	1	11,0212	103	58
	2	11,0735	101	59
	3	10,9746	99	60
	4	10,9667	93	68
	5	9,8356	169	47
21	1	10,3714	130	57
	2	10,7272	133	80
	3	11,1530	86	80
	4	10,9958	116	51
	5	10,6209	90	51
22	1	10,7457	72	36
	2	11,4831	102	40
	3	11,1140	75	36
	4	10,8268	85	35
	5	10,4819	64	34
23	1	10,9615	104	57
	2	10,0780	105	68
	3	11,1028	108	71
	4	10,4742	121	72
	5	10,7552	96	39
24	1	10,2976	112	48
	2	11,1512	72	50
	3	11,0341	104	71
	4	10,5879	99	35
	5	10,5886	100	47