



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

---

**PROGRAMA DE MAESTRIA Y DOCTORADO EN  
INGENIERIA**

FACULTAD DE INGENIERIA

**DISEÑO DE UN SISTEMA REACCION-  
DIFUSION PARA HUELLAS DACTILARES**

**T E S I S**

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

**DOCTOR EN INGENIERIA**

INGENIERIA MECANICA – MECANICA APLICADA

P R E S E N T A :

**OSCAR IBAÑEZ OROZCO**

TUTORA:

**DRA. SUEMI RODRIGUEZ ROMO**

2008



**JURADO ASIGNADO:**

Presidente: Dr. Ismael Herrera Revilla

Secretario: Dr. Victor Manuel Castaño Meneses

Vocal: Dra. Suemi Rodríguez Romo

1<sup>er</sup>. Suplente: Dr. Jorge Carrera Bolaños

2<sup>do</sup>. Suplente: Dr. Demetrio Fabián García Nocetti

**Lugares donde se realizó la tesis:**

Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán, UNAM.

Facultad de Ingeniería, UNAM.

Centro de Física Aplicada y Tecnología Avanzada, UNAM.

TUTORA DE LA TESIS:

---

**DRA. SUEMI RODRIGUEZ ROMO**

Dedico esta tesis:

A la memoria del Dr. Vladimir Tchijov<sup>†</sup> por sus enseñanzas y consejos.

A la memoria del Mtro Adrián Juárez Abad<sup>†</sup> por mostrarnos que debemos luchar hasta el ultimo aliento.

A mi pequeña Vanya Lisseth por llegar a este mundo y darme la dicha de ser padre.

A Martha por ser la mejor compañera que yo pude desear.

A mis Padres por darme un hogar feliz y brindarme todo su cariño y apoyo.

Agradezco especialmente:

*A Dios*

Por estar siempre a mi lado y permitirme concluir esta etapa de mi vida.

*A la UNAM*

Por darme la oportunidad de realizar mis estudios de posgrado en sus aulas.

*A la Dra. Suemi*

Ya que sin su especial e incansable apoyo no hubiera sido posible el desarrollo de este trabajo de tesis.

*Al CONACYT*

Por el apoyo económico que me brindo durante mis estudios de doctorado.

# CONTENIDO

	Pág.
PREFACIO.	v
INDICE DE FIGURAS	vi
<b>CAPITULO 1. DISEÑO DE UN SISTEMA REACCIÓN-DIFUSIÓN PARA HUELLAS DACTILARES.</b>	<b>1</b>
1.1 INTRODUCCIÓN.	1
1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	2
1.3 HIPOTESIS.	2
1.4 OBJETIVOS.	3
1.5 JUSTIFICACIÓN.	3
1.6 REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.	4
<b>CAPITULO 2. SISTEMAS BIOMETRICOS.</b>	<b>5</b>
2.1 INTRODUCCIÓN.	5
2.2 ANTECEDENTES.	5
2.3 CLASIFICACIÓN.	7
2.3.1 SISTEMAS BIOMETRICOS ACTUALES.	9
2.4 EVALUACION DE SISTEMAS BIOMETRICOS.	13
2.5 BIOMETRIA Y RECONOCIMIENTO DE PATRONES.	14
2.6 APLICACIONES.	15
2.6.1 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LA BIOMETRÍA.	16
2.6.1.1 RECONOCIMIENTO POSITIVO.	16
2.6.1.2 RECONOCIMIENTO NEGATIVO.	17
2.6.1.3 PRIVACIDAD Y BIOMETRIA.	18
2.7 ERRORES DE VERIFICACIÓN EN SISTEMAS BIOMETRICOS.	19
2.8 REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.	22
<b>CAPITULO 3. SISTEMAS BIOMETRICOS BASADOS EN IDENTIFICACIÓN DE HUELLAS DACTILARES.</b>	<b>24</b>
3.1 INTRODUCCIÓN.	24
3.2 HUELLAS DACTILARES EN BIOMETRÍA.	25

3.2.1 CARACTERISTICAS PRINCIPALES DE LAS HUELLAS DACTILARES.	26
3.3 SISTEMA AUTOMATICO DE IDENTIFICACIÓN DE HUELLAS DACTILARES (AFIS).	27
3.3.1 OBTENCIÓN DE LA IMAGEN DE LA HUELLA DACTILAR.	29
3.3.1.1 TECNOLOGIA PARA EL ESCANEEO EN VIVO DE HUELLAS DACTILARES.	31
3.3.2 ASOCIACIÓN DE HUELLAS DACTILARES.	36
3.3.2.1 EXTRACCIÓN DE PUNTOS CARACTERISTICOS.	39
3.3.2.1.1 ESTIMACIÓN DE LA ORIENTACIÓN DEL CAMPO DE RUGOSIDADES.	40
3.3.2.1.2 DETECCIÓN DE LA RUGOSIDAD.	43
3.3.2.1.3 IDENTIFICACIÓN DEL TIPO DE MINUCIA.	44
3.4 DESEMPEÑO DE LOS SISITEMAS BIOMETRICOS BASADOS EN IDENTIFICACIÓN DE HUELLAS DACTILARES.	46
3.5 REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.	48
<b>CAPITULO 4. SISTEMA DIGITAL REACCIÓN-DIFUSIÓN PARA EL MEJORAMIENTO Y RESTAURACIÓN DE HUELLAS DACTILARES.</b>	<b>51</b>
4.1 INTRODUCCIÓN.	51
4.2 PATRONES EN SISTEMAS NATURALES.	52
4.3 SISTEMAS DE REACCIÓN-DIFUSIÓN.	55
4.3.1 DESCRIPCIÓN MATEMATICA DE LOS SISTEMAS DE REACCIÓN-DIFUSIÓN.	56
4.3.2 PRINCIPALES OSCILADORES QUIMICOS.	58
4.3.2.1 REACCIÓN QUIMICA BELOUSOV-ZHABOTINSKY.	58
4.3.2.2 REACCIÓN QUIMICA BRUSELADOR.	61
4.4 FORMACIÓN DE PATRONES ESPACIALES MEDIANTE MECANISMOS DE TURING.	62
4.4.1 ANALISIS DE LA ESTABILIDAD LINEAL Y EVOLUCIÓN DE PATRONES ESPACIALES.	64
4.5 SISTEMA DIGITAL REACCIÓN-DIFUSIÓN (DRD).	68
4.5.1 DERIVACIÓN DEL SISTEMA DIGITAL REACCIÓN-DIFUSIÓN.	69
4.6 REALCE DE HUELLAS DACTILARES.	71
4.7 REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.	79

<b>CAPITULO 5. EMPLEO DEL DRD ADAPTATIVO PARA LA RESTAURACION DE HUELLAS DACTILARES.</b>	<b>81</b>
5.1 DRD ADAPTATIVO	81
5.2 DESCRIPTORES DE HUELLAS DACTILARES	99
5.3 REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	102
<b>CONCLUSIONES</b>	<b>103</b>

## INDICE DE FIGURAS.

	Pág.	
Figura 2.1	Indicadores biométricos empleados en la actualidad.	9
Figura 2.2	División de las características biométricas.	13
Figura 2.3	Distribución de errores de verificación en sistemas biométricos.	20
Figura 2.4	Curva receptora de operaciones características.	21
Figura 3.1	Dispositivos biométricos que emplean huellas dactilares.	24
Figura 3.2	Tipos de minucias en huellas dactilares.	26
Figura 3.3	Características globales en huellas dactilares.	26
Figura 3.4	Minucias dominantes en las huellas dactilares.	27
Figura 3.5	Etapas de un AFIS.	29
Figura 3.6	Obtención de imágenes de huellas dactilares.	30
Figura 3.7	Estructura general de un escáner de huellas dactilares.	31
Figura 3.8	Sensores ópticos.	32
Figura 3.9	Sensores de estado sólido.	32
Figura 3.10	Sensores con tecnología de ultrasonido.	32
Figura 3.11	Tecnología basada en RITF.	33
Figura 3.12	Tecnología basada en RITF con lámina de prismas.	34
Figura 3.13	Tecnología con sensores de fibra óptica.	34
Figura 3.14	Tecnología con sensores electro ópticos.	35
Figura 3.15	Tecnología con sensores capacitivos.	35
Figura 3.16	Tecnología con sensores de ultrasonido.	36
Figura 3.17	Parámetros considerados en los puntos minucias.	39
Figura 3.18	Orientación del campo de rugosidades.	40
Figura 3.19	Orientación dominante por cada bloque.	42
Figura 3.20	Orientación de la rugosidad local.	44
Figura 3.21	Mapa de rugosidades idealmente adelgazado.	45
Figura 4.1	Patrones en la naturaleza.	51
Figura 4.2	Formación de patrones biológicos complejos.	54
Figura 4.3	Resultados del DRD de dos especies.	74
Figura 4.4	Resultados del DRD de dos especies.	75
Figura 4.5	Resultados del DRD de dos especies.	75
Figura 4.6	Resultados del DRD con tres especies.	76
Figura 4.7	Resultados del DRD con tres especies.	77
Figura 5.1	Campo direccional de las rugosidades contenidas en la imagen de la huella dactilar 1.	84
Figura 5.2	Campo direccional de las rugosidades contenidas en la imagen de la huella dactilar 2.	85

Figura 5.3	Campo direccional de las rugosidades contenidas en la imagen de la huella dactilar 3.	85
Figura 5.4	Campo direccional de las rugosidades contenidas en la imagen de la huella dactilar 4.	85
Figura 5.5	Imágenes resultantes de la aplicación del DRD adaptativo en la huella dactilar 1.	91
Figura 5.6	Imágenes resultantes de la aplicación del DRD adaptativo en la huella dactilar 2.	92
Figura 5.7	Imágenes resultantes de la aplicación del DRD adaptativo en la huella dactilar 3.	92
Figura 5.8	Imágenes resultantes de la aplicación del DRD adaptativo en la huella dactilar 4.	93
Figura 5.9	Superficie de respuesta para el DRD adaptativo con $A_1 = 1.2, A_2 = 0.8$	94
Figura 5.10	Superficie de respuesta para el DRD adaptativo con $A_1 = 1.2, A_2 = 1.0$	95
Figura 5.11	Superficie de respuesta para el DRD adaptativo con $A_1 = 1.2, A_2 = 1.2$	95
Figura 5.12	Superficie de respuesta para el DRD adaptativo con $A_1 = 1.0, A_2 = 0.8$	96
Figura 5.13	Superficie de respuesta para el DRD adaptativo con $A_1 = 1.0, A_2 = 1.0$	96
Figura 5.14	Superficie de respuesta para el DRD adaptativo con $A_1 = 1.0, A_2 = 1.2$	97
Figura 5.15	Superficie de respuesta para el DRD adaptativo con $A_1 = 0.8, A_2 = 0.8$	97
Figura 5.16	Superficie de respuesta para el DRD adaptativo con $A_1 = 0.8, A_2 = 1.0$	98
Figura 5.17	Superficie de respuesta para el DRD adaptativo con $A_1 = 0.8, A_2 = 1.2$	98

## PREFACIO

Las huellas dactilares son la forma más antigua empleada para la identificación de personas en base a sus características biométricas. A pesar del uso extendido de las huellas dactilares como identificador biométrico, poco análisis básico se ha aplicado a la singularidad de los puntos característicos ó minucias encontrados en las huellas dactilares. Un paso crítico en el estudio de las minucias en las huellas dactilares es el de obtener información confiable durante el proceso de extracción de características encontradas en la imagen. Sin embargo las imágenes de las huellas dactilares rara vez tienen una calidad perfecta, estas pueden estar degradadas o incompletas debido a diversos factores. De este modo es necesario emplear técnicas de mejoramiento y restauración de imágenes digitales con la finalidad de obtener una estimación más confiable en la localización de estos puntos característicos.

La estructura general de esta tesis esta conformada por cinco capítulos, en el primero se plantea la problemática a resolver con este trabajo de investigación y se proponen soluciones viables al respecto mediante la propuesta de objetivos y metas a alcanzar debidamente justificadas, en el segundo capitulo se aborda la temática relacionada con la biometría, sus identificadores y su aplicación en diversos sistemas biométricos, complementando con un análisis de sus aplicaciones ventajas y desventajas, encontrando que las huellas dactilares son el identificador biométrico de mayor relevancia en la actualidad, razón por la cual la temática del tercer capitulo es un resumen del estado del arte de las huellas dactilares y la descripción de los sistemas de identificación biométrica basados en este identificador, presentando la problemática encontrada en estos sistemas y exponiendo una solución basada en el fenómeno biológico de la formación de los patrones de las huellas dactilares. En el cuarto capitulo se abordan los antecedentes de este fenómeno biológico y se desarrolla el cuerpo principal de nuestra investigación mediante el desarrollo e implementación de un Sistema Digital de Reacción Difusión para el mejoramiento y restauración de huellas dactilares defectuosas e incompletas, experimentando con reacciones cinéticas de dos y tres morfógenos. En el quinto y ultimo capitulo se muestra una variante del modelo anterior de nombre Sistema Reacción Difusión Adaptativo, el cual tiene la finalidad de restaurar huellas dactilares defectuosas que puedan tener líneas o secciones incompletas. Para terminar con una propuesta original de uso de los parámetros del sistema de reacción-difusión digital como descriptores de la imagen durante el tratamiento de la misma.

Finalmente se muestran las conclusiones de nuestra investigación y planteamos nuevas líneas que quedan abiertas para ser desarrolladas en trabajos futuros.

# CAPITULO 1.

## DISEÑO DE UN SISTEMA REACCIÓN-DIFUSIÓN PARA HUELLAS DACTILARES.

### 1.1 INTRODUCCIÓN

Las características biométricas tales como huellas dactilares, rostro y voz ofrecen hoy en día un medio confiable de autenticación personal, teniendo gran aceptación en los ciudadanos y gobiernos de todo el mundo con aplicaciones en seguridad nacional, comercio electrónico y acceso a redes de computadoras, los cuales son solo algunos ejemplos.

Las huellas dactilares poseen características únicas e invariantes a lo largo de la vida del individuo, estas características hacen de las huellas dactilares un identificador biométrico bastante atractivo, razón por la cual las huellas dactilares han sido empleadas por más de un siglo como un identificador biométrico válido.

Sin embargo contrario a al creencia de que décadas de investigación en el área han logrado obtener la máxima fiabilidad en los sistemas de identificación personal basados en huellas dactilares, esto no es así ya que se trata de un problema abierto aun sin resolver. Teniendo como principal problemática la extracción confiable de los puntos característicos en las imágenes, ya que debido a factores diversos estas raras veces tienen una calidad perfecta, lo que repercute en generación de puntos característicos no deseados responsables de la baja eficiencia en los sistemas de identificación.

De este modo es necesario emplear técnicas de mejoramiento y restauración que sean inherentes a la naturaleza de formación de las huellas dactilares con la finalidad de obtener una estimación más confiable en la localización de estos puntos característicos.

Razón por la cual en este trabajo de tesis se busca coadyuvar a la implementación de un sistema digital reacción-difusión que permita una eficiente restauración de las imágenes de huellas dactilares defectuosas.

## 1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.

El desempeño obtenido en los algoritmos de extracción y asociación de características en los sistemas biométricos basados en identificación de huellas dactilares, dependen casi en su totalidad de la calidad de la imagen de donde se obtienen. En una gran cantidad de casos estas imágenes no son de la calidad deseada ya que presentan regiones de calidad excelente, buena, mediana y pobre en donde los patrones formados por las rugosidades de las huellas dactilares son extremadamente borrosos y corruptos, lo que genera diversos tipos de degradaciones como las que se exponen a continuación:

1. Las rugosidades no son continuas por lo que se observan huecos en algunas secciones.
2. La orientación en el campo que forman las rugosidades no se encuentra correctamente definida, debido a la presencia de ruido que une a las líneas paralelas.
3. Corte y estropeo de los pliegues.

Estas degradaciones presentadas en las imágenes de las huellas dactilares hacen que el proceso de extracción de características (minucias) sea una tarea de extrema dificultad, ya que es común que los siguientes sucesos se presenten en el proceso de extracción:

- a. Un número significativo de puntos característicos falsos son identificados como genuinos.
- b. Un gran número de puntos característicos genuinos quedan sin identificar.
- c. Se presentan grandes errores en la localización (posición y orientación) de los de puntos característicos.

Generándose así los “falsos positivos” propuestos en el trabajo de *George Doddington* [1], y que son los responsables de la baja eficiencia en los sistemas de reconocimiento de patrones.

## 1.3 HIPOTESIS.

Se piensa que los *falsos positivos* se resuelvan mediante tecnología que incluya el conocimiento de la formación del patrón biológico, con características globales que no necesariamente se basen en invariantes geométricos que se encuentren asociados a los puntos característicos.

## 1.4 OBJETIVOS.

Implementar un tratamiento digital mediante un sistema reacción-difusión [2], que permita una eficiente restauración de imágenes de huellas dactilares defectuosas especialmente orientado a los falsos positivos.

Este sistema tomará en cuenta el origen de formación del patrón biológico e incluirá una parte difusiva y otra oscilante no lineal que modelará la interacción de los morfogenos, comparando diversos sistemas reactivos y difusivos oscilantes.

El sistema propuesto se aplicará fundamentalmente a patrones biológicos, característica que lo vuelve sui géneris en comparación con la tecnología general de reconocimiento de imágenes.

## 1.5 JUSTIFICACIÓN.

Basándonos en que no existe un método capaz de efectuar una identificación de huellas dactilares 100% exitosa, y a que independientemente del método de asociación de huellas dactilares empleado siempre y cuando se base en identificación de puntos característicos existe un subconjunto de huellas dactilares cuya identificación en todos los casos es fallida, problemática que comúnmente aparece en diversos sistemas de reconocimiento y asociación de patrones y que nunca ha sido resuelto para el caso de las huellas dactilares. Este trabajo de investigación se enfoca en esta problemática proponiendo un método basado en el origen biológico de las huellas dactilares (reacción-difusión) para resolver el problema de falta de exactitud.

## REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.

1. Doddington George, Ligget W., Martin A., Przybocki M., Reynolds D., "Sheep's, Goats, Lambs, Wolves: An Analysis of individual Differences in Speaker Recognition Performance", in Proceedings of International Conference on Speech and Language Processing, (1998).
2. Turing A. M., *The chemical basis of morphogenesis*, Philosoph. Transaction Royal Society of London, vol. B.237, p.p.37-72, (1952).
3. Galton F., *"Finger Prints"*, Mc. Millan, London, (1892).
4. L. C. Jain, U. Halici, I Hayashi, S.B. Lee, S. Tsutsui, *"Intelligent Biometric Techniques in Fingerprint and Face Recognition"*, CRC Press, (1999).
5. D. Maltoni et al., *Handbook of Fingerprint Recognition*, Springer, (2003).

# CAPITULO 2.

## SISTEMAS BIOMETRICOS.

### 2.1 INTRODUCCION.

En un creciente mundo digital, la autenticación confiable de personas se ha convertido en una importante interfaz activa humano-computadora. Seguridad Nacional, comercio electrónico y acceso a redes de computadoras son algunos ejemplos en donde establecer la identidad de las personas es vital. Existen actualmente medidas de seguridad confiables basadas en conocimiento, tales como contraseñas o símbolos usados en tarjetas y pasaportes empleados para el control de accesos a espacios físicos o virtuales, estos métodos no son totalmente seguros. Insignias y tarjetas de acceso pueden ser compartidas o robadas, contraseñas y números de identificación personal pueden ser robadas electrónicamente, mas aun, estos no pueden diferenciar entre un usuario autorizado y otra persona que no tiene acceso a la información.

Identificadores biométricos tales como huellas dactilares, cara, voz, etc., ofrecen una forma confiable de identificación personal que puede evitar la problemática antes mencionada y que actualmente esta ganando aceptación entre ciudadanos y gobierno.

### 2.2 ANTECEDENTES.

La biometría es una ciencia que se dedica a la identificación de individuos a partir de una característica anatómica o un rasgo de su comportamiento, esta característica tiene la cualidad de ser relativamente estable en el tiempo, tal como una huella dactilar, la silueta de la mano, patrones de la retina o el iris, sin embargo los rasgos del comportamiento son menos estables, pues dependen de la disposición psicológica de la persona, por ejemplo la firma.

Durante miles de años hemos empleado para identificarnos unos de otros, características de nuestro cuerpo tales como cara, voz, porte, etc. Sin embargo no es hasta mediados del siglo XIX que se pone en práctica la idea de emplear diversas medidas del cuerpo humano (por ejemplo peso, estatura, longitud de los brazos, manos y pies) [1], para la identificación de personas, naciendo formalmente lo que hoy conocemos como Biometría.

Entenderemos por *sistema biométrico* como un sistema automatizado que realiza labores de reconocimiento, fundamentando sus decisiones mediante una característica personal que puede ser reconocida o verificada de manera automatizada.

La biometría ofrece diversas ventajas sobre los métodos tradicionales de verificación, sin embargo no cualquier característica anatómica puede ser utilizada con éxito por un sistema biométrico, para que esto así sea es necesario cumplir con las siguientes características:

1. **Universalidad:** Cualquier persona posee la característica.
2. **Unicidad:** La existencia de dos personas con una característica idéntica debe ser nula o con una probabilidad muy pequeña.
3. **Permanencia:** La característica no debe cambiar con el paso del tiempo.
4. **Cuantificación:** La característica puede ser medida en forma cuantitativa.

Sin embargo en los sistemas biométricos prácticos se deben de considerar algunos requerimientos de suma importancia:

1. **El desempeño.-** El cual se refiere a la exactitud, rapidez y robustez alcanzada en el proceso de identificación, además los recursos invertidos aunados al efecto de los factores ambientales y/u operacionales. El objetivo de esta restricción es comprobar si el sistema posee una exactitud y rapidez aceptable con un requerimiento de recursos razonable.
2. **La aceptabilidad.-** Restricción que nos indica el grado en que las personas están dispuestas a aceptar el uso de un sistema biométrico en su vida diaria. Es claro que el sistema no debe representar peligro alguno para los usuarios y debe inspirar "confianza" a los mismos, sin embargo factores psicológicos pueden afectar a esta última característica. Por ejemplo, el reconocimiento de una retina que requiere un contacto cercano de la persona con el dispositivo de reconocimiento, es una acción que puede desconcertar a ciertos individuos debido al hecho de tener su ojo sin protección frente a un "aparato". Sin embargo, las características anteriores están subordinadas a la aplicación específica y en efecto, para algunas aplicaciones el efecto psicológico de utilizar un sistema basado en el reconocimiento de características oculares será positivo, debido a que este método es eficaz e implica mayor seguridad.

**3. La fiabilidad.-** Nos indica cuán difícil es burlar al sistema. El sistema biométrico debe reconocer características de una persona viva, pues es posible crear dedos de látex, grabaciones digitales de voz, prótesis de ojos, etc., razón por la cual algunos sistemas incorporan métodos para determinar si la característica bajo estudio corresponde o no a la de una persona viva, siendo estos métodos empleados muy ingeniosos y usualmente más simples de lo que uno podría imaginar. Por ejemplo, un sistema basado en el reconocimiento del iris revisa patrones característicos en las manchas de éste, un sistema infrarrojo para chequear las venas de la mano detecta flujos de sangre caliente y lectores de ultrasonido para huellas dactilares revisan estructuras subcutáneas de los dedos.

Finalmente un sistema biométrico práctico debe de tener una aceptable exactitud y velocidad en el reconocimiento con un razonable uso de recursos e inofensivo para el usuario, además debe ser aceptado por la población y lo suficientemente robusto para soportar métodos fraudulentos.

Los anteriores requerimientos servirán entonces como criterio para descartar o aprobar alguna característica del cuerpo humano como *indicador biométrico*.

## 2.3 CLASIFICACIÓN.

Los sistemas biométricos pueden ser clasificados de acuerdo al número de sus aplicaciones siendo estas dependientes de sus características. *Wayman* [2] sugiere que todas las aplicaciones biométricas pueden ser clasificadas dentro de diversas categorías que se basan en las siguientes características:

**1. Cooperativa versus no-cooperativa.-** Se refiere al comportamiento del impostor en interacción con el sistema, es decir en un sistema de reconocimiento positivo es de gran interés del impostor el cooperar para ser aceptado como un usuario válido, sin embargo en un sistema de reconocimiento negativo el impostor no muestra ningún interés en cooperar con el sistema ya que el no desea ser reconocido.

**2. No cubierto versus Cubierto.-** Si el usuario está enterado de que está siendo sometido a un reconocimiento biométrico, la operación es catalogada como no cubierta y caso contrario en donde el usuario desconoce la aplicación de esta se trata de una aplicación cubierta.

**3. *Habitual versus no habitual.***- Se refiere a la frecuencia en que el usuario se ve envuelto en una operación de reconocimiento biométrico, siendo esta una importante consideración al momento de diseñar un sistema biométrico debido a que la familiaridad de los usuarios hacia el sistema afecta la exactitud del reconocimiento.

**4. *Atendido versus no atendido.***- Situación referida al proceso de adquisición de datos biométricos en donde una aplicación es observada, guiada o supervisada por un humano. Más aun, una aplicación puede tener un registro atendido pero un reconocimiento no atendido.

**5. *Ambiente estándar versus no estándar.***- Referido a si el sistema está siendo operado en un ambiente controlado (temperatura, presión, condiciones de iluminación, etc.). Esta clasificación es también importante para el diseño del sistema, es decir un sensor biométrico más resistente va a ser necesario para un ambiente no estándar.

**6. *Público versus privado.***- Referido a si los usuarios del sistema son clientes o empleados de la organización del sistema biométrico desplegado.

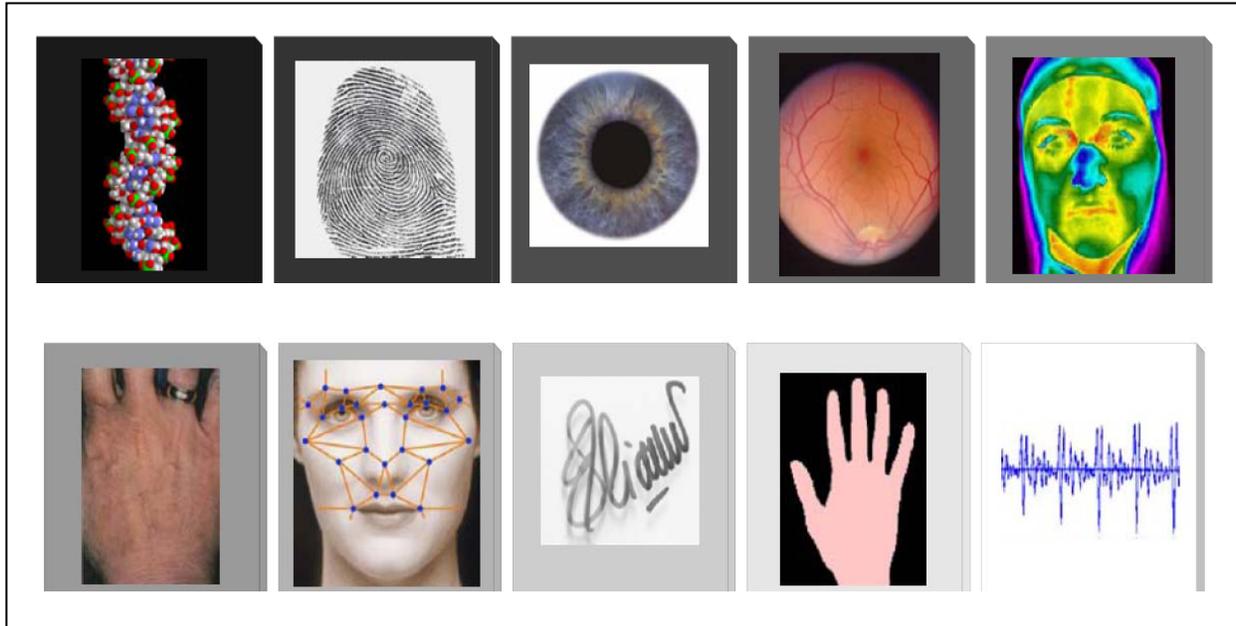
**7. *Abierto versus Cerrado.***- Situación presente cuando la plantilla biométrica del personal es usada para una sola aplicación o para múltiples aplicaciones.

En la actualidad los sistemas biométricos comerciales poseen los siguientes atributos: cooperatividad, abierto o cerrado, atendido, privado y un medio-ambiente estándar, sin embargo no se espera que un solo atributo biométrico maneje los requerimientos de todas las aplicaciones de forma efectiva. La asociación entre atributo biométrico y una aplicación determinada depende de las características de la aplicación y de las propiedades del mencionado atributo.

Un gran número de identificadores biométricos se emplean en diversas aplicaciones, cada indicador biométrico posee ventajas y desventajas dependiendo esto de la elección directa de cada aplicación.

### 2.3.1 SISTEMAS BIOMÉTRICOS ACTUALES.

Las técnicas biométricas actuales más conocidas se encuentran basadas en los siguientes indicadores biométricos:



**Figura 2.1** Indicadores biométricos empleados en la actualidad.

- **ADN:** Es el último y único código unidimensional para un individuo solamente excepto para los gemelos idénticos que tienen patrones idénticos de ADN, sin embargo existen algunas limitaciones en la utilización de este identificador biométrico.
- **OIDO:** Este es identificado por la forma del mismo y la estructura de sus cartílagos, las características de un oído no se esperan que sean únicas para cada individuo, este método de reconocimiento se basa principalmente en la comparación de la distancia de los puntos salientes de la punta como referencia de localización en el oído.
- **CARA:** La cara es uno de los indicadores biométricos más aceptables debido a que es uno de los métodos más comunes de reconocimiento para los humanos usando su interacción visual. Sin embargo es muy difícil el desarrollar una técnica de reconocimiento facial que pueda tener tolerancia a efectos tales como el envejecimiento, expresiones faciales y variaciones en la posición de la cara con respecto a la cámara (rotaciones en 2 y 3 dimensiones).

- **TERMOGRAFIA DE LA MANO y DEL ROSTRO:** Los patrones de calor irradiados por el cuerpo humano son una característica del cuerpo de cada individuo y pueden ser capturados por una cámara infrarroja en un medio de no obstrucción, similar a una fotografía. Esta tecnología puede ser usada para el reconocimiento y puede distinguir entre gemelos idénticos. Los sistemas basados en termografía son sin contacto y sin invasión, pero sensibles a cambios en ambientes no controlados, en donde el calor que emana de las superficies cercanas al a el cuerpo humano, tales como calefacción, vehículos, etc., pueden afectar de forma drástica la fase de obtención de la imagen.
  
- **ANDAR:** Es la peculiar forma de caminar y es un indicador biométrico espacio temporal complejo, este indicador no es muy distintivo pero es característica suficiente para efectuar verificación en algunas aplicaciones de baja seguridad. El andar es un comportamiento biométrico y es posible que presentar invariantes, especialmente durante largos periodos de tiempo debido a grandes fluctuaciones en el peso del cuerpo, accidentes, estado de ebriedad, siendo este un identificador biométrico aceptable ya que los sistemas basados en el andar emplean una video secuencia de los pasos al caminar de una persona para medir los diferentes movimientos de cada articulación.
  
- **GEOMETRIA DEL DEDO O LA MANO:** Algunas características relacionadas con la mano humana (longitud de los dedos), son relativamente peculiares e invariantes (sin embargo no muy distintivo) en un individuo. La adquisición de la imagen requiere cooperación del sujeto ya que es necesaria la captura frontal de imágenes y vistas del lado de la palma de la mano totalmente colocada en un panel. Los requerimientos para almacenar las diversas variables de este modelo son muy bajos, lo cual es una característica importante cuando se emplean sistemas con memoria limitada, haciendo de este método algo muy atractivo por los bajos requerimientos de recursos.
  
- **IRIS:** La textura visual del iris en los humanos es determinada por un proceso caótico de formación durante el desarrollo del embrión y es distinto para cada persona y para cada ojo. La imagen del iris es típicamente capturada usando un proceso de captura de no contacto, hacer esto involucra cooperación del usuario, siendo esta tecnología de reconocimiento extremadamente exacta y rápida.
  
- **OLOR:** Es conocido que cada objeto exuda un olor característico, debido a su composición química, lo que puede ser usado para distinguir entre ellos. El componente del olor emitido por el cuerpo humano o animal es distintivo de cada individuo en particular. No es claro si la invarianza en el olor del cuerpo pueda ser

detectada aun con el uso de desodorantes y variaciones químicas en la composición del medioambiente.

- **ESCANEAO DE RETINA:** Los vasos sanguíneos en la retina presentan una estructura bastante rica y compleja, siendo esta una característica diferente para cada individuo e inclusive para cada ojo, por lo que se presume ser llamado el identificador biométrico más seguro, partiendo de que esta característica no es fácil de cambiar ni de hacer una replica, sin embargo la adquisición de la imagen involucra cooperación por parte del individuo y es necesario entrar en contacto con parte del ojo, requiriéndose de esfuerzo por parte del usuario, afectando todos estos factores adversos su aceptación pública.
- **FIRMA:** La forma como una persona firma su nombre se sabe que es característica e individual, aunque el firmar requiera contacto y esfuerzo con el instrumento a escribir, este identificador biométrico tiene una excelente aceptación en diversas transacciones legales y comerciales como método de verificación de identidad. Es un comportamiento biométrico que cambia con el paso del tiempo además de ser influenciado por condiciones físicas y emocionales de los firmantes, la firma para algunas personas varia en un alto grado de una firma a otra además de existir profesionales que pueden reproducir firmas.
- **VOZ:** La cual es un identificador biométrico aceptable en casi todas las sociedades además de ser el único identificador biométrico que en sus aplicaciones requiere reconocimiento de la persona frente a teléfono. No se espera que la voz sea suficientemente distintiva como para permitir la identificación de un individuo mediante grandes bases de datos de identidades, siendo la señal de la voz viable únicamente para reconocimiento. Típicamente la calidad se ve degradada en el uso de micrófonos, canales de comunicación y características de digitalización, la voz es de igual forma afectada por el clima, estrés, emoción, etc., además algunas personas tienen la extraordinaria habilidad de imitar a otras.
- **HUELLAS DACTILARES:** Posiblemente el identificador biométrico mas aceptado en todo el mundo el cual posee características únicas de invariabilidad y unicidad aun para gemelos idénticos.

A continuación se muestra la tabla comparativa de las diversas tecnologías biométricas de acuerdo a los distintos factores vitales que deben ser considerados.

IDENTIFICADOR BIOMETRICO	UNIVERSALIDAD	UNICIDAD	PERMANENCIA	CUANTIFICACIÓN	DESEMPEÑO	ACEPTABILIDAD	POTENCIAL DE ENGAÑABILIDAD
ADN	A	A	A	B	A	B	B
OIDO	M	M	A	M	M	A	M
ROSTRO	A	B	M	A	B	A	A
TERMOGRAFIA FACIAL	A	A	B	A	M	A	B
HUELLAS DACTILARES	M	A	A	M	A	M	M
ANDAR	M	B	B	A	B	A	M
GEOMETRIA DE LA MANO	M	M	M	A	M	M	M
IRIS	A	A	A	M	A	B	B
OLOR	A	A	A	B	B	M	B
RETINA	A	A	M	B	A	B	B
FIRMA	B	B	B	A	B	A	A
VOZ	M	B	B	M	B	A	A

**Tabla 2.1** Comparativa de las diversas tecnologías biométricas (alto, medio y bajo son denotados por A, M y B, respectivamente).

Cada una de las anteriores técnicas posee ventajas y desventajas comparativas, las cuales deben tenerse en consideración al momento de decidir la técnica a utilizar en una aplicación específica.

En particular deben considerarse las diferencias entre los métodos anatómicos y los de comportamiento. Una huella dactilar, salvo daño físico, es la misma día a día, a diferencia de una firma que puede ser influenciada tanto por factores controlables como psicológicos no intencionales. Aunado a esto los equipos que miden las características físicas tienden a ser más grandes y costosos que los que detectan características de comportamiento. Debido a estas diferencias, no existe un sistema biométrico único que sea capaz de satisfacer todas las necesidades.

## DIVISIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS BIOMÉTRICAS EMPLEADAS PARA IDENTIFICACIÓN PERSONAL.-

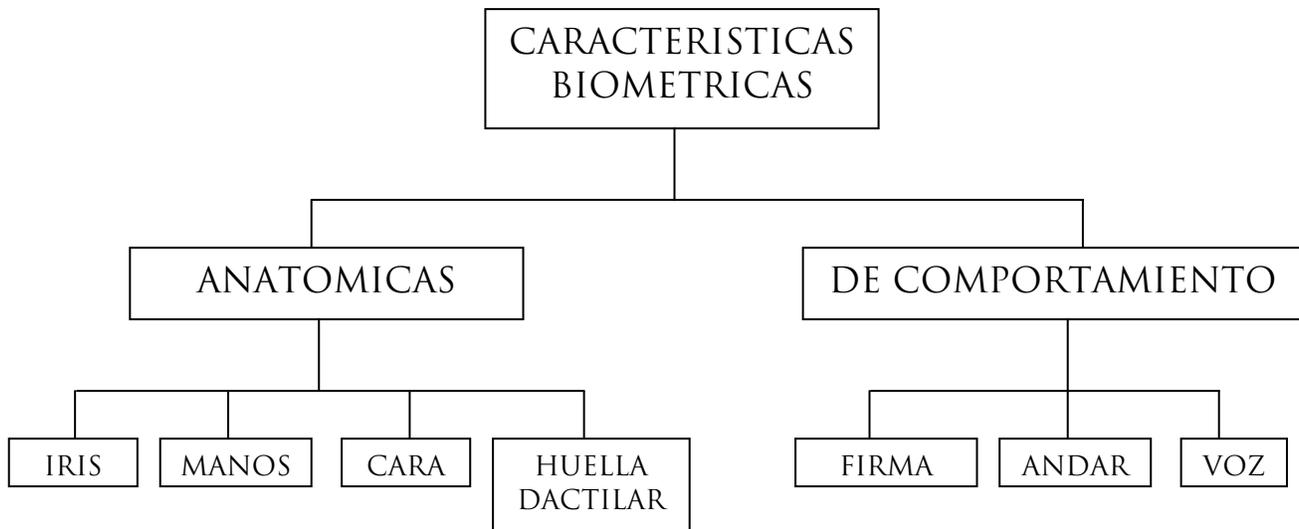


Figura 2.2 División de las características biométricas.

Un identificador biométrico que cumple con la mayoría de los requisitos establecidos es la huella dactilar, razón por la cual este indicador ha sido utilizado para identificación personal entre seres humanos por más de cien años. En la actualidad las huellas dactilares representan una de las tecnologías biométricas más maduras y son consideradas pruebas legítimas de evidencia criminal en cualquier corte del mundo.

### 2.4 EVALUACION DE SISTEMAS BIOMÉTRICOS.

Existen tres factores definidos para efectuar la evaluación de los sistemas biométricos [3], estos valores son: *evaluación tecnológica*, *evaluación del escenario* y *evaluación operacional*.

- **Evaluación tecnológica.-** El objetivo de la evaluación tecnológica es el de comparar la capacidad de los algoritmos que emplean una misma tecnología. Únicamente son probados algoritmos flexibles con un protocolo de entrada y salida [4] [5].
- **Evaluación del escenario.-** La meta de la evaluación del escenario es la de medir el desempeño del sistema completo dentro de un prototipo o aplicación simulada, esta prueba se aplica al sistema, en un ambiente similar al mundo real. Los sistemas

probados poseen su propio dispositivo de adquisición de imágenes, y los datos obtenidos son empleados en todos los sistemas para que estos trabajen dentro de un ambiente similar con la misma población [6].

- **Evaluación operacional.**- El objetivo de la evaluación operacional es el de determinar el desempeño de un sistema biométrico completo en un ambiente de aplicación específica con una muestra específica de población prevista. En general los resultados operacionales de la prueba no se repiten debido a diferencias indocumentadas y desconocidas entre los diversos ambientes operacionales [6].

En escenario y las evaluaciones operacionales la exactitud de los sistemas biométricos dependen fuertemente de variables tales como: la composición de la evaluación (ejemplos; ocupación, edad, demografía, raza), el medioambiente, el modo operacional del sistema y otras aplicaciones específicas contrastantes, por lo que técnicas rigurosas y realistas modelan la adquisición de datos y el proceso de comparación siendo esta la única forma de entender y extrapolar el resultado de la evaluación del desempeño.

Hasta que diversos aspectos de los algoritmos de reconocimiento biométrico y sus requerimientos de aplicación sean claramente entendidos, las técnicas de evaluación empíricas serán predominantes y la evaluación de los resultados obtenidos usando estas técnicas seguirán siendo significativas solamente para bases de datos en pruebas y aplicaciones específicas.

Sin embargo la desventaja de la evaluación empírica es que no solamente es costosa por recolectar los datos para cada evaluación, si no que también es frecuentemente difícil la objetividad de comparación en la evaluación de los resultados para dos sistemas diferentes.

En resumen, la evaluación del desempeño de los sistemas biométricos es empírico y el resultado de la evaluación no puede ser completamente entendido o comparado sin tener cuidado y tomar en cuenta la consideración los métodos empleados para obtener los resultados esenciales de la prueba.

## 2.5 BIOMETRÍA Y RECONOCIMIENTO DE PATRONES.

Hasta hace apenas diez años la biometría no existía como un campo de estudio separado. Este ha evolucionado a través de la interacción y confluencia de diversos campos de estudio. El reconocimiento de huellas dactilares emerge de la aplicación del reconocimiento de patrones en las ciencias forenses. El reconocimiento del habla

evoluciona en otro campo que es el de procesamiento de señales. El reconocimiento y detección de rostros ha sido largamente estudiado por la comunidad de visión computacional. Mientras que la biometría es considerada básicamente como una aplicación de las técnicas de reconocimiento de patrones, esta tiene grandes y sobresalientes diferencias en problemas de clasificación convencionales los cuales se enumeran a continuación.

1. En un problema convencional de clasificación de patrones tal como el reconocimiento óptico de caracteres, el número de patrones a clasificar es pequeño, comparado con el número de ejemplos viables para cada clase. Sin embargo en el caso del reconocimiento biométrico, el número de clases es tan grande como el conjunto de individuos en la base de datos, además de que es muy común de que una sola plantilla sea registrada por cada usuario.
2. La labor primaria en reconocimiento biométrico es la de elegir una característica apropiada de representación. Una vez que la característica ha sido cuidadosamente seleccionada, el acto de verificación es confiable y comúnmente emplea medidas simples como puede ser la distancia Euclidiana. Razón por la cual los aspectos más desafiantes de la identificación biométrica involucra procesamiento de señales e imágenes para la extracción de las características.
3. Modalidades como en el caso de las huellas dactilares, donde las plantillas son expresadas como un conjunto de minucias, las cuales no caen en la categoría tradicional multi-vectorial, características que comúnmente son usadas en reconocimiento de patrones.

## 2.6 APLICACIONES.

Diversas características biométricas están en uso en distintas aplicaciones y cada una de ellas tiene ventajas y desventajas, por lo que la opción correcta depende de la aplicación para la que este asignada. Una sola característica biométrica no puede cumplir con los requerimientos de todas las aplicaciones. Se efectúa una selección de la característica biométrica a una aplicación, dependiendo del modo operacional de la aplicación y de las propiedades de la característica biométrica. Por ejemplo las técnicas de identificación basadas en huellas dactilares e iris son más exactas que las técnicas basadas en el habla. Sin embargo en aplicaciones de banca por teléfono las técnicas basadas en voz son preferibles ya que el banco puede integrar esta técnica al sistema telefónico.

Las aplicaciones biométricas se clasifican dentro de tres grandes grupos principalmente:

- **Aplicaciones comerciales.-** Tal es el caso de redes de computadoras, seguridad electrónica de datos, comercio cibernético, acceso a Internet, ATMs, tarjetas de crédito, control de acceso físico, teléfonos celulares, administración de historias médicas y aprendizaje a distancia.
- **Aplicaciones gubernamentales.-** Tales como tarjetas de identificación nacional, correccionales, licencias de conducir, seguridad social, control fronterizo, control de pasaportes, distribución de asistencia social.
- **Aplicaciones forenses.-** Identificación de cadáveres, investigación criminal, identificación terrorista, identificación de paternidad en niños perdidos.

A continuación se examinan las ventajas y desventajas de la biometría en base a las aplicaciones arriba mencionadas.

## 2.6.1 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LA BIOMETRÍA.

En la categoría comercial, la aplicación requiere reconocimiento positivo y se pueden emplear los sistemas biométricos tanto en modo de verificación como de identificación. Por otro lado en las categorías gubernamentales y forenses se emplea principalmente en aplicaciones de reconocimiento negativo, lo cual requiere identificación del individuo.

### 2.6.1.1 RECONOCIMIENTO POSITIVO (APLICACIONES BIOMETRICAS COMERCIALES).

Las tecnologías tradicionales viables para obtener un reconocimiento positivo incluyen métodos basados en el conocimiento (usando por ejemplo contraseñas y NIPs) y métodos basados en señales (usando posesiones tales como llaves y tarjetas).

La mayoría de las personas crean sus contraseñas con palabras o dígitos que le sean fáciles de recordar, por ejemplo nombres y fechas de familiares, película favorita, etc. Tales contraseñas son fácilmente descifradas ya sea adivinando o por la fuerza bruta, sin embargo aunque es posible y previsible el tener diferentes contraseñas para distintas aplicaciones y acostumbrar cambiarlas frecuentemente la mayoría de la gente usa la misma contraseña en distintas aplicaciones y nunca cambia esta. Finalmente, cuando un usuario comparte su contraseña con un colega, es imposible para el sistema saber quien es el usuario real [7].

De forma similar los sistemas de identificación personal basados en posesión adolecen de grandes fallas; por ejemplo las llaves y los símbolos pueden ser compartidos, duplicados, perdidos, robados o simplemente pueden sufrir de un ataque de una llave maestra que pueda abrir diversas cerraduras.

La biometría es significativamente más difícil de copiar, compartir o distribuir, sin contar que no puede ser perdida u olvidada, además los sistemas de reconocimiento biométrico en línea requieren que la persona que va a ser reconocida este presente en el punto de reconocimiento. La principal ventaja de los sistemas biométricos es que estos dan al usuario una gran conveniencia ya que este no necesita recordar múltiples, largas y complejas contraseñas, manteniendo una alta exactitud y certeza de que los usuarios están presentes en el punto y tiempo de verificación.

#### 2.6.1.2 RECONOCIMIENTO NEGATIVO (APLICACIONES BIOMETRICAS GUBERNAMENTALES Y FORENSES).

Aplicaciones de reconocimiento negativo, tales como chequeo de formación personal en empleos y prevención de terroristas al abordaje de aviones, utilizan al reconocimiento personal en un modo de identificación. Sin embargo el nivel de exactitud empleado en la identificación es un problema mucho más difícil que en la verificación debido a que en los sistemas de identificación se exige un mayor rendimiento en un gran numero de comparaciones.

Otra aplicación del reconocimiento negativo, es el de consulta de formación personal, aplicaciones forenses e identificación criminal, pudiendo operar esta de modo semiautomático con una aceptable relación costo-beneficio. Por ejemplo en la asociación latente de huellas dactilares en agencias encargadas del cumplimiento de la ley se emplea típicamente un sistema automático de identificación de huellas dactilares.

En resumen el empleo de la biometría en aplicaciones de reconocimiento negativo no infringe la libertad civil debido a que no es posible encontrar a alguien en la base de datos criminal que no haya sido dado de alta con anterioridad.

### 2.6.1.3 PRIVACIDAD Y BIOMETRIA.

Definiendo a la privacidad como la habilidad para tener una vida libre de intrusiones, permitiéndote la autonomía de tener el total control al acceso de tu información personal.

La biometría incorpora tres libertades sistemáticas concernientes con la privacidad [8].

1. ***Campo funcional no atendido.***- A causa de que los identificadores biométricos son de origen biológico, los medios de recolección de datos pueden agregar información personal adicional no deseable. En algunos casos ciertas malformaciones pueden estar estadísticamente relacionadas con algunos desordenes genéticos. Con los rápidos avances en la investigación del genoma humano, se puede inferir en información mas completa únicamente medidas biológicas, convirtiéndose esto en las bases para una discriminación sistemática contra algunos segmentos poblacionales percibidos como riesgosos.
2. ***Campo de aplicación no atendido.***- Fuertes indicadores biométricos tales como las huellas dactilares tienen la habilidad de permitir la identificación de personas que no se desean ser encontradas, esto en situaciones en donde la persona por razones legales y de seguridad se encuentra bajo otra identidad. Los identificadores biométricos pueden también ligar secciones y piezas de información acerca del comportamiento de personas involucradas en diferentes aplicaciones; los detractores frecuentemente se basan en este potencial para acumular poder sobre los individuos y su autonomía.
3. ***Reconocimiento de secretos.***- Las características biométricas no son secretos pero con frecuencia es posible obtenerlos sin consentimiento mediante algunos identificadores biométricos como el rostro o el tono de voz de una persona. En consecuencia alguien que desee permanecer en el anonimato de una situación pueda estar perdiendo su privacidad mediante un reconocimiento biométrico.

Por lo que el posible mal uso de la información biométrica y sus causas relacionadas se pueden encontrar en las siguientes formas asociadas a legislaciones gubernamentales, aseguramiento de autorregulación y coacción de la autonomía mediante organizaciones regulatorias independientes.

## 2.7 ERRORES DE VERIFICACIÓN EN SISTEMAS BIOMÉTRICOS.

Considerando dos ejemplos de la misma característica biométrica que provienen de una misma persona, tal es el caso de dos impresiones del dedo índice derecho, no son exactamente iguales debido a condiciones de imperfección y ruido al obtener la imagen, cambios en la psicología del usuario ó características de comportamiento tales como cortaduras, golpes en los dedos, variación de las condiciones ambientales y principalmente debido a la interacción del usuario con el sensor. Por consiguiente los sistemas de asociación biométrica reaccionan a una marca de asociación típica  $S$  que usualmente esta representada por un solo número que cuantifica la similitud entre la imagen entrante y la plantilla existente en la base de datos. Un umbral  $t$  regula la decisión del sistema. El sistema infiere que pares de muestras biométricas generadas, poseen marcas mas elevadas o iguales a  $t$ , es decir son pares coincidentes (pertenecen a la misma persona), por lo que en consecuencia los pares de muestras biométricas que generan marcas por debajo del umbral  $t$  son pares no coincidentes.

La distribución de las marcas generadas por pares de muestras de diferentes personas son llamadas *distribución impostora* y la distribución de las marcas generadas por pares de la misma persona se llaman *distribución genuina* (figura 2.3 ).

Los sistemas de verificación biométrica producen principalmente dos tipos de errores:

**Falsa aceptación.-** Un impostor puede algunas veces ser aceptado como un usuario genuino si la similitud de su patrón cae dentro de la variación del usuario genuino.

**Falso rechazo.-** Cuando la señal biométrica adquirida es de mala calidad, puede ser que un usuario genuino sea rechazado durante la autenticación, razón por la cual es llamado falso rechazo.

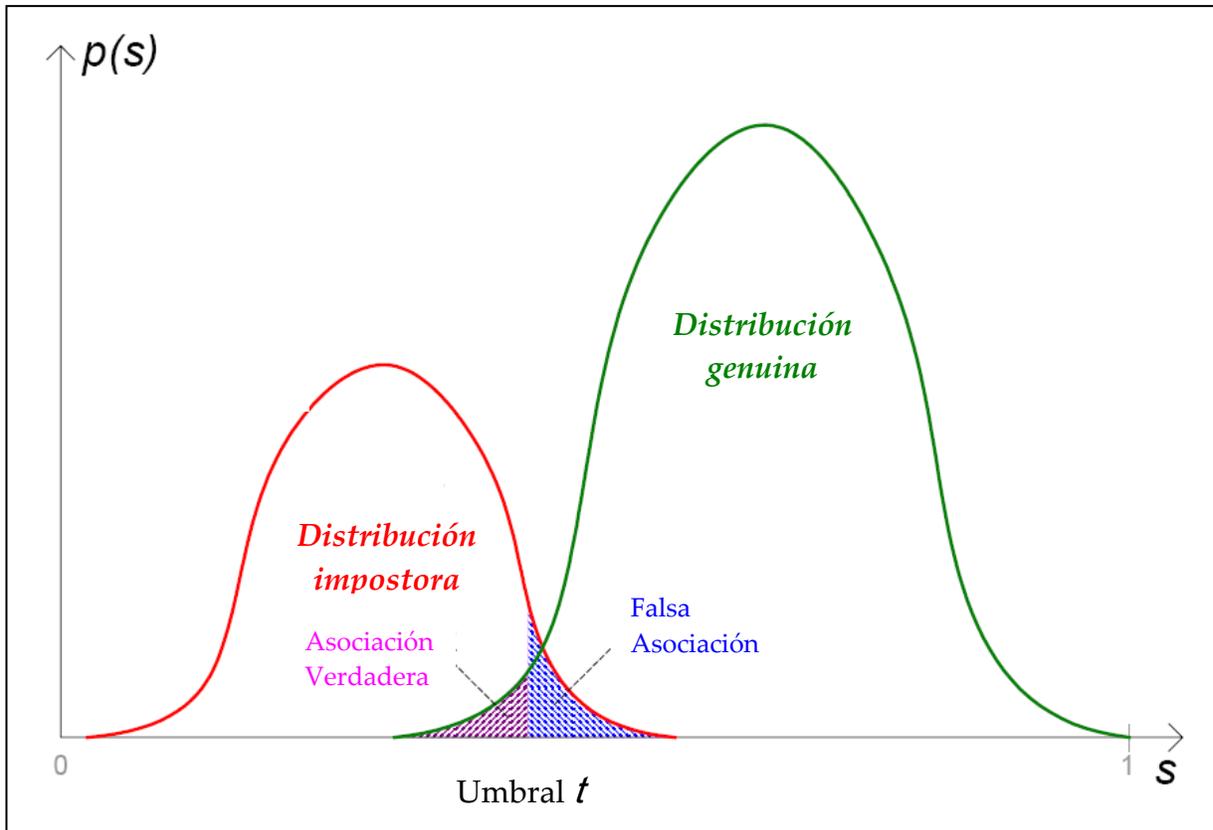


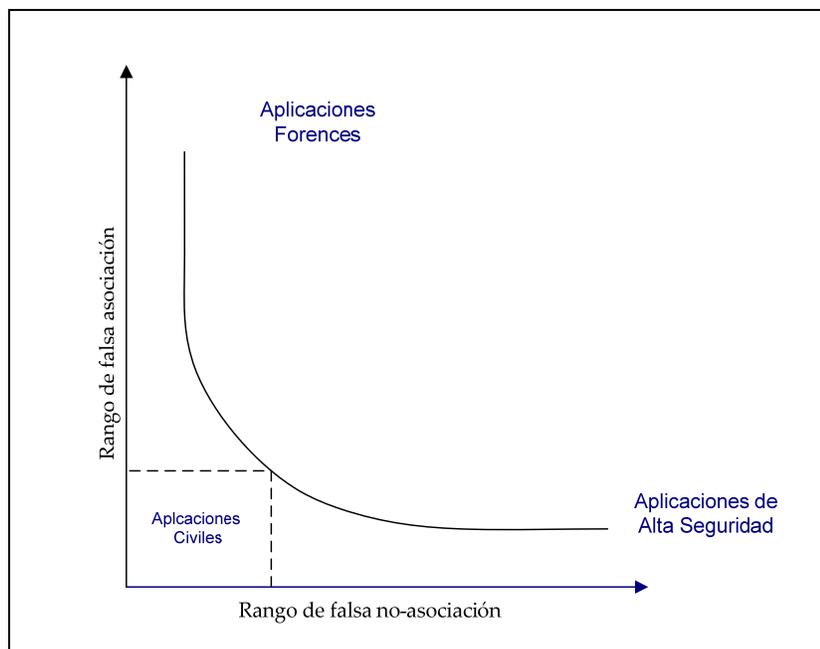
Figura 2.3 Distribución de errores de verificación en sistemas biométricos.

Sin embargo el sistema puede tener además otras formas menos frecuentes de error tales como:

**Falla en la adquisición.-** Es estimado que cerca del 4% de la población tiene huellas dactilares ilegibles, esto en su mayoría en la población adulta, personas que laboran empleando sus manos de manera excesiva o con daños individuales. Debido a la pobre estructura de las rugosidades en tales individuos no es posible dar de alta a estos individuos en la base de datos y por lo tanto no pueden ser posteriormente autenticados. Este tipo de individuos lleva el nombre de “cabras” en el zoológico de Doddington [21]. El sistema biométrico puede tener excepciones manejando mecanismos que permiten tratar este tipo de escenarios.

**Falla en la autenticación.-** Este tipo de error ocurre cuando el sistema es incapaz de extraer las características durante la verificación aun cuando esta era legible durante la adquisición. En el caso de las huellas dactilares esto puede ser causado debido al sudor excesivo, daño reciente entre otros. En el caso de los sistemas biométricos basados en el habla esto puede ser causado debido al frío, dolor de garganta, etc. La falla en la autenticación el rechazo ocurre en la misma etapa de extracción de características.

Un sistema biométrico operacional produce una respuesta de salida entre un rango de falsa asociación (RFA) y un rango de falsa no-asociación (RFNA) [9]. De hecho el RFA y el RFNA son funciones del umbral del sistema  $t$ . Si el diseñador del sistema disminuye el valor de  $t$  para hacer al sistema más tolerante al ruido y a otras variaciones, sin embargo el RFA se incrementa. Por otro lado si se incrementa  $t$  para hacer al sistema mas seguro, entonces el RFNA se incrementará de forma igualmente proporcional. Se puede describir al desempeño del sistema en todos los puntos posibles, mediante la curva receptora de operaciones características (CRO). Una CRO compara los RFA contra  $(1-\text{RFNA})$  ó los RFNA para distintos valores del umbral  $t$  (ver figura 2.4).



**Figura 2.4** Curva receptora de operaciones características.

Los requerimientos de exactitud en los sistemas biométricos dependen directamente de la aplicación, por ejemplo en algunas aplicaciones forenses como identificación criminal no requieren una exactitud muy alta sin embargo en aplicaciones de alta seguridad sucede lo contrario. Sin embargo hasta el día de hoy los errores de identificación en sistemas biométricos son una problemática no resuelta que merece un área de estudio independiente.

## REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.

1. Rhodes H.T.F., Alphonse Bertillon: *Father of Scientific Detection*, Abelard-Schuman, New York, (1956).
2. Wayman J.L., "Technical Testing and Evaluation of Biometric Identification Devices in Biometric." *Personal Identification in a Network Society*, pp. 345-368, Kluwer, New York, (1999).
3. Philips P.J. , Martin A., Wilson C. L. and Przybocki M., "An Introducción to Evaluating Biometric Systems", *IEEE Computer Magazine*, (2000).
4. Maio D., Maltoni D., Capelli R., Wayman J.L., and Jain A. K., "FVC2000: Fingerprint Verification Competition", *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 24, No. 3, pp. 402-412. (2002).
5. Maio D., Maltoni D., Capelli R., Wayman J.L., and Jain A. K., "FVC2000: Second Fingerprint Verification Competition", in *Proc. Int. Conference on Pattern Recognition (16<sup>th</sup>)*, vol.3, pp. 811-814, (2002).
6. United Kingdom Biometric Working Group, "Best Practices in Testing and Reporting Biometric Device Performance", *Technical Report version 2.01*, Aug., 2002.
7. B. Scheneier, "Inside Risk: The Uses and and Abuses of Biometric", *Communications of the ACM*, vol. 42, No. 8, (1999).
8. J.D. Woodward, "Biometrics: Privacy's Foe or Privacy's Friend?" *Procc. IEEE*, vol.85, No. 9, pp. 1480-1492, (1997).
9. D. Maltoni et al., *Handbook of Fingerprint Recognition*, Springer, (2003).
10. Jain A. K., Pankanti S., Bolle R., *Biometrics: Personal Identificación in Networked Society*, Kluwer Academic, New York, 1999.
11. Jain A. K., Pankanti S., *Biometric Recognition: Security and Privacy Concerns*. *IEEE Security and Privacy*, pp. 33-42, March of 2003.

12. Ratha N. K., Connell J., and Bolle R., Secure Biometric Authentication, Procc. Workshop on Automatic Identificación Advances Technologies, (1999).
13. Srihari S. N., Cha S. H., Arora H., and Lee S., Individuality of Handwriting: A validation Study, Procc. International Conference on Document Analysis and Recognition, (2001).
14. *Best Practices in Testing end Reporting Biometric Device Performance*, version 2.0, tech. Report, United Kingdom Biometric Working Group, 2002.
15. Passwords Clues, *The Central Nic Password Survey Report*, Central Nic, July 2001.
16. A. K. Jain and S. Pankanti, "Biometrics Systems: Anatomy of Performance", *IEICE Transactions Fundamentals*, Vol. E84-D, No. 7, pp. 788-799, 2001.
17. R. M. Bolle, J. H. Connell, S. Pankanti, N. K. Ratha, A. W. Senior, *Guide to Biometrics*. Springer, 2003.
18. Wayman, J., *A Definition of Biometrics*, in *National Biometric Test Center Collected Works*, J. Editor. National Biometric Test Center: San Jose, CA. p. 21-24., 2000.
19. "Biometrics: the Future of Identification," *IEEE Computer Magazine*, vol. 33, no. 2, pp. 46-81, 2000.
20. Strassberg, D. *Biometrics: You are your password*, EDN Access, May 1998.
21. Doddington George, Ligget W., Martin A., Przybocki M., Reynolds D., "Sheep's, Goats, Lambs, Wolves: An Analysis of individual Differences in Speaker Recognition Performance", in *Proceedings of International Conference on Speech and Language Processing*, (1998).

# CAPITULO 3.

## SISTEMAS BIOMETRICOS BASADOS EN IDENTIFICACIÓN DE HUELLAS DACTILARES.

### 3.1 INTRODUCCION.

Una huella dactilar es la representación de la morfología superficial de la epidermis de un dedo. La cual posee un conjunto de líneas que, en forma global, aparecen dispuestas en forma paralela y que se forman alrededor del sexto mes del desarrollo fetal siendo únicas e invariantes a lo largo de la vida del individuo [1].

Estas características hacen de las huellas dactilares un identificador biométrico bastante atractivo, razón por la cual las huellas dactilares han sido empleadas por más de un siglo como un identificador biométrico valido, siendo éste comúnmente empleado en ciencias forenses para dar soporte a investigaciones criminales y en dispositivos de sistemas biométricos con aplicaciones civiles y comerciales (figura 3.1).

Las huellas dactilares son formalmente aceptadas como un identificador personal valido desde mediados del siglo XIX [2] y se ha convertido en la forma más fiable de identificación personal, siendo esta utilizada en agencias gubernamentales alrededor de todo el mundo.



**Figura 3.1** Dispositivos biométricos que emplean huellas dactilares.

### 3.2 HUELLAS DACTILARES EN BIOMETRÍA.

Las huellas dactilares poseen grandes ventajas sobre otros identificadores biométricos que lo han llevado a ser el identificador biométrico más fiable y aceptado en la actualidad, destacando entre todas estas ventajas las siguientes:

**Perennidad.-** La perennidad se basa en el indudable hecho de que las huellas dactilares se forman a partir del sexto mes de vida intra-uterina, siendo perennes desde ese momento y hasta la descomposición del cadáver en que viene la desintegración. Inclusive los dibujos formados por las crestas papilares persisten miles de años en estado de momificación.

**Inmutabilidad.-** La inmutabilidad se apoya en el hecho de que las crestas papilares no pueden modificarse voluntaria ni patológicamente, pues hasta las lesiones, quemaduras y desgastes profesionales o intencionales que sufra una persona, se reproducen completamente siempre que no haya sido destruida profundamente la dermis [1].

**Diversidad.-** Por la diversidad de formas que tienen estos dibujos papilares, en los que jamás podrán hallarse dos iguales, podemos denominarlos diversiformes, pues aun concentrándose dos o mas con mucha semejanza, los puntos característicos que posee cada uno de ellos, hacen imposible tal acontecimiento. Siendo científicamente comprobado que ni cuestión de razas, sexo, gemelismo ni transmisión hereditaria influyen para encontrarse, como antes se dijo, dos huellas dactilares iguales ni en una serie de sesenta y cuatro millones.

**Universalidad.-** La gran mayoría de la población humana tiene huellas dactilares legibles y pueden además ser fácilmente autenticables.

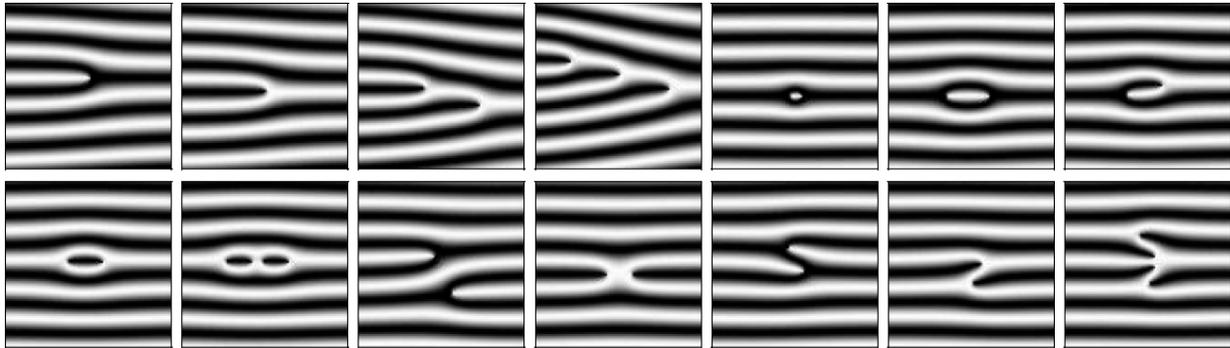
**Fácil colectividad.-** El proceso de recolección de huellas dactilares es con la invención de los sensores en línea muy fácil de realizar. Estos sensores tienen la capacidad de capturar imágenes de muy alta resolución en unos cuantos segundos.

**Alto desempeño.-** Las huellas dactilares poseen la más alta exactitud viable en modalidades biométricas.

**Amplia aceptación.-** Aunque la minoría de la población usuaria es negativa a permitir el escaneo de sus huellas dactilares, debido a la asociación de estas con criminalidad y bases de datos forenses, es como ya se menciono el uso de las huellas dactilares la modalidad más utilizada de identificación biométrica.

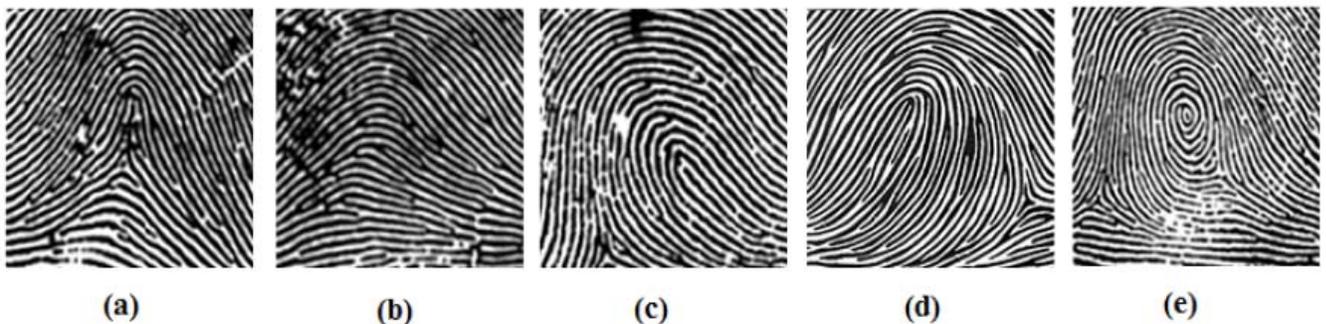
### 3.2.1. CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES DE LAS HUELLAS DACTILARES.

Las imágenes de las huellas dactilares pueden ser representadas de forma global o bien de manera local, las características globales incluyen la orientación de la rugosidad, espacio de rugosidades y puntos singulares, los cuales son ampliamente utilizados en la clasificación perspectiva, que se efectúa en base a las diversas clases de huellas dactilares.



**Figura 3.2** Tipos de minucias: Línea terminante, Bifurcación sencilla, Bifurcación doble, Bifurcación triple, Punto, Intervalo, Gancho, Espiral sencillo, Espiral doble, Línea Cruzada, Cruce, Contacto de Lado, Puente sencillo, Puente doble.

En 1888 Francis Galton establece los puntos característicos necesarios para la asociación de huellas dactilares [2], estos puntos característicos se encuentran definidos por los puntos donde las líneas terminan o se bifurcan, los cuales se conocen técnicamente como minucias (figura 3.2). Otros puntos singulares de una huella dactilar son aquellos donde la curvatura de las rugosidades es máxima recibiendo el nombre de núcleos y deltas (figura 3.3). La característica más interesante que presentan tanto las minucias como los puntos singulares, es que son únicos para cada individuo y permanecen inalterados a través de su vida.



**Figura 3.3** Características globales en huellas dactilares: (a) Arco con tendencia, (b) Arco, (c) Ciclo derecho, (d) Ciclo izquierdo, (e) Remolino.

Sin embargo las características globales no tienen suficiente poder discriminativo en ellas mismas como para implementar un algoritmo de asociación entre huellas dactilares por lo que estas son usadas para clasificación después de la extracción de las características locales.

150 tipos distintos de minucias han sido enumerados [3] y a pesar de esta variedad de minucias las más importantes son las *terminaciones* y *bifurcaciones* de rugosidades (figura 3.4). Esto último se debe a que las terminaciones de rugosidades representan aproximadamente el 60.6% de todas las minucias en una huella y las bifurcaciones el 17.9%. Además varias de las minucias menos típicas pueden expresarse en función de las dos señaladas.



**Figura 3.4** Minucias dominantes en las huellas dactilares.

### 3.3 SISTEMA AUTOMÁTICO DE IDENTIFICACION DE HUELLAS DACTILARES (AFIS).

Para el desarrollo de un Sistema Automático de Identificación de huellas dactilares se deben de considerar principalmente al menos cuatro etapas designadas: adquisición, representación, extracción de características y asociación.

1. **Adquisición.-** En esta primera etapa se obtiene la imagen de la huella dactilar, para lo cual se pueden emplear dos métodos: *fuera de línea* y *escaneo en vivo*, paso siguiente la imagen se debe de representar en un formato apropiado para su posterior procesamiento.
2. **Representación.-** Esta etapa constituye la esencia de la verificación de huellas dactilares y se refiere a la representación obtenida ya que en esta la información invariante y discriminatoria contenida en la imagen de la huella dactilar es capturada. Representaciones de la imagen de la huella dactilar basadas en escala de grises prevalecen entre los sistemas de verificación que emplean asociación óptica.

Sin embargo el desempeño de los sistemas usando este tipo de representación puede estar limitada por factores que afectan la calidad de la imagen, tales como variaciones de brillo, cicatrices, distorsiones globales, etc. Esto a consecuencia de que estos sistemas usualmente recurren a plantillas estratégicas de asociación.

3. **Extracción de Características.**- El extractor de características del sistema tiene la finalidad de encontrar y localizar los puntos característicos contenidos en la imagen entrante de la huella dactilar. Si las rugosidades pueden ser perfectamente localizadas el proceso de extracción de minucias es solamente una tarea trivial de extracción de puntos característicos sobre el mapa de rugosidades. Sin embargo, debido a un gran número de factores tales como aberrantes formaciones de la epidermis en las rugosidades de los dedos, marcas postnatales, marcas ocupacionales, imperfecciones adquiridas por el escáner, etc., en las imágenes obtenidas de las huellas dactilares puede que no siempre este bien definida la estructura de las rugosidades, además de que no siempre es posible obtener un mapa perfectamente definido de rugosidades. Debido al efecto de estas circunstancias, el desempeño del algoritmo de extracción de minucias va a depender fuertemente de la calidad de las imágenes obtenidas. Por lo que bajo estas circunstancias, los algoritmos de extracción de minucias se convierten en problemas de gran complejidad con un alto costo computacional.
4. **Asociación.**- En esta etapa dos imágenes de huellas dactilares dadas llamadas prueba y referencia, los componentes de asociación del sistema determinaran si las imágenes almacenadas son impresiones del mismo dedo. Usualmente en este modulo se determina una medida de similitud entre las dos huellas dactilares y se define un umbral para decidir si el par de huellas dactilares empleadas pertenecen o no a la misma persona.

Los componentes anteriormente mostrados generalmente se efectuan en dos fases (figura 3.5):

- **Fase fuera de línea:** La huella dactilar es digitalizada y tratada mediante el empleo de diversos algoritmos (filtros) con la finalidad de mejorar la calidad de la imagen, para posteriormente extraer sus características y almacenarlas en una base de datos.
- **Fase en línea:** En esta fase la huella dactilar se digitaliza, se trata y se extraen sus características, creando un modelo de comparación para inmediatamente asociarlo con los modelos almacenados en la plantilla de la base de datos.

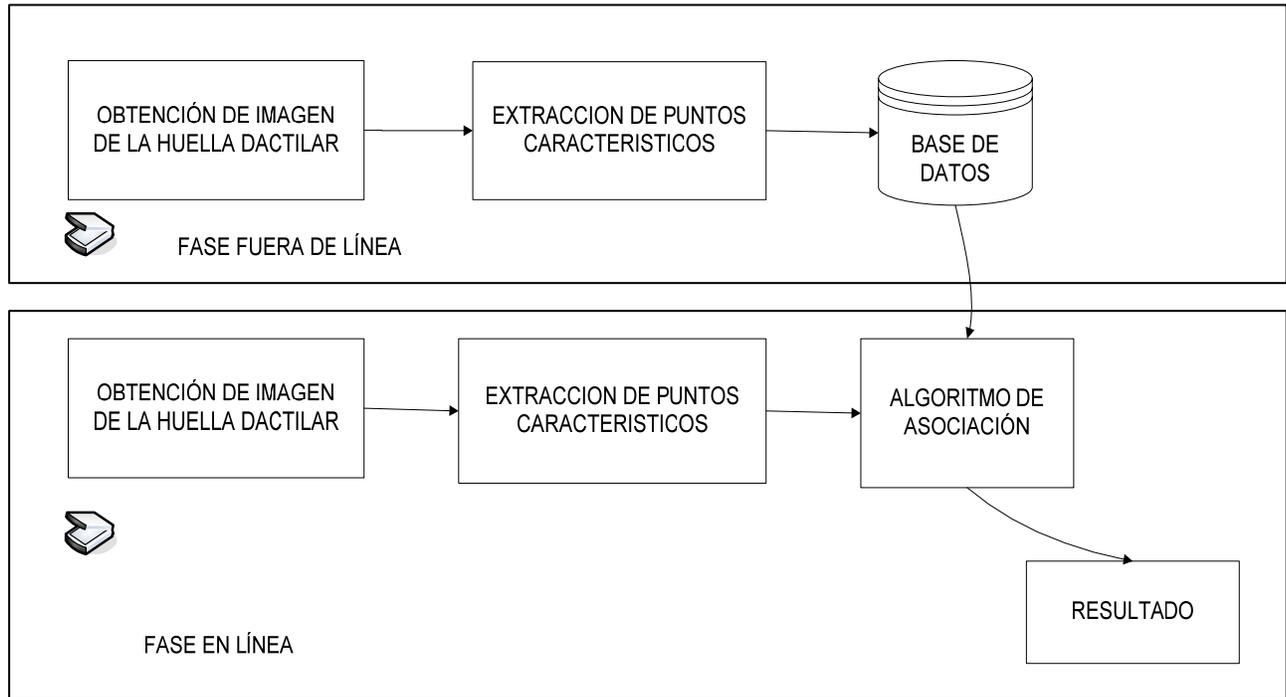


Figura 3.5 Etapas de un AFIS.

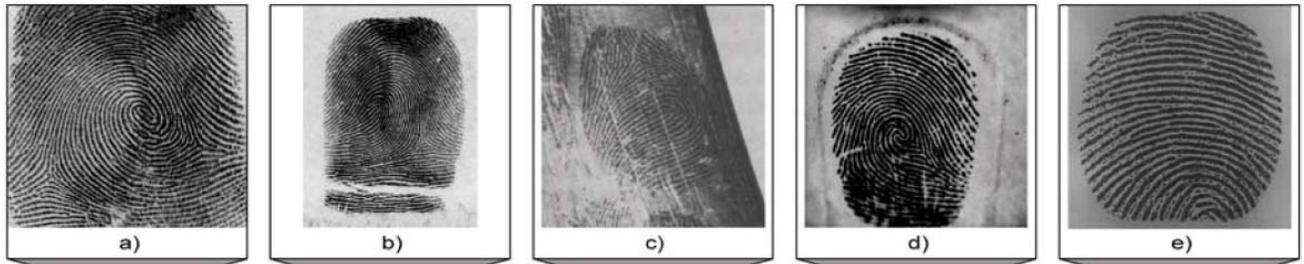
En las secciones siguientes se detallan cada una de las etapas que se encuentran involucradas en el diseño de un sistema automático de identificación de huellas dactilares.

### 3.3.1 OBTENCIÓN DE LA IMAGEN DE LA HUELLA DACTILAR.

Dependiendo de las circunstancias el modo de adquirir la imagen de una huella dactilar se puede lograr mediante escaneos fuera de línea ó en vivo (figura 3.6).

*Escaneo fuera de línea.-* En el método de obtención fuera de línea, un profesional entrenado obtiene una impresión del dedo entintado sobre papel que posteriormente se digitalizada usando un escáner de cama plana para documentos, en aplicaciones forenses esta es una técnica especial para obtener las llamadas huellas dactilares latentes que se recopilan directamente del escenario del crimen [4]. La grasa natural de la piel deja una impresión de la huella dactilar en la superficie que fue tocada por el dedo. Estas impresiones latentes pueden ser levantadas de la superficie mediante el empleo de ciertas sustancias químicas.

*Escaneo en vivo.*- En el método de escaneo en vivo la imagen de la huella dactilar es directamente obtenida del dedo sin ningún paso intermedio de impresión en papel ó otra superficie. La tecnología más popular para efectuar escaneo en vivo para la obtención de la imagen se basa en el concepto óptico de la reflexión interna totalmente frustrada, aunque existen otras tecnicas que tienen grandes ventajas y un mejor desempeño.



**Figura 3.6** Ejemplos de imágenes de huellas dactilares obtenidas mediante: a)Papel entintado, b)Papel entintado, c)Huellas dactilares latentes, d)Escaneo en vivo con escáner óptico, e)Escaneo en vivo con sensores capacitivos.

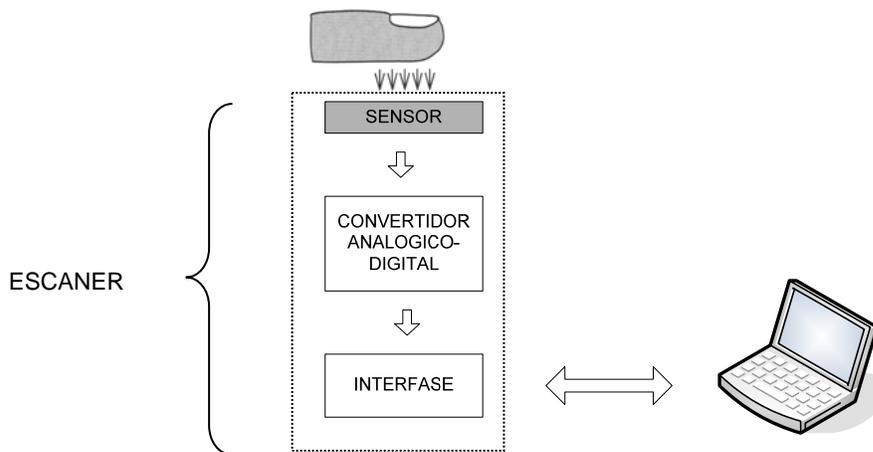
Sin embargo es necesario el considerar los siguientes parámetros como vitales a tomarse en cuenta en una imagen digital de una huella dactilar, esto con el fin de obtener un correcto desempeño en los algoritmos de extracción y asociación de características [5]:

- a. **Resolución:** La mínima resolución para poder aplicar los algoritmos de extracción de características es de 300 dpi., siendo 500 dpi. la resolución recomendada por los estándares del FBI para obtener el desempeño optimo en dichos algoritmos.
- b. **Área:** El tamaño del área destinada para obtener la imagen de la huella dactilar es un parámetro fundamental que permite obtener el total de características de la huella dactilar, estableciéndose que el área correcta debe de ser de 1 pulgada cuadrada. Lo que garantiza obtener una imagen completa de la huella dactilar.
- c. **Rango dinámico:** Considerando que para aplicar los algoritmos de identificación y asociación de huellas dactilares se van a emplear únicamente imágenes en escala de grises, el rango dinámico empleado para cada píxel es de 8 bits, lo que nos garantiza los 256 niveles de gris.

- d. **Calidad de la imagen:** Este parámetro no es fácil de precisar ya que depende de varios factores tales como un incorrecto procedimiento de escaneo, una superficie del dedo sucia ó una baja prominencia en las rugosidades factor común en personas con gran actividad manual y personas de edad avanzada.
- e. **Exactitud geométrica:** Esto usualmente especifica la máxima distorsión geométrica introducida por el dispositivo de adquisición y es expresada como un porcentaje con respecto a las direcciones  $x$ ,  $y$ .

### 3.3.1.1 TECNOLOGIA PARA EL ESCANEO EN VIVO DE HUELLAS DACTILARES.

Los escaners de huellas dactilares cuentan con una estructura general que consta de un sensor que lee la superficie del dedo para posteriormente convertir la lectura análoga obtenida a su forma digital mediante un convertidor analógico digital, paso siguiente un modulo de interfase se encarga de establecer la comunicación entre la imagen obtenida y el ordenador (figura 3.7).



**Figura 3.7** Estructura general de un escáner de huellas dactilares.

El termino sensor y escáner tienen distintos significados ya que el sensor es un componente interno del escáner de huellas dactilares el cual está encargado de leer la superficie del dedo, siendo este la parte más importante del sistema, ya que es aquí en donde la imagen de la huella dactilar toma forma.

La clasificación de los tipos de escáner se da en base a la tecnología empleada, teniendo tres categorías principalmente:

- **ÓPTICOS.** {
  - REFLEXIÓN INTERNA TOTALMENTE FRUSTRADA (RITF).
  - FTIR CON LAMINA DE PRISMAS.
  - FIBRA ÓPTICA.
  - ELECTRO-ÓPTICOS.



Figura 3.8 Sensores ópticos.

- **ESTADO SÓLIDO.** {
  - CAPACITANCIA.
  - TÉRMICOS.
  - CAMPO ELÉCTRICO.



Figura 3.9 Sensores de estado sólido.

- **ULTRASONIDO.**



Figura 3.10 Sensores con tecnología de ultrasonido.

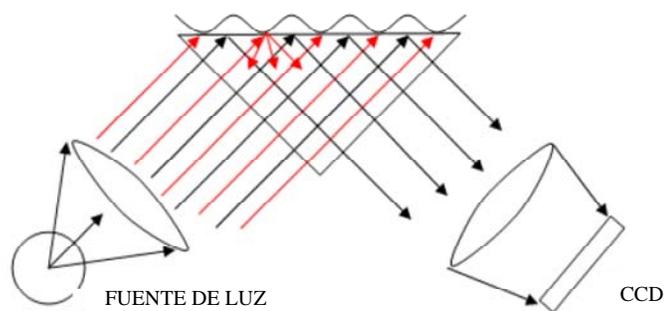
## SENSORES OPTICOS.

Son los mas antiguos y poseen la tecnología mas comúnmente usada, la mayoría emplea dispositivos de carga acoplada (CCD) que convierten la imagen de la huella dactilar que se forma con las sombras de las rugosidades y la luz de los valles, en una señal digital (figura3.11), siendo este tipo de escaners los de mas bajo costo, logrando proveer resoluciones superiores a los 500 dpi [6]. La mayoría de estos sensores se basan en la técnica de la reflexión interna totalmente frustrada para la obtención de la imagen. La calidad de la imagen depende principalmente de si la huella dactilar esta seca o húmeda. Otro problema sucede cuando en el sensor existen residuos dejados por huellas dactilares previas, sin contar que los sensores ópticos son los más voluminosos debido a los cristales involucrados en el mecanismo.

A continuación se muestran las tecnologías básicas involucradas en este tipo de sensores.

### *Reflexión interna totalmente frustrada (RITF).*

Esta es la tecnología más antigua y utilizada [7], en donde el dedo toca la superficie del cristal prismático, quedando de este modo las rugosidades en contacto con la superficie mientras que los valles se mantienen a cierta distancia (figura 3.11); el lado derecho del prisma es iluminado a través de un as de luz, esta luz se refleja de forma aleatoria en los valles para ser posteriormente captada por el dispositivo de carga acoplada (CCD).



**Figura 3.11** Tecnología basada en RITF.

### *RITF con lámina de prismas.*

En esta tecnología se emplea una lámina de prismas hecha de pequeños cristales adyacentes (figura 3.12), en lugar de un solo prisma, permitiendo de esta forma que el tamaño del mecanismo ensamblado se reduzca considerablemente [8] [9].

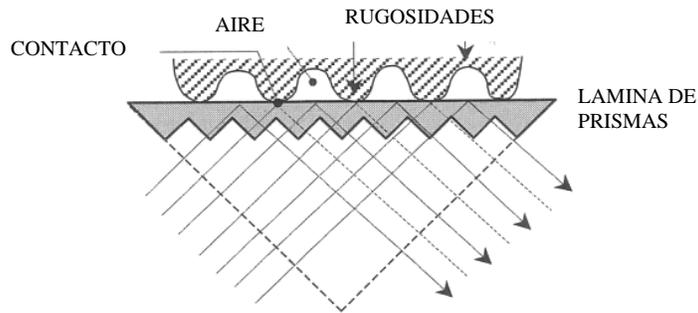


Figura 3.12 Tecnología basada en RITF con lámina de prismas.

### *Fibra óptica.*

Una significativa reducción en el tamaño del paquete completo puede obtenerse mediante la sustitución de los prismas y los lentes por una plataforma de fibra óptica [10] [11], en esta opción el dedo entra en contacto con el lado superior de la plataforma, encontrándose en el lado opuesto el CCD perfectamente acoplado a la misma y recibiendo la luz residual transportada a través de la fibra (figura 3.13).

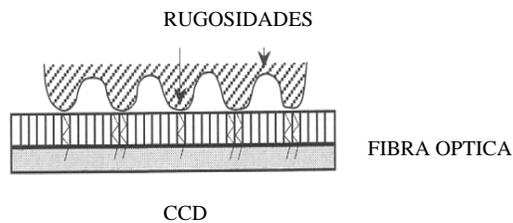
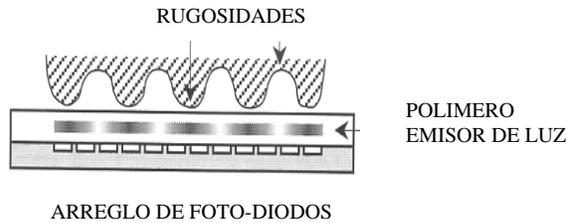


Figura 3.13 Tecnología con sensores de fibra óptica.

### *Electro óptico.*

Estos dispositivos se encuentran constituidos en dos capas principales; la primera capa contiene un polímero que cuando es polarizado con un voltaje apropiado emite un haz de luz que depende del potencial aplicado en un lado (figura 3.14). Como las rugosidades entran en contacto y los valles no, el potencial no es el mismo a lo largo de la superficie cuando el dedo es colocado en esta y la cantidad de luz emitida es variable, alojando así una representación luminosa del patrón de la huella dactilar. La segunda capa, forzosamente acoplada con la primera consiste en un arreglo de foto diodos que es responsable de recibir la luz emitida por el polímero para posteriormente convertirla en una imagen digital [12].



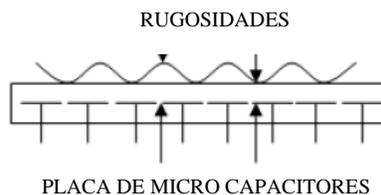
**Figura 3.14** Tecnología con sensores electro ópticos.

### SENSORES DE ESTADO SÓLIDO.

Aunque los sensores de estado sólido (también conocidos como sensores de silicón) habían sido propuestos desde los años ochentas, no siendo hasta mediados de los noventas que estos se vuelven comercialmente viables [13]. Los sensores de estado sólido fueron diseñados para reducir los altos costos y la problemática de la utilización de sistemas de reconocimiento de huellas dactilares en diversas aplicaciones. Todos los sensores basados en silicón consisten en un arreglo de píxeles, en donde cada píxel es un pequeño sensor así mismo. El usuario toca directamente la superficie del silicón, siendo innecesarios los componentes ópticos externos, ya que se cuenta con cuatro efectos principales para convertir la información física a señales eléctricas: capacitancia, energía térmica, campo eléctrico y piezoeléctrico.

Los sensores capacitivos o de silicón actúan con una placa de capacitores y la superficie del dedo por otro lado. La capacitancia entre la placa sensible y el dedo depende inversamente de la distancia presente entre ellos [14]. A partir de que las rugosidades se acercan, a estas les corresponde incrementar la capacitancia y a los valles corresponde la menor capacitancia (figura 3.15).

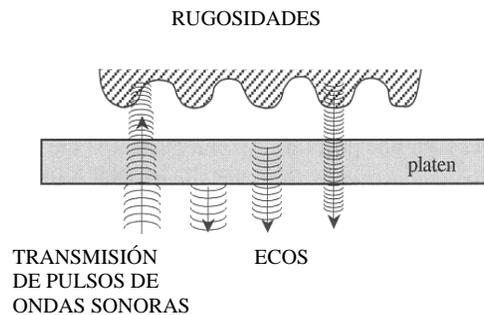
Esta variación es convertida a una imagen digital en una escala de grises de 8 bits. La mayoría de los dispositivos electrónicos que emplean las características de las huellas dactilares como identificación usan este tipo de sensores de estado sólido debido a su reducido tamaño (menores a 0.5"x0.5").



**Figura 3.15** Tecnología con sensores capacitivos.

## SENSORES CON TECNOLOGIA DE ULTRASONIDO.

La tecnología del ultrasonido es por mucho la más exacta de las empleadas en sensores de huellas dactilares. Esta usa ondas de ultrasonido y mide la distancia basada en la impedancia del dedo, la placa y el aire. Estos sensores son capaces de obtener resoluciones muy altas. Sensores con calidad de 1000 dpi. o mayores son viables con esta tecnología. Sin embargo estos sensores tienden a ser de gran tamaño conteniendo partes móviles haciendo de ellos únicamente utilizables para aplicaciones gubernamentales y aplicaciones en control de accesos [15].



**Figura 3.16** Tecnología con sensores de ultrasonido.

El criterio de selección de las tecnologías anteriormente mostradas va a estar en relación a factores tales como tamaño, costo y durabilidad entre otros.

### 3.3.2 ASOCIACIÓN DE HUELLAS DACTILARES.

Un algoritmo de asociación de huellas dactilares compara dos de ellas y nos indica su grado de similitud generando solo dos opciones: coincide o no coincide.

La asociación de imágenes de huellas dactilares es un problema de *extrema dificultad*, debido principalmente a la variación que se da en las diferentes impresiones del mismo dedo. Los factores responsables de estas variaciones son:

- a) **Desplazamiento.** El mismo dedo puede ser colocado en diferentes posiciones sobre el sensor al momento de la adquisición dando como resultado una traslación global del área de la huella dactilar. Un desplazamiento de solo 2mm que son imperceptibles para el usuario resultan una traslación de aproximadamente 40 píxeles en la imagen de la huella dactilar escaneada a una resolución de 500dpi.

- b) **Rotación.** El mismo dedo puede ser rotado en diferentes ángulos con respecto a la superficie del sensor durante las diferentes adquisiciones. A pesar de las guías para la orientación del dedo montadas en diferentes escaners comerciales, las rotaciones involuntarias de los dedos son superiores a los  $\pm 20$  grados con respecto a la orientación vertical.
- c) **Recubrimiento parcial.** El desplazamiento y la rotación son con frecuencia causa de que parte de la imagen de la huella dactilar salgan del campo de visión del sensor, resultando un pequeño traslape entre las áreas del primer plano de la plantilla y de las imágenes entrantes. Siendo este un problema particularmente serio en dispositivos con áreas pequeñas en los sensores.
- d) **Distorsión no lineal.** El acto de censar mapas de formas tridimensionales de los dedos a superficies bidimensionales del sensor, puede dar como resultado una distorsión no lineal en adquisiciones sucesivas del mismo dedo debido a la plasticidad de la piel. Con frecuencia los algoritmos de asociación de huellas dactilares ignoran características como el mapeo y consideran a las imágenes de las huellas dactilares como no distorsionadas si la imagen fue tomada de forma correcta. El dedo se encuentra bien colocado cuando el usuario acerca el dedo a la superficie del sensor a través de un movimiento ortogonal a la superficie del sensor, y una vez que el dedo toca la superficie del sensor el usuario no aplica tracción o torción.
- e) **Condiciones de piel y presión.** La estructura de las rugosidades de los dedos puede ser con exactitud capturada si las rugosidades de la parte del dedo tienen un contacto uniforme con la superficie del sensor. Sin embargo factores tales como la presión del dedo, la sequedad de la piel, enfermedades, sudor, grasa y humedad en el ambiente afectan la situación dando como resultado un contacto no uniforme y como consecuencia las imágenes de las huellas dactilares adquiridas son muy ruidosas.
- f) **Errores en la extracción de características.** Los algoritmos de extracción de características son imperfectos y usualmente tienen errores de medición. Los errores pueden generarse durante cualquiera de las etapas de extracción de las características. Algoritmos agresivos de realce pueden introducir errores consistentes y afectar la localización de los puntos característicos, por otro lado las imágenes de baja calidad introducen un gran número de minucias falsas afectando el proceso de extracción fallando en la detección de las minucias verdaderas.

g) **Ruido.** Principalmente introducido por los sistemas de adquisición de huellas dactilares; por ejemplo, residuos depositados en la superficie del sensor por previas capturas.

Existen un gran número de técnicas empleadas en los algoritmos de asociación de huellas dactilares sin embargo estos se pueden clasificar dentro de tres categorías.

1. **Asociación basada en correlación.** Dos imágenes de huellas dactilares son superpuestas y la correspondiente correlación entre píxeles es computada para diferentes alineamientos.
2. **Asociación basada en minucias.** Esta es la técnica mas popular y la mas comúnmente empleada, siendo esta la base de comparación de huellas dactilares creada por examinadores de las mismas. Las minucias son extraídas de las dos huellas dactilares analizadas y posteriormente almacenadas como un conjunto de puntos en un plano bidimensional. La asociación basada en minucias consiste esencialmente en encontrar la alineación entre la plantilla y el conjunto de minucias entrante que resulta en el máximo número de pares coincidentes.
3. **Asociación basada en características de la rugosidad.** La extracción de minucias es una tarea de gran dificultad cuando de imágenes de baja calidad se trata. Sin embargo mientras que otras características de los patrones de las rugosidades de las huellas dactilares (por ejemplo, orientación local y frecuencia, forma de la rugosidad, información contenida en la textura), pueden ser extraídas de forma más confiable que las minucias, ya que su distintividad es generalmente baja. En un principio, la correlación y la asociación basada en minucias pueden ser concebidas como subfamilias de la asociación basada en características de la rugosidad, dado que la intensidad del píxel y las posiciones de las minucias son por si mismas características del patrón de la rugosidad del dedo.

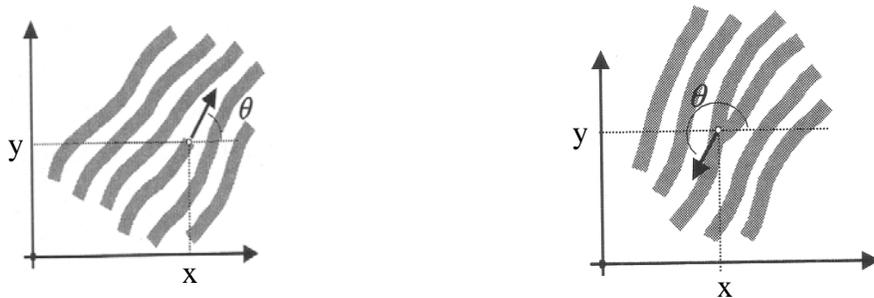
Algunas otras técnicas han sido propuestas en la literatura, sin embargo estas pueden estar asociadas con alguna de las categorías arriba mencionadas en relación a las características empleadas, pero es preferible categorizarlas separadamente en base a la técnica de asociación empleada.

Sin embargo la mayoría de los algoritmos de comparación de huellas dactilares se basan en la asociación de puntos característicos (minucias), razón por la cual la correcta extracción de estos puntos es una tarea de extrema importancia, que determina el buen desempeño y el correcto funcionamiento del AFIS.

### 3.3.2.1 EXTRACCIÓN DE PUNTOS CARACTERÍSTICOS.

La representación de las huellas dactilares es de dos formas: local y global. La mayoría de las representaciones de información local en huellas dactilares se basan en la imagen completa, las rugosidades de los dedos, poros en las rugosidades o características salientes derivadas de las rugosidades. Estas representaciones se basan predominantemente en las rugosidades terminantes o bifurcaciones (comúnmente conocidas como minucias) que son las mas comunes, esto básicamente debido a las siguientes razones: i) las minucias capturan una gran cantidad de información individual, ii) las representaciones basadas en minucias son eficientemente almacenadas y iii) la detección de minucias es relativamente resistente a diversas fuentes de degradación de las huellas dactilares.

Algunas de las características a extraer de las imágenes de las huellas dactilares son los puntos minucias, en donde por cada minucia detectada deben ser almacenados los siguientes parámetros: orientación, coordenada en  $x$ , y coordenada en  $y$  (figura 3.17). Lo cual reduce la complejidad de la verificación de la huella dactilar, ya que de esta forma se reduce a una simple comparación de patrones de puntos con capacidad y tolerancia a algunas restricciones de deformación en la entrada de los patrones de puntos.



**Figura 3.17** Parámetros considerados en los puntos minucias.

Un algoritmo de extracción de minucias típico consiste de tres componentes principalmente [16]: i) estimación de la orientación del campo, ii) detección de la rugosidad y iii) detección de minucias.

### 3.3.2.1.1 ESTIMACIÓN DE LA ORIENTACIÓN DEL CAMPO DE RUGOSIDADES (FLUJO DE RUGOSIDADES).

Las imágenes de las huellas dactilares pueden ser consideradas como una textura de patrón orientado y por la taxonomía que describen se pueden clasificar como una textura débilmente ordenada, la cual se caracteriza por que su orientación local dominante en cada punto de la textura puede variar arbitrariamente [17].

El cálculo de la orientación del campo de la textura de una imagen consta de dos variables llamadas el *ángulo de la imagen* y la *coherencia de la imagen*. El ángulo de la imagen captura la orientación local dominante en cada punto de la textura en términos del ángulo y la coherencia de la imagen representa el grado de anisotropía para cada punto en la textura.



**Figura 3.18** Orientación del campo de rugosidades.

Un gran número de métodos han sido propuestos para estimar la orientación del campo de rugosidades contenidas en las imágenes de las huellas dactilares [18]. En este trabajo de tesis emplearemos como herramienta para obtener el ángulo de orientación de las rugosidades el algoritmo de Rao [19]. Este algoritmo se basa en el gradiente de la imagen, pero el aspecto más importante de este algoritmo es que es suficientemente adecuado para estimar la orientación local en la textura orientada. El algoritmo descompone los patrones dentro de la orientación del campo, describiendo tanto la dirección de la anisotropía, como los patrones independientes de cambio en la dirección de flujo.

El algoritmo consta básicamente de las siguientes etapas:

- a) Se divide la imagen de la huella dactilar en bloques (ventanas) de tamaño  $W \times W$  [20].
- b) Se calcula la magnitud del gradiente  $G_x$  y  $G_y$  de la imagen  $f(i, j)$ , para cada píxel  $(i, j)$  dentro de cada bloque.

La detección de bordes en una imagen consiste en detectar cambios significantes de intensidad de luz en un área. Si consideramos la imagen manejada como una función, un borde implica una discontinuidad en dicha función, es decir donde la función tiene un valor de gradiente o derivada alta. La derivada de la función de la imagen en dos dimensiones (gradiente), proporciona la información sobre el cambio de la función.

$$\vec{G} = \nabla f(i, j) = \begin{bmatrix} \frac{\partial f(i, j)}{\partial x} \\ \frac{\partial f(i, j)}{\partial y} \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

En donde el vector  $\vec{G}$  apunta en la dirección de variación máxima de  $f(i, j)$  en el punto  $(i, j)$  por unidad de distancia con la magnitud y orientación local  $\alpha(i, j)$  en el píxel  $(i, j)$  las cuales se encuentran dadas por:

$$|G[f(i, j)]| = \sqrt{G_x(i, j)^2 + G_y(i, j)^2} \quad (3.2)$$

$$\alpha(i, j) = \tan^{-1} \frac{G_y(i, j)}{G_x(i, j)} \quad (3.3)$$

El calculo de las magnitudes del gradiente  $G_x(i, j)$  y  $G_y(i, j)$  para cada píxel  $(i, j)$ , dentro de cada bloque creado se obtiene mediante la convolución de mascarar de **Sobel** de  $3 \times 3$ , método matemáticamente equivalente a el análisis del componente principal de la matriz de autocorrelación del gradiente de los vectores [21].

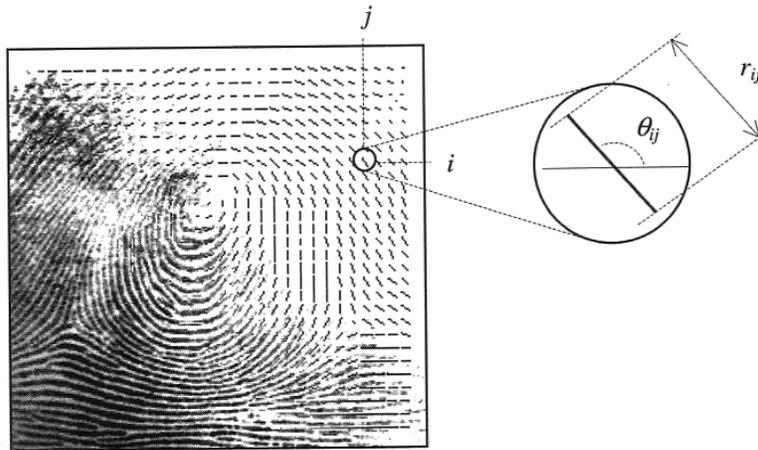
$$G_x = \begin{pmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad G_y = \begin{pmatrix} -1 & -2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 1 \end{pmatrix}$$

Quedando de esta forma definida la convolución para el cálculo de las magnitudes del gradiente por las siguientes ecuaciones:

$$G_y(i, j) \cong f(i-1, j+1) + 2f(i, j+1) + f(i+1, j+1) - f(i-1, j-1) - 2f(i, j-1) - f(i+1, j-1). \quad (3.4)$$

$$G_x(i, j) \cong f(i+1, j-1) + 2f(i+1, j) + f(i+1, j+1) - f(i-1, j-1) - 2f(i-1, j) - f(i-1, j+1). \quad (3.5)$$

c) Por último se estima la orientación dominante en cada bloque  $\theta_{ij}$ .



**Figura 3.19** Orientación dominante por cada bloque.

Para calcular la dirección dominante de la rugosidad, se efectúa una combinación múltiple de gradientes dentro de los bloques creados mediante la siguiente ecuación:

$$\theta_\alpha = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left( \frac{\sum_{i=1}^W \sum_{j=1}^W 2G_x(i, j)G_y(i, j)}{\sum_{i=1}^W \sum_{j=1}^W (G_x^2(i, j) - G_y^2(i, j))} \right) \quad (3.6)$$

### 3.3.2.1.2. DETECCIÓN DE LA RUGOSIDAD.

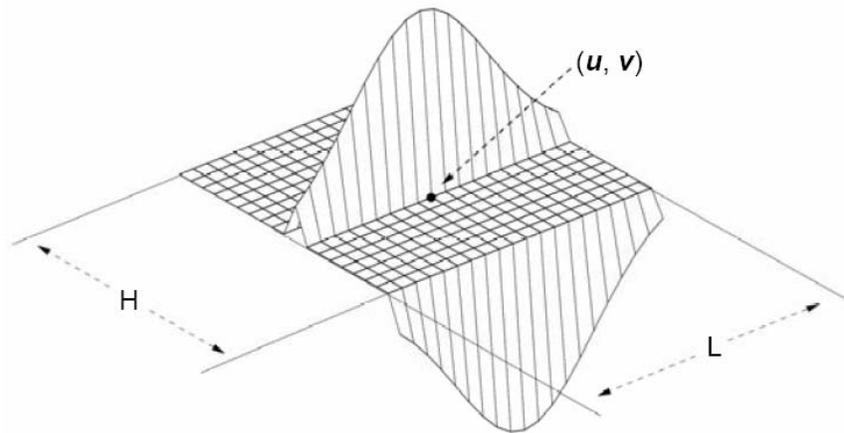
Una propiedad importante de las rugosidades en las imágenes de las huellas dactilares es que los valores en los niveles de gris de las rugosidades alcanzan el máximo local, a lo largo de la dirección normal de la orientación local  $\alpha$  de la rugosidad y los niveles de gris de los valles atenúan su mínimo local a lo largo de la misma dirección. Las rugosidades y valles locales, se encuentran localizados de forma paralela uno con otro y los valores de los niveles de gris en una dirección ortogonal a una onda senoidal bidimensional. Por consiguiente, ciertos píxeles pueden ser identificados como una rugosidad de píxeles en una vecindad local basada en esta característica. Para acentuar estos valores la imagen se convoluciona con las mascarar,  $h_t(i, j; u, v)$  y  $h_b(i, j; u, v)$ , de tamaño  $L \times H$ , respectivamente. Estas dos mascarar son esencialmente las mismas excepto que una de ellas esta rotada  $180^\circ$  con respecto a la otra [22] y se definen como

$$h_t(i, j; u, v) = \begin{cases} -\frac{1}{\sqrt{2\pi\delta}} e^{-\frac{u^2}{\delta^2}} & \text{si } u = v \cdot \text{ctg}(\alpha(i, j)) - \frac{H}{2\cos(\alpha(i, j))}, v \in \Omega \\ \frac{1}{\sqrt{2\pi\delta}} e^{-\frac{u^2}{\delta^2}} & \text{si } u = v \cdot \text{ctg}(\alpha(i, j)), v \in \Omega \\ 0 & \text{Para cualquier otro caso.} \end{cases}$$

$$h_b(i, j; u, v) = \begin{cases} -\frac{1}{\sqrt{2\pi\delta}} e^{-\frac{u^2}{\delta^2}} & \text{si } u = v \cdot \text{ctg}(\alpha(i, j)) - \frac{H}{2\cos(\alpha(i, j))}, v \in \Omega \\ \frac{1}{\sqrt{2\pi\delta}} e^{-\frac{u^2}{\delta^2}} & \text{si } u = v \cdot \text{ctg}(\alpha(i, j)), v \in \Omega \\ 0 & \text{Para cualquier otro caso.} \end{cases}$$

Aquí hemos tomado:  $\Omega = \left[ -\left| \frac{L \sin(\alpha(i, j))}{2} \right|, \left| \frac{L \sin(\alpha(i, j))}{2} \right| \right]$ .

En donde  $\alpha(i, j)$  representa la orientación local de la rugosidad en el píxel  $(i, j)$ . Estas dos mascarar tienen la capacidad de acentuar el máximo local de los valores en los niveles de gris a lo largo de la dirección que es ortogonal a la orientación de la rugosidad local (figura 3.20). Los efectos de suavizado dependen de el valor de la variable  $\delta$ , ya que a un valor mas alto de esta mas eficiente será el filtro con respecto al ruido, sin embargo esto provoca que el filtro sea mas sensible a la mayoría de las curvas de rugosidades.



**Figura 3.20** Orientación de la rugosidad local.

### 3.3.2.1.3. IDENTIFICACIÓN DEL TIPO DE MINUCIA.

La mayoría de los algoritmos de extracción de minucias operan sobre imágenes binarias y adelgazadas, en donde se tienen únicamente dos niveles de interés: los píxeles negros que representan las rugosidades y los píxeles blancos que representan los valles. El proceso de binarización convierte los niveles de gris de la imagen a una imagen binaria. Por otro lado el adelgazamiento es una operación morfológica que sucesivamente erosiona desde el primer plano de píxeles hasta que únicamente quede un solo píxel de ancho en la rugosidad [23]. La aplicación de algoritmos de adelgazamiento en imágenes de huellas dactilares preserva la conectividad de la estructura de rugosidades mientras que se forma una versión esqueletizada de la imagen binaria. Esta imagen esqueletizada mejora el contraste entre las rugosidades y los valles en la imagen de la huella dactilar y en consecuencia facilita el proceso de extracción de minucias.

La detección de minucias es una tarea trivial cuando se dispone de un mapa de rugosidades idealmente esqueletizado. Sin pérdida de generalidad se puede asumir que si el píxel se encuentra en una rugosidad adelgazada este tiene un valor de uno y un valor de cero en caso contrario. Si  $(x, y)$  denota un píxel en una rugosidad adelgazada y  $N_0, N_1, \dots, N_7$  denota sus ocho vecinos (figura 3.21). El píxel  $(x, y)$  es una rugosidad terminante si  $\left(\sum_{i=0}^7 N_i\right) = 1$  y una rugosidad que bifurca si  $\left(\sum_{i=0}^7 N_i\right) > 2$  [24].

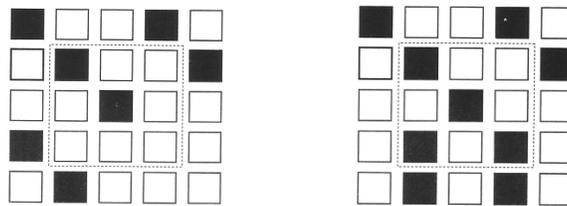


Figura 3.21 Mapa de rugosidades idealmente adelgazado

Sin embargo, la presencia de picos indeseables y rompimientos presentes en el mapa de rugosidades adelgazadas, puede llevar a la detección de diversas minucias falsas. Por consiguiente antes del proceso de detección de minucias, es necesario aplicar un procedimiento de suavizado para remover picos y unir rompimientos en las rugosidades. Un algoritmo apropiado para esta tarea emplea la siguiente heurística [16]:

- Si la rama en el mapa de rugosidades es aproximadamente ortogonal a la dirección de la rugosidad local y su longitud es menor que un límite específico entonces esta será removida.
- Si el rompimiento en la rugosidad es lo suficientemente corto y ninguna otra rugosidad pasa a través de esta, entonces deberá ser conectada.

Aunque el criterio de eliminación anteriormente descrito logra eliminar un gran porcentaje de minucias falsas, un gran número de estas logran conservarse. La razón de esto se debe a que el criterio anteriormente descrito es confiable únicamente para rugosidades locales. Por lo tanto es necesario un proceso de refinamiento que se base en toda la información estructural para lograr eliminar las minucias falsas y que considere las siguientes reglas:

- Si diversas minucias pertenecen a un grupo en una pequeña región, entonces removerlas todas excepto la más próxima al centro del cluster.

- Si dos minucias están localizadas muy cercanas una de la otra, pero no se encuentran rugosidades entre ellas, entonces remover ambas.

Una vez efectuado el proceso de refinamiento descrito, las minucias restantes son consideradas como minucias verdaderas.

### 3.4 DESEMPEÑO DE LOS SISTEMAS BIOMETRICOS BASADOS EN IDENTIFICACION DE HUELLAS DACTILARES.

Como ya hemos observado el buen desempeño de los actuales algoritmos de extracción de minucias y otras técnicas de reconocimiento, depende entre otros factores fuertemente de la calidad en la imagen de la huella dactilar, ya que no siempre es posible obtener una estructura de rugosidades bien definida.

En una gran cantidad de casos las imágenes obtenidas de las huellas dactilares poseen regiones de buena, mediana y pobre calidad en donde los patrones de las rugosidades son extremadamente ruidosos y corruptos.

Tres son los tipos principales de degradación asociados con las imágenes en las huellas dactilares:

1) Las rugosidades no son estrictamente continuas; esto es las rugosidades contienen pequeños huecos, 2) La direccionalidad en las rugosidades no está correctamente definido, esto debido a la presencia de ruido el cual une a las líneas paralelas y 3) Corte y estropeo de los pliegues.

Estos tres tipos de degradación hacen del proceso de extracción de rugosidades una tarea de dificultad extrema generándose los siguientes problemas durante la extracción:

- Un número significativo de minucias falsas son extraídas.
- Un gran número de minucias genuinas quedan sin identificar.
- Grandes errores en la localización (posición y orientación) de las minucias son introducidos.

Generándose de esta forma los “falsos positivos” presentes en la asociación de patrones, los cuales según el trabajo de George Doddington se clasifican en [25]:

a) *Comportamiento típico*: la mayoría bien controlada.

- *Ovejas*: patrones que exhiben un buen comportamiento de identificación *verdadera* en el reconocimiento.

b) *Comportamiento problemático*: la conflictiva minoría.

- *Cabras*: patrones que son excepcionalmente susceptibles a *no ser identificados* y fallar en el reconocimiento.
- *Corderos*: patrones que son excepcionalmente vulnerables a que otros tomen su lugar. *Falso positivo*.
- *Lobos*: patrones que son excepcionalmente exitosos usurpando el lugar de otros. *Falso positivo*.

Se espera que estos *falsos positivos* se resuelvan mediante tecnología que incluya el conocimiento de la formación del patrón biológico con características globales no necesariamente basadas en invariantes geométricos asociados a los puntos que identifican a la minucia.

En este proyecto se toma como base “*la reacción-difusión*”. Ya que siendo esta inherente a la naturaleza de formación de las huellas dactilares la emplearemos para realzar y restaurar patrones en las imágenes derivadas de estas, principalmente para patrones de origen biológico de importancia biométrica, en nuestro caso lo empleamos para la restauración de imágenes de huellas dactilares incompletas o defectuosas.

## REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.

1. Babler W. J., *"Embryologic Development of Epidermal Ridges and Their Configuration"*, Birth Defects Original Article Series, vol. 27, No. 2, (1991).
2. Galton F., *"Finger Prints"*, Mc. Millan, London, (1892).
3. Moenssens A., *"Fingerprint Techniques"*, Chilton, London, (1971).
4. Colins M. W., *"Realizing the Full Value of Latent Prints"*, California Identification Digest (1992).
5. Criminal Justice Information Services, *"Electronic Fingerprint Transmission Specification"*, Int. Report, CJIS-RS-0010(V7), (1999).
6. Bahuguna R.D. and Corboline T., *"Prism Fingerprint Sensor that Uses a Holographic Element"*, Applied Optics, Vol. 35, No.26, pp.5242-5245, (1996).
7. Hase M., Shimushi A., *"Entry method of Fingerprint Image Using a Prism"*, Trans. Institute Electron Commun. Eng. Jpn., vol. J67-D, pp. 627-628. 1984.
8. Chen Z., Kuo C. L., *"Apparatus for Imaging Fingerprint or Topographic Relief Pattern on the Surface of an Object"*, US Patent 5448649, (1995).
9. Zhou G., Qiao Y., and Mok F., *"Fingerprint Sensing System Using a Sheet of Prism"*, US. Patent 5796858, (1998).
10. Fujieda I., Ono Y., Sugama S., *"Fingerprint Image Input Device Having an Image Sensor with Openings"*, US. Patentent 5446290, (1995).
11. Dowling R. F., Knowlton K.L. *"Fingerprint Acquisition System with a Fiber Optic Block"*, US. Patent 4785171, (1988).
12. Young N. D., Harking G., Bunn R.M., Wilks R.W., Knapp A.G., *"Novel Fingerprint Scanning Arrays Using Polysilicon Tft's on Glass and Polymer Substrates"*, IEEE Electron Device Letters, vol. 18, No. 1, pp. 19-20, (1997).
13. Xia X., O Gorman L., *"Innovations in Fingerprint Capture Devices"*, Pattern Recognition, vol. 36, No. 2, pp. 361-369, (2003).

14. Tsikos C., "*Capacitive Fingerprint Sensor*", US. Patent 4353056, (1982).
15. Schneider J., Wobschall D., "*Live Scan Fingerprint Imagery Using High Resolution C-SCAN Ultrasonography*", in Proc. Int. Carnahan Conf. on Security Technology (25 th), pp. 88-95, (1991).
16. A. Jain, L. Hong, R. Bolle, "*On Line Fingerprint Verification*", IEEE Transactions in Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol. 19, No. 4, pp. 302-314, (1997).
17. A.R. Rao, "*A Taxonomy for Texture Description and Identification*". New York: Springer-Verlag, 1990.
18. N. Ratha, S. Chen, A. K. Jain "*Adaptive Flow Orientation Based Feature Extraction in Fingerprint Images*", Pattern Recognition, vol. 28, No. 11, pp. 1657-1672, (1995).
19. A.R. Rao, Ramesh C. Jain, "*Computerized Flow Field Analysis: Oriented Texture Fields*", IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol 14, No. 7, (1992).
20. J. Canny, "*A Computational Approach to Edge Detection*", IEEE Transactions of Pattern Anaal. Machine Intellicence, Vol. 26, No. 6, pp. 679-698,(1986).
21. Bazaen A. M., Gerez S. H., "*Systematic Methods for the Computation of the Directional Fields and Singular Points of Fingerprint*", IEEE Transactions of Pattern Anaal. Machine Intellicence, Vol. 24, No. 7, pp. 905-919, (2002).
22. Hong L., Anil K. Jain, Bolle R., "*Fingerprint Enhancement*", Michigan State University, Department of Computer Science, (1998).
23. Marr D., Hildreth E. C., "*Theory of Edge Detection*", Proceedings of Royal Society of London Vol. 207, pp. 187-217, (1980).
24. Anil K. Jain, L. Hong, S. Pankanti, Ruud Bellow, "*An Identity-Authentication System Using Fingerprints*", IEEE Proceedings, Vol. 85, No. 9, (1997).
25. Doddington George, Ligget W., Martin A., Przybocki M., Reynolds D., "*Sheep's, Goats, Lambs, Wolves: An Analysis of individual Differences in Speaker Recognition Performance*", in Proceedings of International Conference on Speech and Language Processing, (1998).

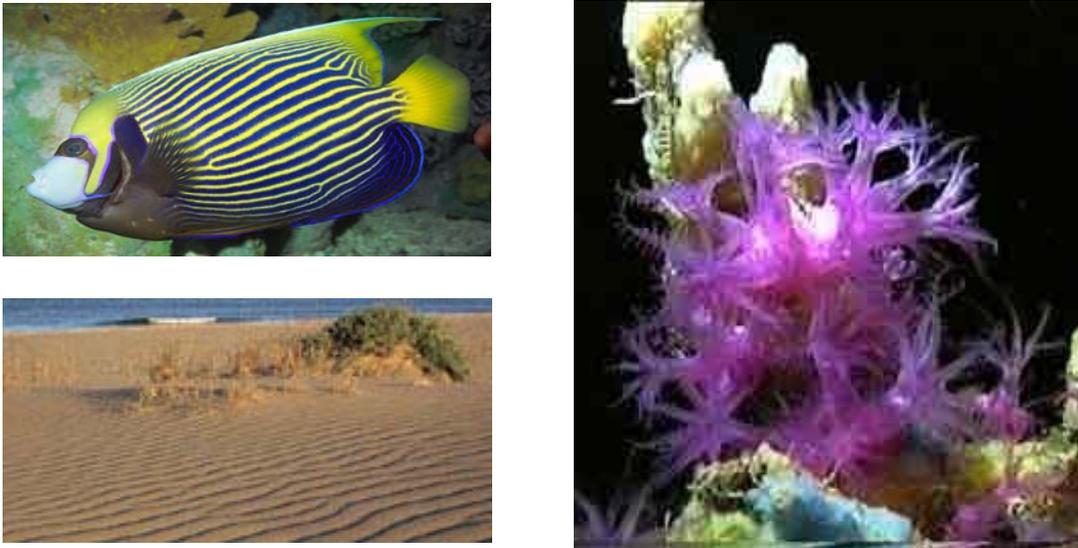
26. M. Kawagoe, A. Tojo, "*Fingerprint Pattern Classification*", *Pattern Recognition*, vol. 17, No. 3, pp295-303, (1984).
27. H.C. Lee, R.E. Gaensslen, "*Advances in Fingerprint Technology*" New York: Elsevier, 1991.
28. J. Klett, "*Thermal imaging fingerprint technology*", in *Proc. Biometric Consortium 9th Meeting*, Crystal City, VA, Apr. 1997.
29. L. C. Jain, U. Halici, I Hayashi, S.B. Lee, S. Tsutsui, "*Intelligent Biometric Techniques in Fingerprint and Face Recognition*", CRC Press, (1999).

# CAPITULO 4.

## SISTEMA “DIGITAL REACCION-DIFUSION” PARA EL MEJORAMIENTO Y RESTAURACION DE HUELLAS DACTILARES.

### 4.1. INTRODUCCION.

La naturaleza se encuentra llena de patrones, los cuales se encuentran en cualquier parte alrededor de nosotros, desde el más pequeño de los detalles como las huellas dactilares de nuestros dedos hasta el movimiento de las dunas de arena en el desierto. Algunos ejemplos biológicos incluyen las rayas de un tigre, los extraordinarios patrones llenos de color de los peces tropicales o los increíblemente complejos patrones creados en los corales marinos tal como se muestra en la figura 4.1. Algunos patrones pueden ser vistos como estables y estáticos, sin embargo se piensa que por cada patrón formado se tiene previamente un sistema dinámico. La naturaleza sin embargo esta llena de irregularidades, las cuales llamamos ruido o influencia aleatoria la cual es la razón de que dos patrones del mismo tipo sean muy similares pero nunca exactamente el mismo. Tales irregularidades hacen que los patrones sean algo particularmente complejo de describir con medios matemáticos normales.



**Figura 4.1** Patrones presentes en la naturaleza.

La teoría formal de formación patrones se encuentra basada en el estudio de los sistemas fuera de equilibrio [1] y uno de sus precursores fué el químico Ruso Ilya Prigogine. Posteriormente el estudio acerca del tratamiento de los sistemas termodinámicos se extendió al régimen no lineal alejado del equilibrio y se aplicó teoría de bifurcación para analizar la selección de estados [2]. En 1945 Prigogine sugirió que un sistema fuera de equilibrio trataría de maximizar su rango de producción de entropía y por consiguiente elige el estado estable. Esta condición fue probada como inadecuada por Landauer [3], quien argumentó que la producción mínima de entropía no es en general una condición necesaria para el estado estable y que el estado más favorable de el sistema no puede ser determinado en base a el comportamiento en la vecindad de el estado estable, siendo necesario considerar la dinámica global fuera de equilibrio. En 1977 Prigogine fue condecorado con el premio Nóbel de química por sus contribuciones a la teoría de estructuras disipativas.

## 4.2 PATRONES EN SISTEMAS NATURALES.

Los organismos vivos crean una gran variedad de patrones y formas derivadas de su información genética.

La embriología parte de la biología que se encuentra encargada del desarrollo del embrión desde su fertilización hasta su nacimiento, también se encuentra encargada del desarrollo de patrones y formas, proceso comúnmente llamado "*Morfogénesis*". La formación de patrones en biología es consecuencia de la interacción de moléculas. Alan Turing matemático inglés, formalizó esta idea para sustancias químicas en un ambiente abstracto [17].

El desarrollo del embrión es un proceso secuencial que sigue un plan básico, usualmente dictado en etapas tempranas de la gestación. Por ejemplo en los humanos este proceso se instala aproximadamente a la quinta semana de gestación [4]. Sin embargo no se conoce como el plan básico de crecimiento es estabilizado mientras los mecanismos que producen los patrones espaciales necesarios para los diversos órganos específicos.

La importancia fundamental del desarrollo biológico de patrones y formas es evidente. Existe la posibilidad de que desconozcamos los procesos que se encargaron de producir los patrones que observamos en el mundo animal, el mecanismo puede ser genéticamente controlado. Los genes por si mismos no pueden crear el patrón, ellos únicamente proveen la receta para la generación del patrón.

Un gran problema en biología es saber como la información genética es físicamente trasladada dentro del patrón, razón por la cual una gran cantidad de investigación en biología teórica y experimental, esta enfocada en tratar de determinar los mecanismos con los cuales se generan los patrones y formas en las etapas iniciales de desarrollo del ser vivo.

El concepto fenomenológico de formación de patrones y diferenciación llamado información posicional fue propuesto por Wolpert [5]. El sugiere que las células están preprogramadas a reaccionar con una concentración química y por lo tanto diferenciarse entre diversos tipos de células.

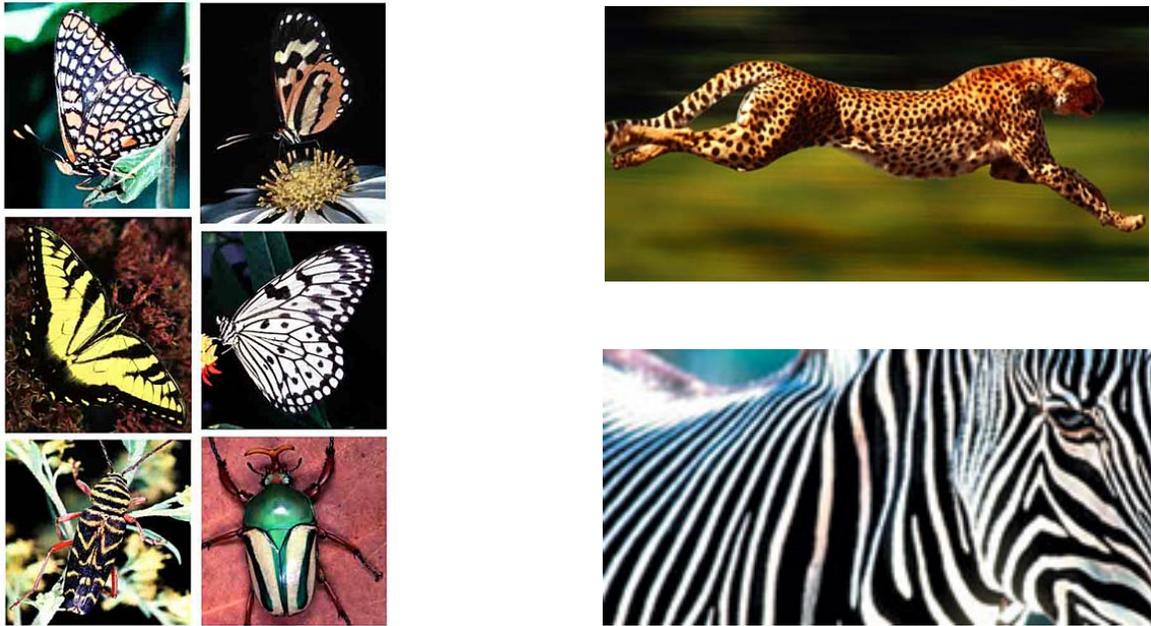
Alan Turing, pionero en el campo de los sistemas reacción-difusión, fue inspirado por la complejidad de los sistemas biológicos auto-organizables. La meta de Turing fue la de entender los procesos que pudieran explicar como un huevo fertilizado se convierte en un organismo a través del proceso de morfogénesis [6].

El trabajo de Turing pertenece al campo de formación de patrones, en el subcampo de la biología matemática. El estudio de la formación biológica de patrones ganó popularidad a partir de los años 70's, cuando Gierer y Meinhardt [7] obtuvieron una formulación biológicamente justificada del modelo de Turing y estudiaron sus propiedades para emplearlas en simulaciones computacionales.

El principal propósito de la biología matemática está enfocado a la construcción de modelos que explican el fenómeno biológico al más bajo nivel de exactitud de los mecanismos. Por ejemplo mecanismos biológicos de señales, aspectos mecánicos de morfogénesis tales como el desarrollo de plumas de aves, dientes o extremidades, para el entendimiento no solo de las funciones de los genes, sino además el proceso detrás de la fisiología, por ejemplo enfermedades tales como el cáncer pueden ser estudiadas y entendidas más eficientemente. Aplicaciones de los esquemas de reacción-difusión varían desde el crecimiento de colonias de bacterias hasta la propagación de pulsos nerviosos. Otra forma popular de modelación de sistemas naturales han sido los modelos que se encuentran basados en autómatas celulares, de forma por de mas interesante. Scheper y Markus [8] han mostrado como un autómata celular puede reproducir patrones típicamente observados en los sistemas reacción-difusión.

Una de las más intrigantes aplicaciones de la biología matemática y de los sistemas de Turing es la modelación de patrones en el pelaje de los animales tales como manchas de chitas y las líneas de las cebras, sin embargo existen patrones más exóticos como los

patrones poligonales de las jirafas, las caprichosas formas de las mariposas y los arcos tubulares de los leopardos figura 4.2.



**Figura 4.2** Formación de patrones biológicos complejos.

La característica más importante de los modelos de Turing es que estos generan patrones con respecto a la concentración química proveniente de cualquier estado inicial y el patrón puede estar cambiando de líneas a puntos con solamente cambiar un parámetro en el modelo. En sistemas biológicos esto podría corresponder a un pequeño cambio en la producción del morfógeno.

En adición a su simplicidad y naturaleza genérica los sistemas de Turing tienen varias características adicionales convenientes como modelos teóricos para morfogénesis. Los modelos de Turing pueden generar distribuciones espaciales no uniformes, permitiendo generar modelos de grandes complejidades comparadas a los modelos basados en gradientes simples. Aunado a esto la evolución química y la estructura final de Turing son bastante robustas con poco ruido aleatorio y distorsiones comparables aun así con la mayoría de los sistemas naturales. Los modelos de Turing son un ejemplo de un mecanismo muy simple y genérico que muestra un complejo y sorprendente comportamiento y en adición a su poder descriptivo tiene conexión con ideas fundamentales de sistemas fuera de equilibrio.

### 4.3. SISTEMAS DE REACCIÓN - DIFUSIÓN.

Los sistemas químicos han sido una parte importante en el campo de la formación de patrones desde la primer observación experimental de las oscilaciones químicas a inicios de los años 50's. Los patrones espaciales en las reacciones químicas se forman principalmente de la interacción entre reacción cinética y la difusión de diferentes substancias.

La inestabilidad juega en esto un rol esencial y esto fue sugerido por vez primera por Alan Turing. El demostró que sistemas químicos homogéneos pueden volverse inestables debido a la difusión con respecto a las fluctuaciones de concentración de longitud de onda finita, evolucionando dentro de patrones periódicos espaciales.

En esta sección examinaremos los componentes de un sistema reacción-difusión simple y posteriormente se presentara el modelo matemático de este sistema.

En su artículo publicado en 1952 [17], Alan Turing propuso un modelo químico para describir la morfogénesis, es decir, el proceso por el cual un cigoto adquiere forma y se convierte en un embrión. El modelo involucra dos sustancias A y B sometidas a procesos de reacción y de difusión. A través de la reacción unas sustancias químicas se transforman en otras en un proceso dinámico. En el modelo de Turing la presencia de A contribuye al incremento tanto de la concentración de A como de B (se dice que A es un activador) mientras que B actúa de manera opuesta (se trata de un inhibidor). La difusión, por su parte, representa la tendencia natural de los sistemas materiales a homogeneizar su distribución espacial. Un hecho importante es que todas las substancias no se difunden con la misma eficacia. Lo que Turing demostró es que si el inhibidor B se difunde más que al activador A, el sistema puede desarrollar estructuras espaciales de manera espontánea a partir de una situación inicial uniforme. Este hecho se llama ruptura espontánea de simetría espacial. Sin embargo fue necesario esperar hasta 1990 para que las teorías de Turing fueran demostradas experimentalmente.

Los modelos de reacción-difusión son utilizados para comprender la transmisión de ondas neuronales al corazón, el crecimiento de tumores cerebrales y la aparición de patrones ecológicos y bacterianos, entre otros fenómenos. Los sistemas de reacción-difusión muestran una variedad impresionante de patrones, desde sencillos listados hasta patrones espirales, pasando por patrones periódicos de diferentes simetrías. Así mismo, dependiendo de los parámetros del problema, los patrones pueden ser estáticos o dinámicos.

### 4.3.1. DESCRIPCIÓN MATEMÁTICA DE LOS SISTEMAS DE REACCIÓN-DIFUSIÓN.

Partiendo del hecho de que en este trabajo de tesis usaremos modelos matemáticos de reacción-difusión, derivaremos la ecuación correspondiente a partir de principios elementales. Considerando a la difusión en un espacio de tres dimensiones y siendo  $S$  una superficie arbitraria encerrada en volumen  $V$ .

La ecuación general de conservación dice que el rango de cambio de la cantidad de un material en  $V$  es igual al rango de flujo de material que atraviesa  $S$  dentro de  $V$  más el material creado en  $V$ . Esto es:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V c(x,t) dV = - \int_S J \cdot ds + f \quad (4.1)$$

En donde  $J$  es el flujo de material y  $f$  que representa la fuente que crea o destruye el material, puede estar en función de  $c$ ,  $x$  y  $t$ . Aplicando el teorema de la divergencia a la integral de superficie y asumiendo que  $c(x,t)$  es continua, la anterior ecuación se convierte en:

$$\int_V \left[ \frac{\partial c}{\partial t} + \nabla \cdot J - f(c, x, t) \right] dV = 0 \quad (4.2)$$

Partiendo ahora de que el volumen es arbitrario la integral es cero y en consecuencia la ecuación de conservación para  $c$  queda definida por:

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \nabla \cdot J = f(c, x, t) \quad (4.3)$$

Con la finalidad de obtener un sistema mas exacto, nosotros necesitamos ecuaciones para el flujo definido por  $J$ . De acuerdo a la ley de Fick el flujo va desde las más altas a las más bajas concentraciones. Específicamente, el flujo químico es proporcional a la concentración del gradiente y puede ser formulado como:

$$J = -D \nabla_c \quad (4.4)$$

En donde la matriz diagonal  $D$  contiene los coeficientes de difusión. Por lo que substituyendo la ecuación (4.4) en la ecuación (4.3) obtendremos el modelo estándar de la reacción-difusión.

$$\frac{\partial c}{\partial t} = f + \nabla \cdot (D \nabla_c) \quad (4.5)$$

Existen varias formas de como la reacción cinética  $f$  puede ser derivada a partir de formulas de química experimental mediante el uso de la ley de acción de masas [15]. Además, para obtener un problema diferencial bien definido es necesario el incluir las condiciones iniciales y de frontera, ya que estas son tan importantes como las ecuaciones diferenciales en el modelo. En la situación de la reacción química, adiciones o substracciones de sustancias químicas pueden estar incluidas en la ecuación, sin embargo frecuentemente estas son incluidas en las condiciones de frontera. La condición de frontera más simple es cuando no existen adiciones o substracciones de ninguna sustancia química a través de la frontera y todas las sustancias químicas son generadas dentro del sistema y permanecen ahí. Por ejemplo las reacciones químicas que ocurren en una caja petri la cual contiene una pared impermeable, adquiriendo dicho sistema el nombre de cerrado. Para cada sustancia química involucrada, si  $J(x,t)$  representa al flujo de la sustancia química entonces el flujo a través de un punto de la frontera es  $J(x,t) \cdot n(x)$ , y considerando la ley de Fick, tendremos entonces para cada punto de la frontera  $X$  en un sistema cerrado:

$$\nabla u(x,t) \cdot n(x) = 0 \quad (4.6)$$

En donde  $u(x,t)$  es la función concentración de la sustancia química en la frontera. La ecuación (4.6) implica condiciones de frontera de flujo cero de Neumann y que serán las usadas en esta tesis.

Condiciones periódicas de frontera también pueden ser empleadas, lo que significa que el sistema se comporta como un sistema infinito. Físicamente esto equivale a encontrarse en el seno de un medio continuo infinito.

#### 4.3.2 PRINCIPALES OSCILADORES QUIMICOS.

Ciertas reacciones químicas tienen la capacidad de oscilar en el tiempo y en el espacio, estas reacciones químicas oscilantes están presentes a lo largo y ancho de la naturaleza. Por ejemplo el ritmo de la cigarra se encuentra influenciado por la naturaleza de los osciladores químicos, es evidente que el nivel del sonido crece o decrece cuando la temperatura aumenta o disminuye. Estas reacciones son también responsables del ciclo del sueño, respiración y latidos del corazón.

Una reacción oscilante se caracteriza por presentar oscilaciones en concentración de alguna de las sustancias químicas que participan en ella, es decir la concentración aumenta y disminuye de manera rítmica. Los periodos de sus oscilaciones se mantienen constantes mientras las condiciones externas así se mantengan, por lo que estas pueden funcionar como verdaderos relojes químicos.

La historia de las reacciones oscilantes data desde Lotka en 1910 [18], quien sugiere una reacción teórica que exhibe oscilaciones acuosas. Oscilaciones experimentales fueron encontradas por Bray en 1921 en la reacción del ion iodato y el peróxido de hidrógeno en donde fueron observadas oscilaciones temporales en la concentración de yoduro y el rango de evolución de oxígeno.

Este interesante e importante trabajo fue prácticamente olvidado debido a que se decía erróneamente que violaba la segunda ley de la Termodinámica, esto por supuesto no era así. El siguiente descubrimiento de una reacción oscilante fue hecho por Belousov. Su estudio que fue retomado años más tarde por Zhabotinsky y ahora lo conocemos como la reacción Belousov-Zhabotinsky.

##### 4.3.2.1 REACCION QUIMICA BELOUSOV-ZHABOTINSKY.

La reacción Belousov-Zhabotinsky se presenta en un medio químicamente activo que mantiene oscilaciones y propagación de ondas. En términos más simples, básicamente es una reacción química que es inestable y oscila con la precisión de un reloj y también muestra comportamiento caótico bajo ciertas condiciones.

Tal como la reacción Bray, la reacción Belousov-Zhabotinsky fue descubierta de manera accidental. En este caso por el químico Ruso Boris Belousov en la década de los 50's mientras experimentaba tratando de reproducir algunos procesos relacionados con el ciclo metabólico de las células.

La combinación original de la reacción de Belousov consistía de bromato, ácido cítrico e ion cerico. El esperaba observar un monótono cambio a partir del amarillo  $Ce^{4+}$  a un tono mas bajo de  $Ce^{3+}$  y quedo atónito al encontrar que después del desvanecimiento inicial el color amarillo reaparecía en intervalos de aproximadamente un minuto. Belousov estudió el sistema a gran detalle considerando los efectos de la temperatura y concentración inicial en donde notó que en una probeta sin agitación la solución exhibía ondas móviles amarillas, por lo que escribió un artículo para publicar sus observaciones sin embargo éste fue rechazado argumentándose que su descubrimiento era imposible y solo se podría publicar si se anexaba evidencia adicional ya que una simple receta y fotografías de las oscilaciones no eran suficientes, además de que su descubrimiento violaba la segunda Ley de la Termodinámica, la cual establece que la masa se conserva y esta no puede ser creada o destruida. Después de trabajar algunos años mas en su descubrimiento mandó una nueva versión de éste para su publicación siendo nuevamente rechazado, por lo que decide no intentarlo más y conserva su manuscrito que hace circular entre sus colegas rusos. Siendo su única publicación en unas memorias de un congreso sin refero en 1958, sin embargo un manuscrito que Belousov escribió en 1951 describiendo su trabajo fue publicado póstumamente en ruso en 1981 y posteriormente en una traducción al ingles en 1985.

Una década mas tarde Zhabotinsky [20] desarrolla una reacción posterior y tiene éxito al publicar sus resultados implementando algunas variantes de la reacción original de Belousov. Zhabotinsky reemplaza el ácido cítrico con ácido malónico obteniendo una mejor formulación que no producía precipitados.

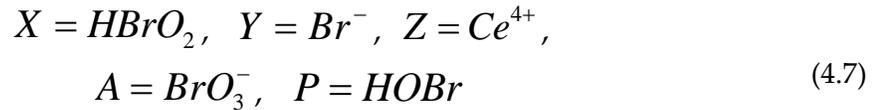
A principios de la década de los 70's, Field, Koros y Noyes (FKN) [21] combinaron enfoques cinéticos y termodinámicos para proponer un mecanismo detallado para la reacción Belousov-Zhabotinsky. Usando lo que en ese entonces presentaba el estado del arte del análisis numérico y capacidades de cómputo, fue capaz de simular el rango resultante de ecuaciones y demostrar el comportamiento oscilatorio que fue obtenido. Conjuntamente con los avances teóricos en termodinámica fuera de equilibrio, el mecanismo FKN provee a la comunidad química la evidencia que esta necesita para legitimar el fenómeno de las oscilaciones químicas a través de una versión simplificada de tres ecuaciones diferenciales acopladas.

El mecanismo básico de la reacción Belousov-Zhabotinsky consiste en la oxidación catalizada de cerio y ácido malónico en un medio ácido de iones de bromato. De acuerdo con el mecanismo sugerido por Field el proceso completo involucra diez diferentes reacciones de catorce distintos compuestos químicos.

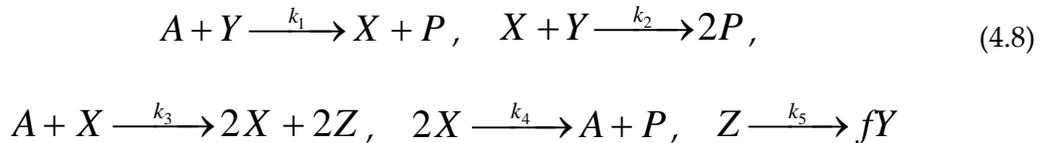
Las oscilaciones son observadas con respecto a la relación de concentración de los iones de cerio  $[Ce^{4+}]/[Ce^{3+}]$  y de concentración de Ion bromuro  $[Br^-]$ .

Aunque una gran cantidad de reacciones están involucradas, estas pueden ser racionalmente reducidas a cinco reacciones clave, con valores conocidos para el rango de constantes, las cuales capturan los elementos básicos del mecanismo. Estas cinco reacciones pueden entonces ser representados por un sistema de tres componentes químicos en el cual la totalidad de los valores de las constantes puede ser asignado con razonable seguridad. Este modelo es conocido por Fiel-Noyes ó modelo FN [22], el cual esta basado en el mecanismo de Fiel-Koros-Noyes. A continuación se muestra el sistema más sencillo para derivar el modelo de 3 especies.

Los cinco elementos químicos clave en las cinco reacciones del modelo FN son:



Y el modelo de reacciones puede ser aproximado por la secuencia:

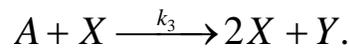


En donde el valor de las constantes  $k_1, \dots, k_5$  son conocidos y  $f$  es un factor estequiometrico que usualmente toma un valor de 0.5. Empleando la Ley de acción de masas se obtiene un sistema de ecuaciones cinéticas de tercer orden para las concentraciones, denotadas en letras minúsculas:

$$\begin{aligned} \frac{dx}{dt} &= k_1ay - k_2xy + k_3ax - k_4x^2, \\ \frac{dy}{dt} &= -k_1ay - k_2xy + fk_5z, \\ \frac{dz}{dt} &= 2k_3ax - k_5z. \end{aligned} \quad (4.9)$$

Este sistema es algunas veces referido como el "Oregonor" el cual exhibe limitadas oscilaciones cíclicas. Las investigaciones de Field, fueron hechas en la Universidad de Oregón, lo que explica el nombre dado al sistema.

El comportamiento oscilatorio de (4.9) depende críticamente de los parámetros involucrados. Por ejemplo si  $k_5 = 0$ , la concentración y del ion bromuro ( $Br^-$ ) decae a cero de acuerdo a la segunda ecuación, por lo que las oscilaciones no ocurren. Por otro lado si  $f = 0.5$  y  $k_5$  es lo suficientemente grande, la última reacción en (4.8) es muy veloz así como la tercera y quinta reacciones colapsan dentro de una sola reacción

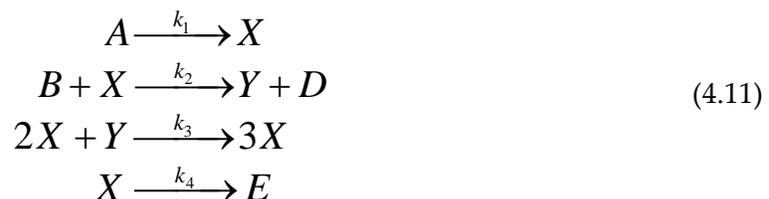


En este caso el sistema se reduce a un mecanismo de 2 especies, el cual es bimolecular y por lo tanto no puede oscilar. Por lo tanto las oscilaciones claramente tienen un dominio en el plano  $(f, k_5)$ . Es conveniente analizar el sistema (4.9) en una forma adimensional.

$$\begin{aligned} \varepsilon \frac{dx}{dy} &= qy - xy + x(1 - x), \\ \delta \frac{dy}{dt} &= -qy - xy + 2fz, \\ \frac{dz}{dt} &= x - z. \end{aligned} \tag{4.10}$$

#### 4.3.2.2. REACCIÓN QUÍMICA BRUSELADOR.

El modelo Bruselador fue desarrollado por Ilya Prigogine entre otros a finales de la década de los 60s. en la Universidad de Bruselas y es uno de los modelos químicos mas simples que exhiben inestabilidad de Turing [2]. En el caso del Bruselador la reacción fenomenológica formulada se encuentra dada por:



En donde X e Y son concentraciones químicas que se encuentran variando espacial y temporalmente, tomándose a las concentraciones químicas A, B y E como constantes. La ley de acción de masas establece que la velocidad de la reacción es proporcional al producto de la concentración de los reactantes, por lo que basándonos en las ecuaciones arriba mencionadas podemos encontrar los cambios en las concentraciones químicas X, Y que son los intermedios sujetos a posibles oscilaciones.

El modelo Bruselador produce el siguiente sistema de ecuaciones diferenciales:

$$\begin{aligned}\frac{dX}{dt} &= A + X^2Y - (B + 1)X \\ \frac{dY}{dt} &= BX - X^2Y\end{aligned}\tag{4.12}$$

En donde A denota el valor de una constante inicial y B es el parámetro de bifurcación. Siendo X el activador e Y el inhibidor. El estado estacionario del modelo se encuentra dado por  $(U_0, V_0) = (A, B/A)$ .

El modelo Bruselador muestra comportamientos temporales similares a la reacción Belousov Zhabotinsky. Esto fue un descubrimiento importante, que implicó que existía una conexión entre mecanismos de inestabilidades químicas, lo cual facilitó las primeras observaciones experimentales de los patrones de Turing en un reactor químico.

El modelo Bruselador ha sido estudiado extensivamente, algunos de los primeros estudios fueron concernientes con conceptos teóricos tales como rompimiento de simetría y bifurcaciones. Estudios posteriores emplearon el acercamiento computacional y direccionaron el problema de selección de patrones como una función de parámetros en sistemas de dos y tres dimensiones. Por su contribución al estudio de sistemas fuera de equilibrio, Ilya Prigogine fue acreedor al premio Nóbel en química en el año de 1977.

#### 4.4. FORMACION DE PATRONES ESPACIALES MEDIANTE MECANISMOS DE TURING.

Turing sugiere que bajo ciertas condiciones las sustancias pueden reaccionar y difundir en tal forma que se produce un estado estable heterogéneo de patrones espaciales de concentración de químicos, en donde la ecuación que gobierna el mecanismo de reacción difusión tiene la siguiente forma:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = f(c) + D\nabla^2 c \quad (4.13)$$

Donde  $c$  es el vector de concentración de las sustancias químicas,  $f$  representa la reacción cinética y  $D$  es la matriz diagonal de constantes positivas de los coeficientes de difusión. Sin embargo nos concentraremos en el modelo para dos especies químicas, por lo que el sistema de Turing consiste en dos o más ecuaciones diferenciales parciales no lineales acopladas que describen la reacción y difusión de químicos ó morfógenos.

La principal característica de los mecanismos de Turing es que estos tienen la capacidad de generar patrones espaciales independientes del tiempo a partir de cualquier configuración inicial aleatoria siempre y cuando se cumplan ciertas condiciones específicas.

En su forma más general el modelo de Turing describe la variación con respecto al tiempo de dos concentraciones químicas  $u$  y  $v$  debido a la reacción y la difusión entre estas, lo que se puede escribir de la siguiente forma:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} &= D_u \nabla^2 u + f(u, v) \\ \frac{\partial v}{\partial t} &= D_v \nabla^2 v + g(u, v) \end{aligned} \quad (4.14)$$

Donde  $D_u$  y  $D_v$  son los coeficientes de la difusión para las sustancias químicas  $u$  y  $v$ , respectivamente. Para que la inestabilidad de Turing ocurra el coeficiente de difusión del inhibidor debe ser más grande que el activador. La dinámica del modelo es determinada por la reacción cinética  $f(u, v)$  y  $g(u, v)$ , las cuales son funciones no lineales de las concentraciones, que pueden ser derivadas a partir de las ecuaciones de reacción química mediante el empleo de la ley de acción de masas y otras condiciones físicas.

La idea de Turing es simple pero profunda. Implica que en la ausencia de difusión ( $D_u = D_v = 0$ ),  $u$  y  $v$  tienden a la linealidad en un estado uniforme homogéneo, pero bajo ciertas condiciones los patrones espaciales no homogéneos pueden evolucionar a inestabilidad conducida por difusión (inestabilidad de Turing) si  $D_u \neq D_v$ . Condiciones que serán estudiadas en la siguiente subsección.

#### 4.4.1. ANÁLISIS DE LA ESTABILIDAD LINEAL Y EVOLUCIÓN DE PATRONES ESPACIALES.

La inestabilidad de Turing es un fenómeno que provoca que los sistemas de reacción-difusión espontáneamente comiencen a formar patrones espaciales y temporales con una longitud de escala característica que proviene de una configuración inicial arbitraria. El factor clave que induce a la inestabilidad es la difusión, siendo esto el por que la inestabilidad de Turing es comúnmente llamada Inestabilidad conducida por difusión.

Una importante característica de los sistemas de Turing comparada con una gran cantidad de otras inestabilidades en sistemas fuera del equilibrio es que las características de los patrones resultantes no son determinadas por la longitud de escala externamente impuesta, sino por la reacción química y los rangos de difusión que son intrínsecos al sistema. Los espirales, patrones dirigidos y las ondas viajeras generadas por la reacción Belousov-Zhabotinsky (BZ) no son a consecuencia de la inestabilidad de Turing ya que estos patrones no son estacionarios y los rangos de difusión de las sustancias químicas involucradas en la reacción son regularmente mas o menos el mismo. La diferencia en los rangos de difusión de las sustancias químicas es una condición necesaria pero no suficiente para que la inestabilidad de Turing se presente. A continuación se muestra como la inestabilidad de Turing puede ser formalizada y tratada analíticamente.

El análisis de la estabilidad lineal es un método frecuentemente utilizado para el estudio de la reacción de las perturbaciones de sistemas en la vecindad de un punto fijo. En el análisis lineal se toma en cuenta solo los términos lineales y en consecuencia sus resultados son insuficientes para describir la dinámica del sistema no lineal. Sin embargo, en el contexto de los sistemas de Turing, dentro de estas limitaciones el método es efectivo en predecir la existencia de la inestabilidad y la longitud de onda característica de esta.

Para iniciar el método definiremos dos concentraciones químicas dependientes del espacio y tiempo definidas por  $U(\vec{x},t)$  y  $V(\vec{x},t)$ , en donde  $\vec{x} \in \Omega \subset \mathbb{R}^n$  denota la posición en un espacio  $n$ -dimensional en un tiempo  $t \in [0, \infty)$  y  $\Omega$  es un dominio limitado simplemente conectado. Usando estas notaciones se puede derivar el sistema de ecuaciones de reacción-difusión (4.14), esquema que puede ser generalizable a diversos números de especies químicas.

La forma de la reacción cinética  $f$  y  $g$  en la ecuación (4.14) determina el comportamiento del sistema y existen numerosas posibilidades para la forma exacta de la reacción cinética que incluyen el modelo de Gray-scott [9], el modelo de Gierer-Meinhardt [10], el modelo de Selkov [11], el modelo de Schnackenberg [12], el modelo del Bruselador [13]. Todos estos modelos consisten en dos ecuaciones de reacción-difusión acopladas y exhiben inestabilidad de Turing con un cierto rango de parámetros.

El estado estacionario  $(U_c, V_c)$  del modelo se encuentra definido por los ceros de la reacción cinética, esto es,  $f(U_c, V_c) = g(U_c, V_c) = 0$ . Típicamente los modelos son ideados de tal manera que estos tienen un solo estado estacionario. Con ciertos valores en los parámetros el estado estacionario es estable contra perturbaciones en la ausencia de difusión, pero en presencia de ésta el estado se vuelve inestable contra las perturbaciones. Si se inicializa el sistema en el estado estacionario, éste puede permanecer de esta forma para siempre.

Si perturbamos al sistema en presencia de difusión arbitraria alrededor del estado estacionario, las perturbaciones crecerán debido a la inestabilidad dirigida por difusión, esto es pasa a un estado es inestable.

A continuación se efectuara un análisis del fenómeno de inestabilidad dirigida por difusión usando un modelo genérico de Turing, introducido por Barrio [14]. Este es un modelo fenomenológico, en donde la reacción cinética se obtiene mediante la expansión de Taylor de las funciones no lineales alrededor de la solución estacionaria  $(U_c, V_c)$ . Si los términos de orden cuatro y superiores son despreciados, las ecuaciones de reacción difusión se pueden escribir como:

$$\begin{aligned} u_t &= D\delta \nabla^2 u + \alpha u(1 - r_1 v^2) + v(1 - r_2 u) \\ v_t &= \delta \nabla^2 v + v(\beta + \alpha r_1 uv) + u(\gamma + r_2 v) \end{aligned} \quad (4.15)$$

En donde las concentraciones han sido normalizadas de la siguiente forma  $u = U - U_c$  y  $v = V - V_c$ , lo cual hace  $(u_c, v_c) = (0, 0)$ , un estado estacionario. Los parámetros  $r_1, r_2, \alpha, \beta$  y  $\gamma$  tienen valores numéricos. Los coeficientes de difusión son escritos en términos del factor de escala  $\delta$  y de  $D$ . Siempre se define a  $D \neq 1$  para obtener la inestabilidad.

Con la finalidad de reducir el número de parámetros y simplificar el análisis se adimensiona la ecuación (4.15) mediante el reescalamiento de los parámetros,

concentraciones y las escalas de tiempo y longitud. Obteniendo de esta forma el siguiente sistema:

$$\begin{aligned}\bar{u}_t &= D\nabla^2\bar{u} + v(\bar{u} + a\bar{v} - \bar{u}\bar{v}^2 - C\bar{u}\bar{v}) \\ \bar{v}_t &= \nabla^2\bar{v} + v(b\bar{v} + h\bar{u} + \bar{u}\bar{v}^2 + C\bar{u}\bar{v})\end{aligned}\quad (4.16)$$

En donde las concentraciones son escaladas de tal forma que  $(u, v) = \frac{1}{\sqrt{r_1}}(\bar{u}, \bar{v})$  y la relación tiempo-espacio esta dada por  $T = L^2 / \delta$  ( $t = T\tau$  y  $x = L\bar{x}$ ).

En términos de los parámetros originales, los nuevos parámetros son  $C = r_2 / (\alpha\sqrt{r_1})$ ,  $a = 1/\alpha$ ,  $b = \beta/\alpha$ ,  $h = \gamma/\alpha$  y  $v = \alpha T$ . El termino  $C$  ajusta el efecto relativo de las no linealidades cuadraticas y cubicas, favoreciendo la formación de patrones de manchas y rayas respectivamente.

Se puede observar que el sistema de ecuaciones (4.16) tiene un estado estacionario único en  $(u_c, v_c) = (0, 0)$  para  $h \neq -1$ , en donde el sistema tiene además otros dos estados estacionarios definidos por  $f(u_c, v_c) = g(u_c, v_c) = 0$  y que se encuentran dados por:

$$u_c^i = \frac{-v_c^i}{K} \quad (4.17)$$

y

$$v_c^i = \frac{-C + (-1)^i \pm \sqrt{C^2 - 4(h - bK)}}{2} \quad (4.18)$$

Siendo:  $K = \frac{1+h}{a+b}$ , e  $i = 1, 2$ .

El análisis lineal es un método generalmente usado para evaluar el comportamiento de las perturbaciones en un sistema no lineal en la vecindad de un estado estacionario. En el análisis lineal se toma en cuenta únicamente los términos lineales por lo que el resultado es insuficiente. Aun dentro de estas limitaciones el método es eficiente en predecir la existencia de la inestabilidad y de la longitud de onda característica en ésta.

El sistema linealizado en la ausencia de difusión se puede escribir de la siguiente forma  $\vec{w}_t = A\vec{w}$ .

$$\begin{pmatrix} u_t \\ v_t \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f_u & f_v \\ g_u & g_v \end{pmatrix}_{u_c, v_c} \begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix} \quad (4.19)$$

En donde  $f_u, f_v, g_u$  y  $g_v$ , en la matriz  $A$  denotan las derivadas parciales de los correspondientes terminos en la reacción cinética evaluadas en el estado estacionario  $(u_c, v_c)$ . En el caso de la ecuación (4.16) la matriz linealizada queda de la siguiente forma:

$$A = v \begin{pmatrix} 1 - v_c^2 - Cv_c & -2u_c v_c \\ v_c^2 + h + Cv_c & b + 2u_c v_c + Cu_c \end{pmatrix} \quad (4.20)$$

En donde:

$u_c$  y  $v_c$  están dados por las ecuaciones (4.17) y (4.18). En el análisis lineal la variación del espacio y tiempo es tomada en cuenta mediante la substitución en la solución de prueba de la forma  $w(\vec{r}, t) = \sum_k c_k e^{\lambda t} w_k(\vec{r}, t)$  dentro del sistema linealizado en presencia de la difusión. Los eigenvalores del sistema linealizado son obtenidos de forma usual por:

$$\left| A - Dk^2 - \lambda I \right| = 0, \quad (4.21)$$

En donde  $A$  esta dada por la ecuación (4.19),  $D_{11} = D_u$ ,  $D_{22} = D_v$ ,  $D_{12} = D_{21} = 0$  e  $I$ , es la matriz identidad. En el caso de la ecuación (4.16)  $A$  esta dada por la ecuación (4.20), y  $D_{11} = D$  y  $D_{22} = 1$ . A partir del determinante en la ecuación (4.21) se obtiene la ecuación:

$$\begin{aligned} \lambda^2 + \left[ (D_u + D_v)k^2 - f_u - g_v \right] \lambda + D_u D_v k^4 \\ - k^2 (D_v f_u + D_u g_v) + f_u g_v - f_v g_u = 0 \end{aligned} \quad (4.22)$$

En donde  $k^2 = \vec{k} \cdot \vec{k}$ . La relación de dispersión  $\lambda(k)$  que predice los números de onda inestables puede ser resuelta a partir de la ecuación (4.22), lográndose obtener un estimado para el mayor número de onda inestable y el valor crítico del parámetro de

bifurcación considerando el hecho de que al inicio de la inestabilidad  $\lambda(k_c) = 0$ . Por lo que de esta forma el termino independiente  $\lambda$  en la ecuación (4.22) debe ser cero en  $k = k_c$ . Para el caso del modelo genérico de Turing esta condición se lee como:

$$Dk_c^4 - k_c^2 v(Db + 1) + v^2(b - ah) = 0 \quad (4.23)$$

En un principio esta ecuación tiene únicamente una solución dada por  $k_c^2 = v(Db + 1)/(2D)$ , la cual toma lugar para el valor del parámetro de bifurcación  $a = a_c = -(Db - 1)^2/(4Dh)$ . Existiendo una inestabilidad para  $a < a_c$ , siendo necesarias las condiciones siguientes para que la inestabilidad de Turing se cumpla.

$$\begin{aligned} f_u + g_v &< 0 \\ f_u g_v - f_v g_u &> 0 \\ D_v f_u + D_u g_v &> 0. \end{aligned} \quad (4.24)$$

#### 4.5 SISTEMA DIGITAL REACCIÓN - DIFUSIÓN.

Un Sistema Digital Reacción-Difusión, DRD por sus siglas en inglés es un modelo dinámico no lineal de un sistema reacción-difusión discreto en tiempo y en espacio, el cual esta inspirado en el mecanismo de la morfogénesis, fenómeno biológico de formación de patrones y formas en seres vivos, fenómeno propuesto y estudiado por Alan Turing.

Recientemente han sido propuestos estudios basados en el modelo de la morfogénesis empleando simulaciones mediante ordenadores, despertando un gran interés en la biología matemática. Desde el punto de vista de la ingeniería, la morfogénesis nos provee de importantes conceptos para la invención de una nueva clase de algoritmos inteligentes para el procesamiento de señales basados en el mecanismo biológico de formación de patrones.

El principal objetivo del sistema digital reacción-difusión (DRD) es el de construir una estructura de morfogénesis digital para manipular los patrones de textura en imágenes y estructuras aparecidas en señales procesadas y aplicaciones gráficas de computadora. En esta tesis se empleara particularmente para el realce y restauración de huellas dactilares defectuosas.

#### 4.5.1. DERIVACIÓN DEL SISTEMA DIGITAL DE REACCIÓN – DIFUSIÓN PARA EL REALCE Y RESTAURACIÓN DE HUELLAS DACTILARES DEFECTUOSAS.

Siguiendo al modelo de formación de patrones de Turing la mayoría de los modelos computacionales de formación de patrones biológicos para aplicaciones científicas y de ingeniería se encuentran descritos por ecuaciones de reacción-difusión de tiempo continuo y no pueden ser directamente manejadas mediante la teoría del procesamiento digital de señales. Para resolver este problema se emplea el sistema digital reacción-difusión el cual es un modelo discretizado en tiempo y espacio, derivándose naturalmente del sistema de reacción-difusión original el cual esta definido en un espacio y tiempo continuo para  $N$  objetos (también llamadas morfógenos) la dinámica es entonces presentada y se puede escribir como:

$$\frac{\delta \bar{X}(t, x, y)}{\delta t} = \bar{R}(\bar{X}(t, x, y)) + \bar{D}\nabla^2 \bar{X}(t, x, y) \quad (4.25)$$

En donde:

i)  $\bar{X}(t, x, y) = [X_1(t, x, y), \dots, X_N(t, x, y)]$  y  $X_i(t, x, y)$  es la concentración para el  $i$ -ésimo morfógeno en la posición  $x$  y  $y$  en la huella dactilar para un tiempo específico.

ii)  $\bar{R}(\bar{X}(t, x, y)) = [R(X_1(t, x, y)), \dots, R(X_N(t, x, y))]$  y  $R(X_i(t, x, y))$  es la reacción cinética para el  $i$ -ésimo morfógeno en la posición  $x, y$  en la huella dactilar para un tiempo específico.

iii)  $\bar{D} = \text{diag}[D_1, \dots, D_N]$ ,  $D_i$  es el coeficiente de difusión del  $i$ -ésimo morfógeno en la ley de Fick, en donde este se asume constante.

Por lo que toda una variable continua  $\tilde{x}$  en el intervalo de tiempo mostrado  $t_0$ , y para los intervalos de espacio  $t_1$  y  $t_2$  y asumiendo que el índice de tiempo discreto se encuentra dado por  $n_0$  y los índices de espacio discreto están dados por  $n_1, n_2$ , se expresa como:

$$x(n_0, n_1, n_2) = \tilde{x}(n_0 t_0, n_1 t_1, n_2 t_2) \quad (4.26)$$

Entonces la versión discretizada de la ecuación (3.25) se escribe de la siguiente forma.

$$\bar{X}(n_0 + 1, n_1, n_2) = \bar{X}(n_0, n_1, n_2) + \bar{R}(\bar{X}(n_0, n_1, n_2)) + \bar{D}(l * \bar{X}(n_0, n_1, n_2)) \quad (4.27)$$

Donde  $(l * \bar{X}(n_0, n_1, n_2))$  denota el operador de convolución espacial, el cual define el Laplaciano  $\nabla^2$  de la ley de Fick como sigue:

$$(l * X)(n_0, n_1, n_2) = \begin{bmatrix} \sum_{r_1=-1}^1 \sum_{r_2=-1}^1 l(r_1, r_2) X_1(n_0, n_1 - r_1, n_2 - r_2) \\ \sum_{r_1=-1}^1 \sum_{r_2=-1}^1 l(r_1, r_2) X_2(n_0, n_1 - r_1, n_2 - r_2) \\ \vdots \\ \sum_{r_1=-1}^1 \sum_{r_2=-1}^1 l(r_1, r_2) X_N(n_0, n_1 - r_1, n_2 - r_2) \end{bmatrix} \quad (4.28)$$

Siendo.

$$l(r_1, r_2) = \begin{cases} \frac{1}{T_1^2} & (n_1, n_2) = (-1, 0), (1, 0) \\ \frac{1}{T_2^2} & (n_1, n_2) = (0, -1), (0, 1) \\ -2\left(\frac{1}{T_1^2} + \frac{1}{T_2^2}\right) & (n_1, n_2) = (0, 0) \\ 0 & \text{Para cualquier otro caso} \end{cases}$$

La ecuación (4.27) es la base del Sistema Digital Reacción-Difusión (DRD), el cual puede ser entendido como un filtro digital no lineal en donde la imagen de entrada se almacena en el morfógeno específico.

#### 4.6. REALCE DE HUELLAS DACTILARES.

El comportamiento del DRD puede direccionarse para pertenecer al campo del análisis de estabilidad enfocado al procesamiento digital de señales multidimensionales [23]. La principal contribución de este trabajo de tesis consiste en mostrar la importancia de una apropiada aplicación en la generación de patrones que aparecen en la naturaleza, dentro de las técnicas del reconocimiento de patrones [24]. Obteniendo de esta forma las bases para el diseño de nuevos algoritmos en el área del procesamiento de imágenes y texturas especialmente en el caso de las huellas dactilares.

Partiendo de esta idea y desde el punto de vista del procesamiento digital de señales, la linearización de cualquier DRD puede ser entendida como un filtro digital lineal bidimensional, en donde  $x_i(n_0, n_1, n_2)$  es la entrada y  $x_i(n_0 + 1, n_1, n_2)$  es la salida.

Empleando en este trabajo de tesis al DRD para el realce y restauración de imágenes de huellas dactilares defectuosas, empleando como primera instancia al DRDS con la reacción cinética  $R(x)$ , Bruselador la cual como se ha reportado [23], cumple con la condición de inestabilidad dirigida por difusión.

El DRD con dos morfógenos basado en el Bruselador queda definido por:

$$\begin{aligned}x_1(n_0 + 1, n_1, n_2) &= x_1(n_0, n_1, n_2) + R_1(x_1(n_0, n_1, n_2), x_2(n_0, n_1, n_2)) + D_1(l^* x_1(n_0, n_1, n_2)) \\x_2(n_0 + 1, n_1, n_2) &= x_2(n_0, n_1, n_2) + R_2(x_1(n_0, n_1, n_2), x_2(n_0, n_1, n_2)) + D_2(l^* x_2(n_0, n_1, n_2))\end{aligned}\tag{4.29}$$

En donde:

$$\begin{aligned}R(x_1) &= \frac{dx_1}{dt} = k_1 - (k_2 + 1)x_1 + x_1^2 x_2, \\R(x_2) &= \frac{dx_2}{dt} = k_2 x_1 - x_1^2 x_2\end{aligned}$$

Debiendo cumplirse la siguiente condición para lograr obtener la inestabilidad dirigida por difusión[23]:

$$\begin{aligned}
& 16D_1D_2 \left( \frac{1}{T_1^2} \sin^2 \frac{w_1T_1}{2} + \frac{1}{T_2^2} \sin^2 \frac{w_2T_2}{2} \right)^2 \\
& -4 \left( -T_0^2k_1^2D_1 + T_0(k_2-1)D_2 \right) \left( \frac{1}{T_1^2} \sin^2 \frac{w_1T_1}{2} + \frac{1}{T_2^2} \sin^2 \frac{w_2T_2}{2} \right) \\
& + T_0^2 < 0
\end{aligned} \tag{4.30}$$

En donde:  $T_0$ ,  $T_1$  y  $T_2$  son factores discretos de tiempo y espacio,  $w_1$  y  $w_2$  se definen como una distribución espectral elíptica en dominio de frecuencia,  $k_1$  y  $k_2$  son las constantes cinéticas de la reacción y por ultimo  $D_1$  y  $D_2$  los coeficientes de difusión.

Para el caso del DRD de tres morfógenos este se encuentra basado en el sistema de reacción conocido como Oregonator, el cual modela la reacción comúnmente estudiada "Belousov-Zhabotinsky" (BZ) que es considerada un paradigma en la formación de patrones de tipo biológico y que previamente analizamos en la sección 4.3.2.1 de este capítulo.

Por lo que el DRD con tres morfógenos basado en la reacción "Belousov-Zhabotinsky" se define de la siguiente manera:

$$\begin{aligned}
x(n_0+1, n_1, n_2) &= x(n_0, n_1, n_2) + R_1(x(n_0, n_1, n_2), y(n_0, n_1, n_2), z(n_0, n_1, n_2)) + D_1(l^* x(n_0, n_1, n_2)) \\
y(n_0+1, n_1, n_2) &= y(n_0, n_1, n_2) + R_2(x(n_0, n_1, n_2), y(n_0, n_1, n_2), z(n_0, n_1, n_2)) + D_2(l^* y(n_0, n_1, n_2)) \\
z(n_0+1, n_1, n_2) &= z(n_0, n_1, n_2) + R_3(x(n_0, n_1, n_2), y(n_0, n_1, n_2), z(n_0, n_1, n_2)) + D_3(l^* z(n_0, n_1, n_2))
\end{aligned} \tag{4.31}$$

En donde las ecuaciones cinéticas para los morfógenos oscilantes  $x$ ,  $y$ ,  $z$  se encuentran dadas por:

$$\varepsilon \frac{dx}{dy} = qy - xy + x(1-x), \quad \delta \frac{dy}{dt} = -qy - xy + 2fz, \quad \frac{dz}{dt} = x - z.$$

Obteniendo los valores de las variables  $\varepsilon$ ,  $\delta$ ,  $q$ , mediante:

$$\varepsilon = \frac{k_5}{(k_3A)} \quad \delta = \frac{k_4k_5}{(k_2k_3A)} \quad q = \frac{k_1k_4}{(k_2k_3)}$$

Siendo  $f$  para todos los casos constante y positivo.

Debiendo cumplirse la siguiente condición para obtener la inestabilidad dirigida por difusión [25]:

$$(1+q-6f+8f^2+8fq)X_s+q(1+q-2f-8f^2+4fq)<0.$$

En donde:

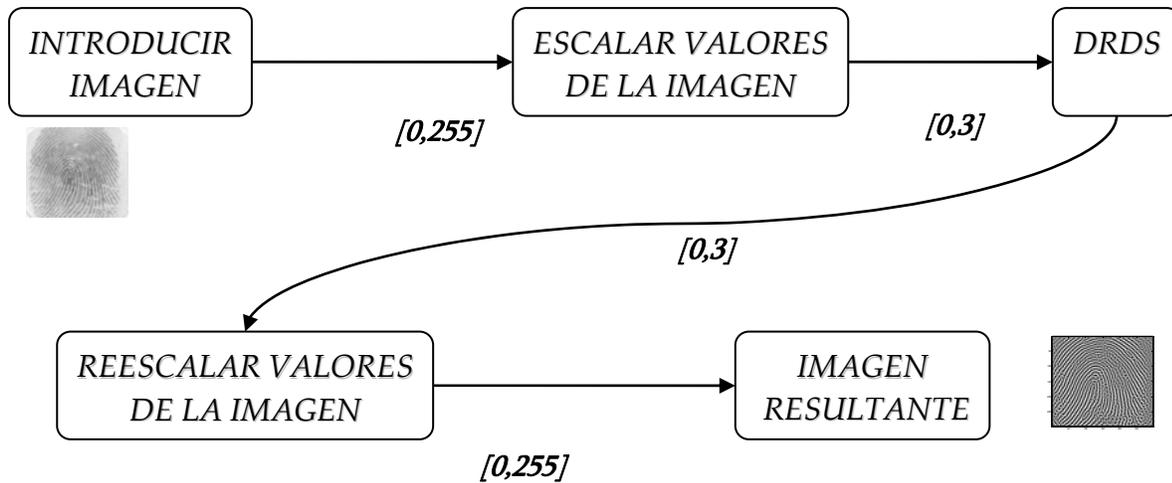
(4.32)

$$X_s = \frac{(1-q-2f)+\sqrt{(1-q-2f)^2+4q(1+2f)}}{2}$$

El DRDS así definido ya sea para dos o tres morfógenos se encuentra listo para ser aplicado en el proceso de realce de imágenes. Para lo que primeramente establecemos los valores dentro de los cuales la dinámica se encuentra en equilibrio  $(x_1, x_i) = (2, 2)$ , posteriormente los rangos de variación de las variables  $(x_1, x_i)$  son limitados alrededor del punto de equilibrio es decir:  $1 \leq x_i \leq 3$ , por lo que es necesario escalar los valores de los niveles de gris de la imagen que tienen un rango de [0-255], a un rango [1-3].

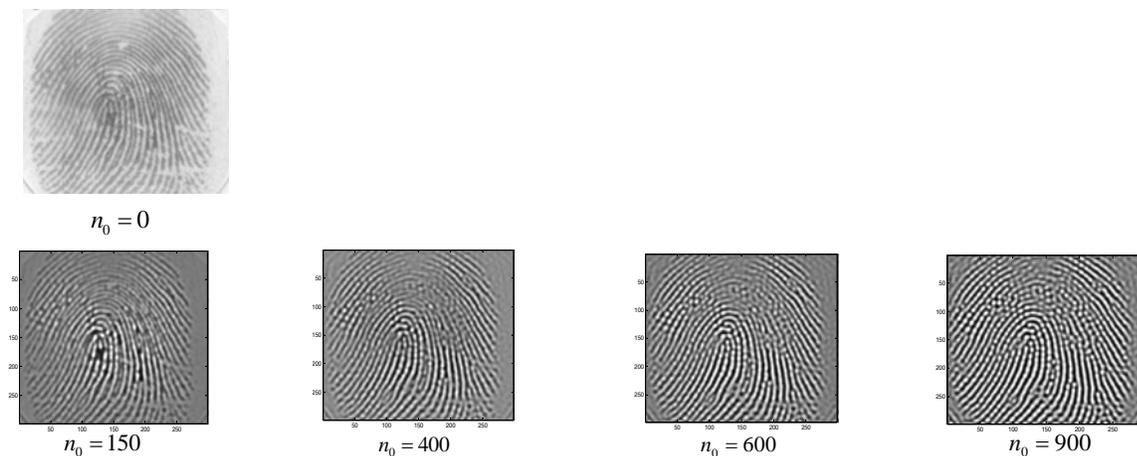
Una vez efectuadas las anteriores consideraciones almacenamos los valores de la imagen inicial de entrada como valores de concentración para el primer morfógeno específico, quedando establecido de esta forma  $x_1(0, n_1, n_2)$ , en el tiempo 0, mientras que la condición inicial para el segundo ó tercer morfógeno  $x_i(0, n_1, n_2) = 2$ , se encuentra determinada por estar dentro de los valores de equilibrio.

Después de efectuar la dinámica  $n_0$  veces, se obtiene la imagen de salida de los morfógenos, quedando definida por  $x_i(n_0, n_1, n_2)$  en un tiempo discreto  $n_0$ , la cual es reescalada a su valor original en escala de grises [0-255], produciéndose de esta manera la imagen final de salida tal y como se muestra en el siguiente diagrama de flujo.

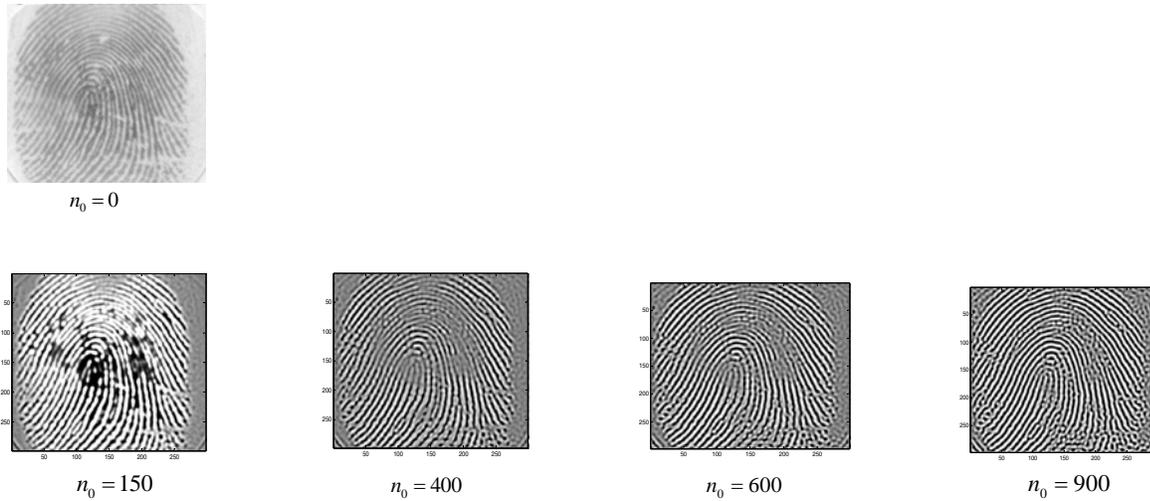


En este trabajo de investigación un gran número de parámetros fueron probados, siendo todos ellos seleccionados dentro del rango de inestabilidad de Turing ya sea para los casos basados en dos o tres morfógenos. Sin embargo la calidad de la imagen realizada de la huella dactilar se encuentra fuertemente afectada por el conjunto de parámetros de reacción-difusión elegidos para la estimación.

En las figuras 4.3, 4.4 y 4.5 se presentan algunos resultados para el DRD de dos especies basado en el Bruselador y las figuras 4.6 y 4.7 que muestran los resultados para el DRD con tres especies basado en el Oreganor.

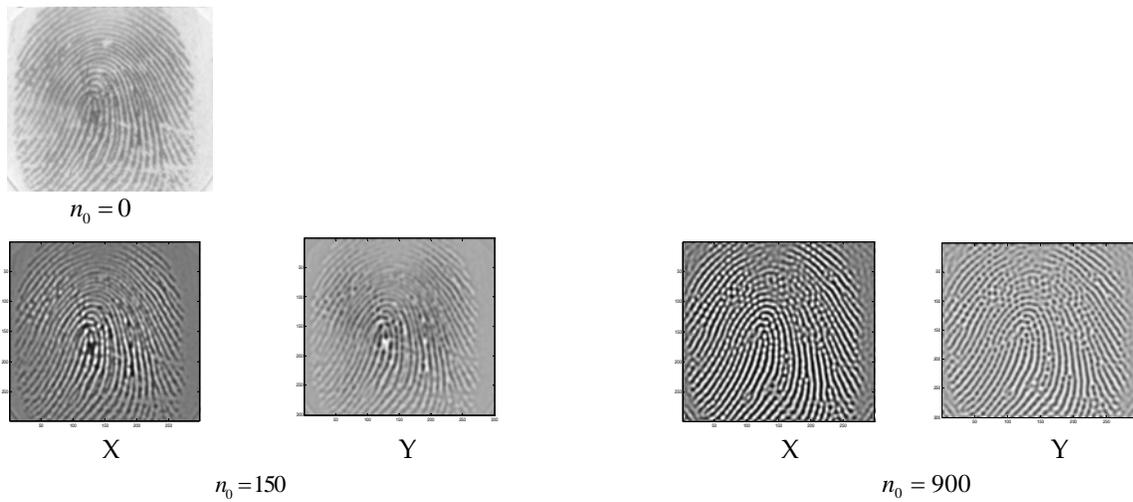


**Figura 4.3** Realce de imágenes de huellas dactilares mediante el DRD basado en el Bruselador con:  $D_1= 0.01$ ,  $D_2=0.05$ ,  $K_1= 2$ ,  $K_2 = 4$ ;  $T_0= 0.01$ ,  $T_1= 0.6863$ ,  $T_2=0.5759$ .

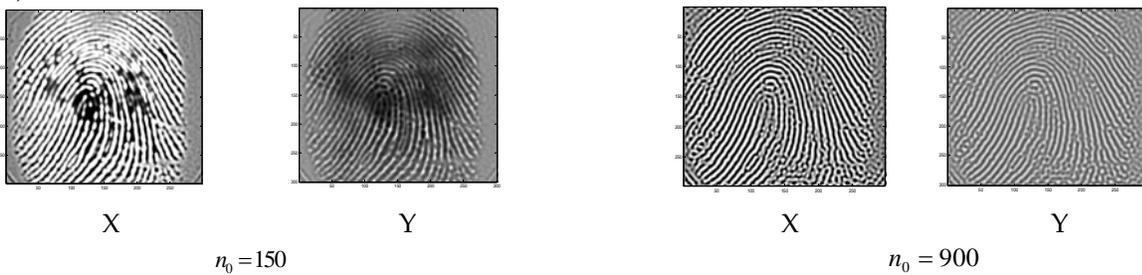


**Figura 4.4** Realce de imágenes de huellas dactilares mediante el DRD basado en el Bruselador con:  $D_1=0.01$ ,  $D_2=0.05$ ,  $K_1=3$ ,  $K_2=6$ ;  $T_0=0.01$ ,  $T_1=0.6863$ ,  $T_2=0.5759$ .

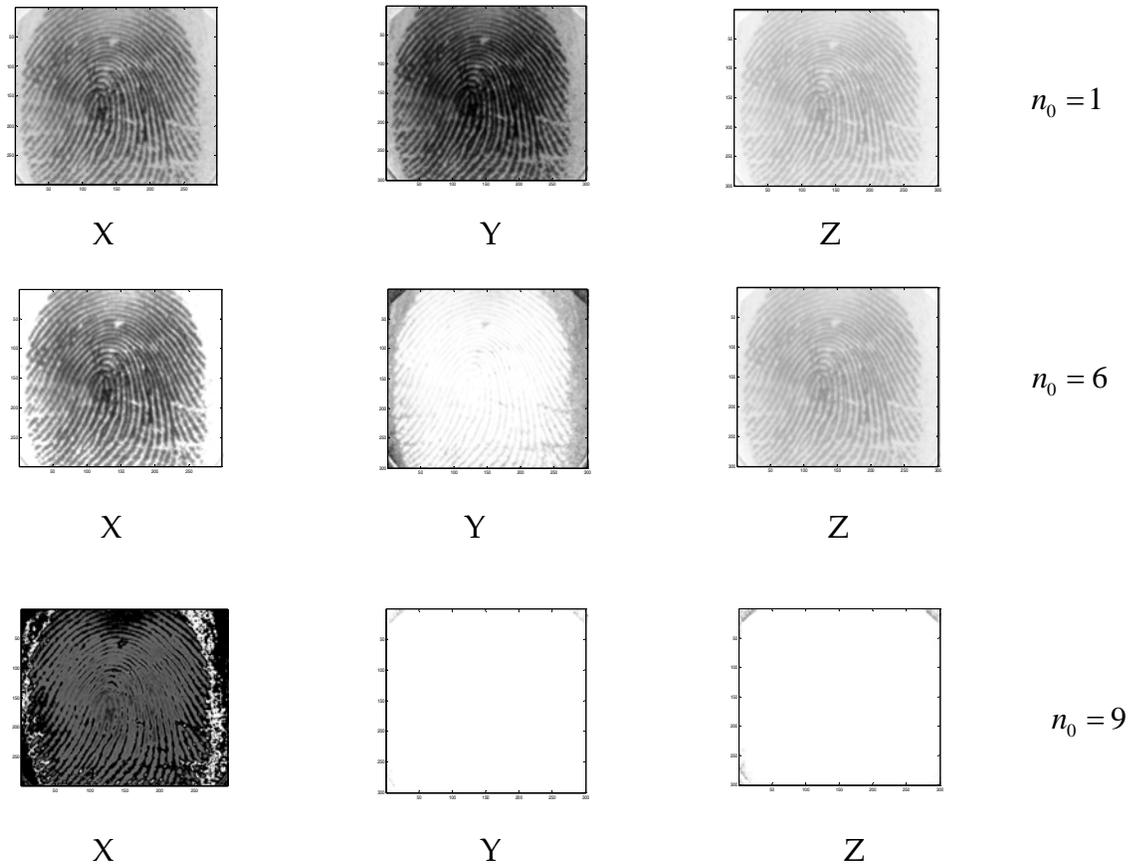
a)



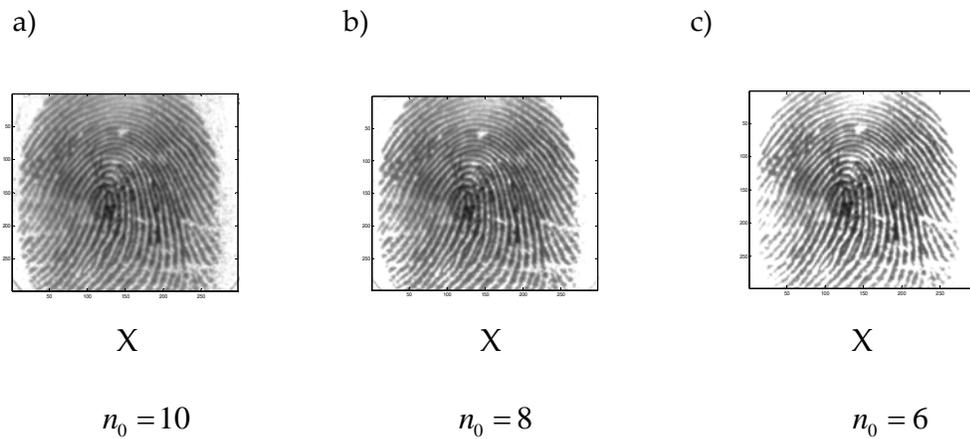
b)

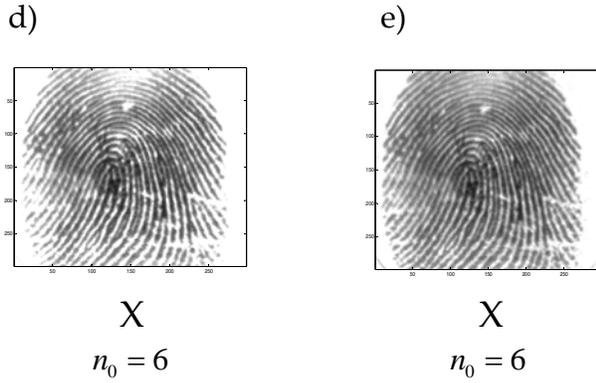


**Figura 4.5** Realce de imágenes de huellas dactilares mediante el DRD basado en el Bruselador. La evolución de los morfógenos  $X$ ,  $Y$ , es mostrada. En donde : a)  $D_1=0.01$ ,  $D_2=0.05$ ,  $K_1=2$ ,  $K_2=4$ ;  $T_0=0.01$ ,  $T_1=0.6863$ ,  $T_2=0.5759$ . b)  $D_1=0.01$ ,  $D_2=0.05$ ,  $K_1=3$ ,  $K_2=6$ ;  $T_0=0.01$ ,  $T_1=0.6863$ ,  $T_2=0.5759$ .



**Figura 4.6** Realce de imágenes de huellas dactilares mediante el DRD basado en el Oregano. La evolución de los tres morfógenos  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  es mostrada. En donde:  $D_1= 0.009, D_2=0.05, D_3=0.01, \varepsilon = 11, q= 0.3, f=0.05, \delta = 0.015;$   $T_0= 0.023, T_1=0.686, T_2=0.5759.$





**Figura 4.7** Realce de imágenes de huellas dactilares mediante el DRD basado en el Oreganor con:

a)  $D_1=0.01, D_2=0.05, D_3=0.01, \varepsilon=10, q=0.00003, f=0.05, \delta=0.02; T_0=0.023, T_1=0.6863, T_2=0.5759.$

b)  $D_1=0.01, D_2=0.05, D_3=0.01, \varepsilon=10, q=0.00003, f=0.05, \delta=0.02; T_0=0.023, T_1=0.6863, T_2=0.5759.$

c)  $D_1=0.009, D_2=0.05, D_3=0.01, \varepsilon=10, q=0.00003, f=0.05, \delta=0.015; T_0=0.023, T_1=0.6863, T_2=0.5759.$

d)  $D_1=0.009, D_2=0.05, D_3=0.01, \varepsilon=11, q=0.00003, f=0.05, \delta=0.015; T_0=0.023, T_1=0.6863, T_2=0.5759.$

e)  $D_1=0.009, D_2=0.05, D_3=0.01, \varepsilon=11, q=0.3, f=0.05, \delta=0.015; T_0=0.023, T_1=0.6863, T_2=0.5759.$

En las figuras anteriores claramente se puede observar que los valores absolutos de  $K_1 = k_1 A$  y  $K_2 = k_2 B$ , para el caso del DRD basado en el Bruselador, son determinantes para la evolución de la dinámica de la huella dactilar, en donde A y B son valores constantes que mantienen la concentración fija para los morfógenos A y B. Encontrando que estos valores tienen un gran impacto entre otras características en la conectividad de los patrones y el realce de la imagen, apareciendo como se puede ver en las figuras 4.3 y 4.4 diferentes topologías después de 900 iteraciones.

Habiéndose reportado que no es posible obtener información relevante al analizar el segundo morfógeno  $X_2$  en el DRD basado en el Bruselador [23], en esta tesis podemos afirmar que esto no es verdad ya que analizando la dinámica para cada morfógeno se obtienen diferentes calidades en la imagen procesada, en donde observando la figura 4.5, podemos determinar que la conectividad, brillantes y nitidez son los aspectos mas importantes a considerar.

En las figuras 4.6 y 4.7 presentamos algunos ejemplos del DRD basado en el Oreganor, en donde se aprecia la evolución de los tres morfógenos  $X, Y, Z$ , en donde de forma por de mas interesante se puede ver que la dinámica es mucho mas rápida y eficiente en comparación con el DRD basado en el Bruselador en donde fueron necesarias 900 iteraciones para la obtención de resultados satisfactorios, en comparación de las 6

iteraciones necesarias en la dinámica empleando el Oregonator. Esto a causa de las fuertes oscilaciones e inestabilidades de tiempo que posee la reacción Belousov-Zhabotinsky. Para el caso del DRD basado en el Oregonator el morfógeno X es el único conveniente para ser considerado para el proceso de realce de huellas dactilares.

Esto prueba que la dinámica específica no lineal realizada por los morfógenos tiene una fuerte influencia en la implementación del DRD, esto al menos en el sentido de elegir el mejor valor del morfógeno para obtener el mejor desempeño en el realce de la imagen de la huella dactilar.

En base a las figuras podemos notar fácilmente que el DRD basado en el Oregonator posee una importante característica que no es compartida con el DRD que basa en el Bruselador, siendo esta que a partir de la imagen original de la huella dactilar el ruido puede ser fácilmente identificable.

En la figura 4.5 el DRD basado en el Oregonator muestra una fuerte sensibilidad al conjunto de parámetros propuestos para el realce de las imágenes, ya que estos son mucho más inestables que para el caso del DRD basado en el Bruselador, lo que significa que una inapropiada elección de los parámetros para el primer caso fácilmente desborda a el sistema, mientras que el segundo caso nos permite una mayor libertad de selección.

## REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.

1. De Groot S. R. and Mazur P., *Non-equilibrium Thermodynamics*. North Holand, Amsterdam (1962).
2. Prigogine I. and Lefever R., *Symmetry breaking instabilities in dissipative systems*, Journal in Chemical Physics, vol. 48, pp.1695, (1968).
3. Launder R., Inadequacy of entropy and entropy derivatives in characterizing the steady state, *Physical Review Applied*, vol. 12, pp.636, (1975).
4. Slack, J.M.W., *From Egg to Embryo, Determinative events in early development*. Cambridge University Press, (1983).
5. Wolpert L., *Positional information and the spatial pattern of cellular differentiation*. J. Theoretical Biology, vol.25, pp.1-47, (1969).
6. Murray James D., *How the leopards gets its spots*. Scientific American, vol. 62, (1988).
7. Gierer A. and Meinhardt H., *A theory of biological pattern formation*, *Kybernetik*, vol.12, pp.30, (1972).
8. Schepers H. E. and Markus M., *Two types of performance of an isotropic cellular automaton stationary, Turing patterns and spiral waves*, *Physica A.*, vol.188, pp.337, (1992).
9. P. Gray and S. K. Scott, *Chemical Eng. Sci.*, vol 38, pp.29, (1938).
10. A. Geirer and H. Meinhardt, *Kybernetik*, vol. 12, pp.30, (1972).
11. A. Hunding, *Journal Chemical Phys.* vol. 72, pp.5241, (1980).
12. V. Dufiet and J. Boissonade, *Journal Chemical Phys.*, vol. 96, pp.664 (1991).
13. G. Nicolais and I. Prigogine, *Self-Organization in Non-Equilibrium Chemical Systems*, Wiley, New York, (1977).
14. Kondo S. and Asai R., *A reaction-diffusion wave on the skin of the marine angelfish pormacanthus*, *Nature*, vol. 376, pp. 678, (1995).

15. Murray James D., *Mathematical Biology*, Springer Verlag, Berlin (1989).
16. Yang L. and Epstein J.R., *Oscillatory Turing patterns in reaction-diffusion systems with two coupled layers*, *Physical Review Letters*, vol. 90, (2003).
17. Turing A. M., *The chemical basis of morphogenesis*, *Philosoph. Transaction Royal Society of London*, vol. B.237, p.p.37-72, (1952).
18. Lotka A. J., *Contribution to the theory of periodic reactions*, *Journal of Physical Chemical*, vol. 14, pp. 271-274, (1910).
19. Lotka A. J., *Undamped oscillations derived from the law of mass actions*, *Journal of American Chemical Society*, vol. 42, pp.1595-1599, (1920).
20. Zhabotinsky A. M., *Periodic processes of the oxidation of malonic acid in solution (Study of the kinetics of Belousov's reaction)*. *Biofizika* vol.9, pp. 306-311, (1964).
21. Field R. J., Körös E., Noyes R. M., *Oscillations in chemical systems, part 2. Thorough analysis of temporal oscillations in the bromate-cerium-malonic acid system*. *Journal of American Chemical Society*, vol. 94, pp. 8649-8664, (1972).
22. Field R. J., Noyes R. M., *Oscillations in chemical systems, part 4. Limited cycle behaviour in a model of a real chemical reaction*. *Journal of Chemical Physics*, vol. 60, pp. 1877-1844(1974).
23. Ito K., Aoki T., Higuchi T., *"Digital reaction-diffusion system-A foundation of bio-inspired texture image processing,"* *IEICE Trans. Fundamentals*, E84-A (2001), 1909-1918.
24. M. Kass and A. Witkin, *Analyzing Oriented Patterns*, *Computer Vision, Graphics, and Image Processing*, vol. 37, no. 3, pp. 362-385, Mar. 1987.
25. Hong Quian, J.D. Murray, *"A simple method of parameter Space determination for Diffusion-Driven Instability with three species"*, *Applied Mathematics Letters* Vol. 14, pp. 405-411 (2001).

# CAPITULO 5.

## EMPLEO DEL DRD ADAPTATIVO PARA LA RESTAURACIÓN DE HUELLAS DACTILARES.

### 5.1 DRD ADAPTATIVO.

En este capítulo se desarrolla una variante del modelo del DRD llamado DRD adaptativo, el cual tiene la finalidad de restaurar huellas dactilares defectuosas que puedan tener líneas entrecortadas ó secciones incompletas, que dificultan ó hacen imposible el proceso de reconocimiento, por lo que para resolver este problema se desarrolla una variante del DRD, en la cual empleamos la orientación local de las rugosidades encontradas en la imagen de la huella dactilar con la finalidad de guiar la acción del DRD, realizando esto mediante la introducción de mascarar de orientación que posteriormente son convolucionadas con los términos difusivos de la siguiente forma:

$$\bar{X}(n_0 + 1, n_1, n_2) = \bar{X}(n_0, n_1, n_2) + \bar{R}(\bar{X}(n_0, n_1, n_2)) + (\nabla \cdot \bar{D} \nabla) \bar{X}(n_0, n_1, n_2) \quad (5.1)$$

En donde se introducen mascarar de orientación para ser convolucionadas con los términos difusivos, empleando condiciones de frontera de Newman.

Definiendo a  $\bar{D}$  como un tensor para la difusión anisotrópica de los morfógenos de la forma:

$$\bar{D} = \begin{pmatrix} D_{xx} & D_{xy} \\ D_{yx} & D_{yy} \end{pmatrix} \quad (5.2)$$

Combinando la matriz de difusión con aproximación de diferencias finitas discretas del laplaciano generalizado se obtiene la siguiente mascara de convolución:

$$(\nabla \cdot \bar{D} \nabla) \bar{X}(n_0, n_1, n_2) = \mu \begin{pmatrix} -D_{xy} & 2D_{yy} & D_{xy} \\ 2D_{xx} & -4(D_{xx} + D_{yy}) & 2D_{xx} \\ D_{xy} & 2D_{yy} & -D_{xy} \end{pmatrix} * \bar{X}(n_0, n_1, n_2) \quad (5.3)$$

Para obtener la orientación local de las rugosidades, que nos sirven para conformar las mascararas de orientación nos auxiliamos del *Campo Direccional* (CD), el cual describe la estructura ó forma básica de la huella dactilar, por lo que nos enfocamos en el CD de las huellas dactilares y los temas directamente relacionados a ello.

El CD es en un principio perpendicular a los gradientes sin embargo los gradientes son orientaciones a escala del píxel mientras que el CD describe la orientación de la estructura combinada de valles y rugosidades, las cuales se encuentran a una escala mucho mayor. Por lo tanto el CD puede ser derivado a partir de los gradientes mediante la ejecución de algunas operaciones comunes a estos, involucrando a los píxeles y algunas vecindades de estos, a razón de que los gradientes no son paralelos en su totalidad ya que en los puntos finales el CD se encuentra definido por el promedio del operador.

El método de estimación que se describe en esta tesis permite la aplicación del CD relacionado, tarea que requiere Campos Direccionales con una muy alta definición y exactitud, para que conjuntamente con el CD pueda ser estimada la coherencia, la cual es una medida que indica que tan exactamente los gradientes se encuentran apuntando en la misma dirección.

Las mascararas de orientación se encuentran definidas por  $h^{n_1 n_2}$  en el píxel  $n_1 \times n_2$  como una matriz de coeficientes teniendo valores dentro de la ventana  $W$  la cual puede ser derivada mediante la extracción de la orientación dominante de la rugosidad correspondiente.

Una gran variedad de métodos son usados para estimar el CD de una huella dactilar, tal y como lo reporta la literatura estos incluyen filtros asociados con métodos encaminados en poder de alta frecuencia en tres dimensiones, métodos de estimación espectral bidimensional y micro patrones que pueden ser considerados gradientes binarios. Estas técnicas no tienen el mismo grado de exactitud que poseen los métodos basados en gradientes, a efecto principalmente del número limitado de posibles orientaciones fijas, siendo esto de gran importancia cuando se usa el CD para tareas tales como el tracing (seguimiento) de líneas de flujo.

En nuestro sistema el algoritmo seleccionado para la estimación de la orientación de la rugosidad dominante se basa en el gradiente de filtros Gaussianos de texturas, consistiendo este algoritmo básicamente en las siguientes etapas:

1. Suavizar la imagen con un filtro Gaussiano estándar.

2. Calcular el gradiente de la imagen suavizada.

El método basado en el gradiente fue inicialmente empleado en [2] y posteriormente adoptado por un gran número de investigadores [3],[4],[5],[26]. Las orientaciones elementales en la imagen se encuentran dadas por el vector del gradiente  $\left[ G_x(n_1, n_2), G_y(n_1, n_2) \right]^T$ , el cual es definido como:

$$\begin{bmatrix} G_x(n_1, n_2) \\ G_y(n_1, n_2) \end{bmatrix} = \text{sign}(G_x) \nabla I(n_1, n_2) \quad (5.4)$$

En donde  $I(n_1, n_2)$  representa la imagen en escala de grises. El primer elemento del vector gradiente ha sido seleccionado por ser siempre positivo, la razón para seleccionar esto es que en el CD es perpendicular al gradiente en donde direcciones opuestas indican orientaciones equivalentes.

3. Encontrar el ángulo de orientación local  $\theta_\alpha$  en la ventana o block  $\alpha$  de tamaño  $W$  usando la siguiente fórmula:

$$\theta_\alpha = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left( \frac{\sum_{i=1}^W \sum_{j=1}^W 2G_x(n_1, n_2)G_y(n_1, n_2)}{\sum_{i=1}^W \sum_{j=1}^W (G_x^2(n_1, n_2) - G_y^2(n_1, n_2))} \right) \quad (5.5)$$

4. Estimar la orientación local promedio sobre una pequeña vecindad.

Los gradientes no pueden ser directamente promediados en algunas vecindades locales a partir del vector del gradiente opuesto ya que entonces se cancelarían unos con otros, aunque esto indique la misma orientación de las rugosidades. Esto provoca que de inmediato las estructuras de las rugosidades locales se mantengan sin cambio cuando son rotadas 180 grados. A partir de que las orientaciones del gradiente son distribuidas en un espacio cíclico variando de 0 a  $\pi$ , encontrándose la orientación promedio, otra formulación de este problema es mediante el cálculo del “ciclo  $\pi$  - periódico principal”. La solución a este problema se propone mediante el doblamiento de ángulos del gradiente antes de promediarlos. Después del doblamiento de ángulos, los vectores del

gradiente apuntaran en la misma dirección y entonces se reforzaran uno con otro mientras que los gradientes perpendiculares se cancelaran.

Después de promediar el vector de los gradientes se convierte este nuevamente a su representación de un solo ángulo. La orientación de las rugosidades es entonces perpendicular a la dirección promedio del vector del gradiente.

5. Calcular la medida de coherencia del patrón, la cual se define como:

$$\rho = G(n'_0, n'_0) \frac{\sum_{(i,j) \in W} \|G(n_i, n_j) \cos(\theta(n'_0, n'_0) - \theta(n_i, n_j))\|}{\sum_{(i,j) \in W} G(n_i, n_j)} \quad (5.6)$$

Aquí  $n'_0$  es un píxel arbitrario dentro de la ventana  $W$ , normalmente al centro de esta. Este ha sido propuesto para usar el cuadrado de los gradientes y calcular la orientación. La coherencia, mide que tan bien el cuadrado de los vectores del gradiente comparten la misma orientación, si todos ellos son totalmente paralelos unos con otros, la medida de coherencia ideal es 1 y si estos se encuentran distribuidos uniformemente sobre todas las direcciones la coherencia es 0. En nuestro caso siempre nos encontramos alrededor del valor de 1 para la coherencia.

Obtenemos el Campo Direccional de las rugosidades contenidas en las imágenes de las huellas dactilares, tal y como se observa en las siguientes figuras:

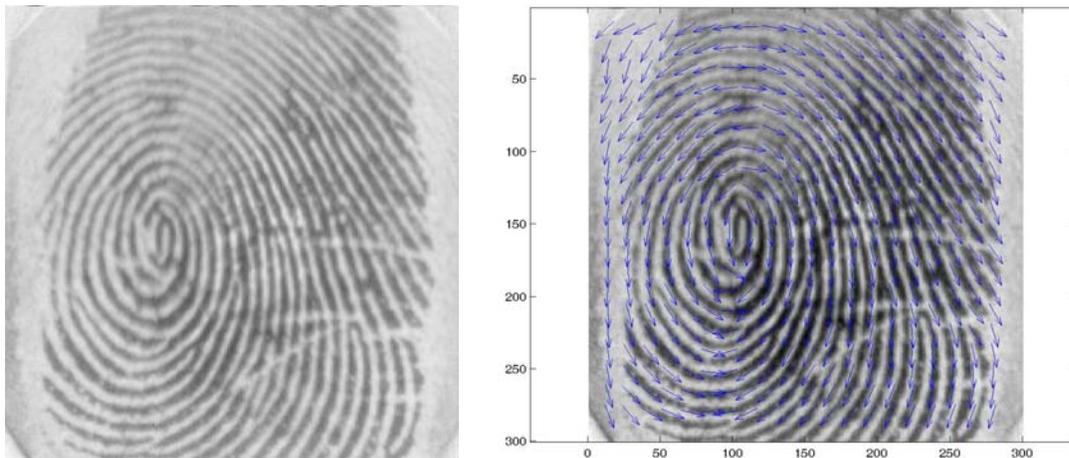
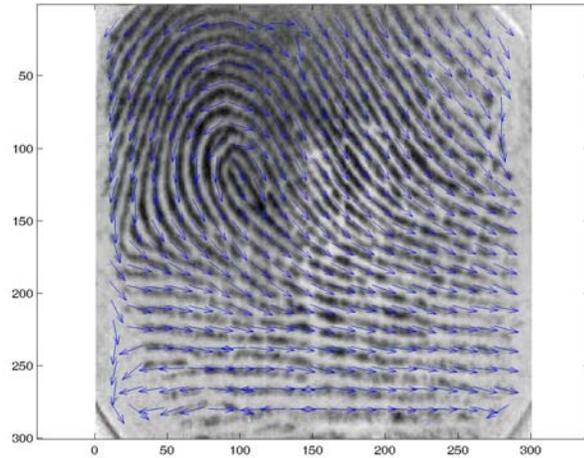
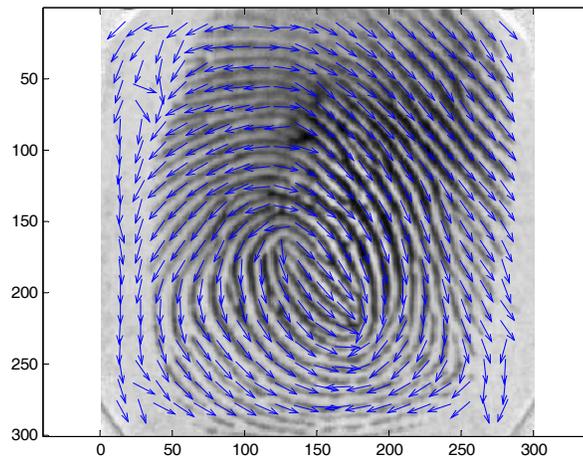


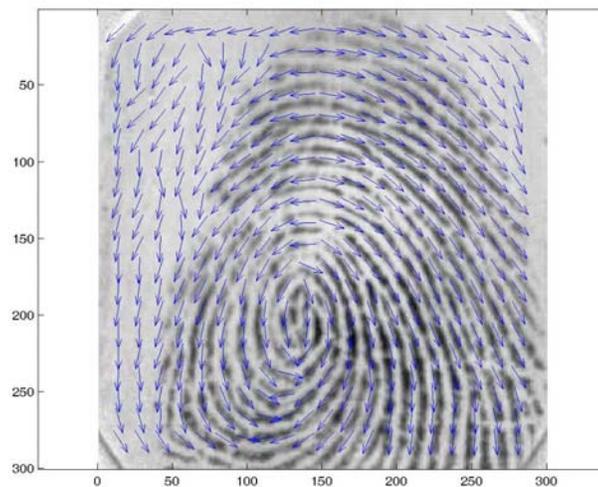
Figura 5.1 Campo direccional de las rugosidades contenidas en la imagen de la huella dactilar 1.



**Figura 5.2** Campo direccional de las rugosidades contenidas en la imagen de la huella dactilar 2.



**Figura 5.3** Campo direccional de las rugosidades contenidas en la imagen de la huella dactilar 3.



**Figura 5.4** Campo direccional de las rugosidades contenidas en la imagen de la huella dactilar 4.

Una vez obtenidos los ángulos en la orientación de las rugosidades procedemos a generar la mascara anisotrópica.

## 6. Generar la mascara patrón.

El modelo más simple de Reacción-difusión asume que la difusión ocurre en un rango uniforme en todas las direcciones y posiciones posibles. El relajar esta restricción nos permite hacer posible producir un amplio rango de patrones mediante el empleo de una mascara anisotrópica, la cual básicamente es una generalización del caso isotrópico y se escribe de la siguiente forma:

$$\mu \begin{pmatrix} -D_{xy} & 2D_{yy} & D_{xy} \\ 2D_{xx} & -4(D_{xx} + D_{yy}) & 2D_{xx} \\ D_{xy} & 2D_{yy} & -D_{xy} \end{pmatrix}$$

En donde el grupo de variables quedan definidas por:

$$\begin{aligned} D_{xx} &= a_1^2 \cos^2 \theta + a_2^2 \sin^2 \theta & D_{xy} &= (a_2^2 - a_1^2) \cos \theta \sin \theta \\ D_{yx} &= (a_2^2 - a_1^2) \cos \theta \sin \theta & D_{yy} &= a_2^2 \cos^2 \theta + a_1^2 \sin^2 \theta \end{aligned} \quad (5.7)$$

Siendo  $\theta_\alpha$  el ángulo de orientación local,  $a_1$  el rango de difusión en la dirección principal  $[-\sin \theta, \cos \theta]$ ,  $a_2$  es el rango de difusión en la dirección principal  $[\cos \theta, \sin \theta]$ , y  $\mu$  una constante de espacio.

Las magnitudes del gradiente estimadas en la imagen original de la huella dactilar puede además ser usada como el argumento de una función edge-stopping para el cálculo de los coeficientes de difusión. La difusión es entonces llevada a cabo usando los coeficientes previamente calculados como  $a_1$  y  $a_2$ .

El carácter de procesamiento adaptativo de la DRD puede ser visto con facilidad como un paradigma, ya que en un determinado rango de frecuencia espacial es sensible a la generación de una estructura de tipo lineal. La frecuencia generada actual y más aun la orientación de la estructura no son establecidas por el sistema sino más bien por la imagen de entrada, y pueden variar adaptativamente sobre la imagen. Este procesamiento esta pensado para procesarse en dos etapas. En la primera se detecta la

frecuencia de la línea dominante y la orientación sobre la imagen completa, de la cual se obtienen los patrones primarios de crecimiento en regiones en donde la línea tiene un alto contraste y un bajo nivel de ruido. La segunda etapa es la fase subsiguiente de evolución para el consenso, donde los detalles faltantes son incluidos. Por supuesto esta división de serie no se encuentra bien definida en la práctica, ya que los dos procesos suceden en paralelo y de forma continua durante todo el proceso sobre la imagen. Existen patrones de evolución a gran escala temporal, los cuales se observan directamente en las simulaciones, y que se encuentran asociados con la evolución generada en los extremos de línea, dislocaciones y otros defectos.

A continuación se muestran los pseudocodigos de los programas empleados para calcular tanto la orientación del campo como la dinámica de la reacción-difusión digital. Es importante recalcar que estos programas fueron desarrollados en Matlab versión 6.5 y se encuentran estructurados de la siguiente manera:

#### **Programa que determina el ángulo de la orientación del campo de rugosidades.**

Este programa consta de cuatro archivos uno de ellos es el cuerpo principal del programa y los otros tres son funciones que se invocan en el mismo.

##### **%Cuerpo principal.- determinación del ángulo de la orientación del campo.**

```
x1=imread('fn2.jpg');
y=double(x1)
y=y(:,:,1);
x=y;
mn = min(min(x));
mx = max(max(x));
im = (x-mn)/(mx-mn);
end
% Identify ridge-like regions and normalise image
blksze = 15; thresh = 0.1;
[normim, mask] = ridgesegment(im, blksze, thresh);
%show(normim,1);
% Determine ridge orientations
[orientim, reliability] = ridgeorient(normim, 1, 5, 5);
[s_orient, u, v] = plotridgeorient(orientim, 14, im, 2);
%show(reliability,6)
```

### **%Archivo de la funcion ridgesegment**

```
function [normim, mask, maskind] = ridgesegment(im, blksize, thresh);  
% im = normalise(im,0,1); % normalise to have zero mean, unit std dev  
fun = inline('std(x(:))*ones(size(x))');  
stddevim = blkproc(im, [blksize blksize], fun);  
mask = stddevim > thresh;  
maskind = find(mask);  
% Renormalise image so that the "ridge regions" have zero mean, unit  
% standard deviation.  
im = im - mean(im(maskind));  
normim = im/std(im(maskind));
```

### **%Archivo de la funcion ridgeorient**

```
function [orientim, reliability] = ...  
    ridgeorient(im, gradientsigma, blocksigma, orientsmoothsigma);  
[rows,cols] = size(im);  
% Calculate image gradients.  
sze = fix(6*gradientsigma); if ~mod(sze,2); sze = sze+1; end  
f = fspecial('gaussian', sze, gradientsigma); % Generate Gaussian filter.  
[fx,fy] = gradient(f); % Gradient of Gaussian.  
Gx = filter2(fx, im); % Gradient of the image in x  
Gy = filter2(fy, im); % ... and y  
% Estimate the local ridge orientation at each point by finding the  
Gxx = Gx.^2; % Covariance data for the image gradients  
Gxy = Gx.*Gy;  
Gyy = Gy.^2;  
sze = fix(6*blocksigma); if ~mod(sze,2); sze = sze+1; end  
f = fspecial('gaussian', sze, blocksigma);  
Gxx = filter2(f, Gxx);  
Gxy = 2*filter2(f, Gxy);  
Gyy = filter2(f, Gyy);  
% Analytic solution of principal direction  
denom = sqrt(Gxy.^2 + (Gxx - Gyy).^2) + eps;  
sin2theta = Gxy./denom; % Sine and cosine of doubled angles  
cos2theta = (Gxx-Gyy)./denom;  
sze = fix(6*orientsmoothsigma); if ~mod(sze,2); sze = sze+1; end  
f = fspecial('gaussian', sze, orientsmoothsigma);  
cos2theta = filter2(f, cos2theta); % Smoothed sine and cosine of  
sin2theta = filter2(f, sin2theta); % doubled angles
```

```

orientim = pi/2 + atan2(sin2theta,cos2theta)/2;
Imin = (Gyy+Gxx)/2 - (Gxx-Gyy).*cos2theta/2 - Gxy.*sin2theta/2;
Imax = Gyy+Gxx - Imin;
reliability = 1 - Imin./(Imax+.001);
reliability = reliability.*(denom>.001);

```

**%Archivo de la funcion plotridgeorient**

```

function [s_orient, u, v] = plotridgeorient(orient, spacing, im, figno);
[rows, cols] = size(orient);
lw = 2;          % linewidth
len = 0.8*spacing; % length of orientation lines
% Subsample the orientation data according to the specified spacing
s_orient = orient(spacing:spacing:rows-spacing, ...
                  spacing:spacing:cols-spacing);
xoff = len/2*cos(s_orient);
yoff = len/2*sin(s_orient);
if nargin >= 3 % Display fingerprint image
    if nargin == 4
        imagesc(im);colormap(gray); hold on
    else
        imagesc(im); colormap(gray);hold on
    end
end
% Determine placement of orientation vectors
[x,y] = meshgrid(spacing:spacing:cols-spacing, ...
                 spacing:spacing:rows-spacing);
x = x-xoff;
y = y-yoff;
% Orientation vectors
u = xoff*2;
v = yoff*2;
quiver(x,y,u,v);
axis equal, axis ij, hold off

```

### Programa que ejecuta la dinámica de la reacción-difusión digital.

Este programa se encuentra desarrollado en dos bloques uno de ellos el cuerpo principal y el otro el programa anteriormente descrito que calcula el ángulo de la orientación del campo.

#### %Archivo del cuerpo principal de la dinámica de reacción-difusión.

```
N=298;
a1=0.8;
a2=1.2;
k1=2; k2=4;
D1=.006; D2=.05;
T0=0.01; T1= 0.6863; T2=0.5759;
i=imread('fn6.jpg');
y=(3*double(i))/256;
y=y(:,1);
x1=y;
x2= ones(N+2,N+2)*2;
for i= 1:100
for j=1:1
x1(2:N+1,1:1)=x1(2:N+1,3:3);
x1(2:N+1,N+2:N+2) = x1(2:N+1,N:N);
x1(1:1,2:N+1)=x1(3:3,2:N+1);
x1(N+2:N+2,2:N+1)=x1(N:N,2:N+1);
x2(2:N+1,1:1)= x2(2:N+1,3:3);
x2(2:N+1,N+2:N+2)=x2(2:N+1,N:N);
x2(1:1,2:N+1)=x2(3:3,2:N+1);
x2(N+2:N+2,2:N+1)=x2(N:N,2:N+1);
R1 =T0*(k1-(k2+1)*x1+x1.^2.*x2);
R2= T0*(k2*x1-x1.^2.*x2);
% make mask m for convolution
[h,w]= size(s_orient);
for i=1:h
for j=1:w
H(i,j) = s_orient(i,j);
a11=((a1^2)*(cos(H(i,j)))^2)+((a2^2)*(sin(H(i,j)))^2); %ok
a12=((a2^2)-(a1^2))*(cos(H(i,j))*sin(H(i,j))); %ok
a21=((a2^2)-(a1^2))*((cos(H(i,j)))*(sin(H(i,j)))); %ok
a22=((a2^2)*((cos(H(i,j)))^2)+((a1^2)*((sin(H(i,j)))^2));%ok
%%m=[-a12*10 2*a22 a12*10;2*a11 -4*(a11+a22) 2*a11;a12*10 2*a22 -a12*10];
% m=[0 2*a22 0;2*a11 -4*(a11+a22) 2*a11;0 2*a22 0];
```

```

% m(:, :, i, j) = [-a12*2 2*a22 a12*2; 2*a11 -4*(a11+a22) 2*a11; a12*2 2*a22 -a12*2];
m(:, :, i, j) = [-a12 2*a22 a12; 2*a11 -4*(a11+a22) 2*a11; a12 2*a22 -a12];
end
x1 = x1 + R1 + D1 * imfilter(x1, m, 'conv');
x2 = x2 + R2 + D2 * imfilter(x2, m, 'conv');
end
% End of mask
end
pause
figure, imagesc(x1(2:N+1, 2:N+1), [k1-1 k1+1]);
colormap(gray);
end

```

En las figuras 5.6, 5.7 y 5.8 mostramos algunos ejemplos de las imágenes obtenidas mediante la aplicación del DRD adaptativo basado en la reacción cinética del Bruselador, cabe hacer mención que diversos valores en los parámetros fueron probados, observando que en base a los valores de los parámetros elegidos se generan fuertes variaciones en la calidad de las imágenes tratadas, obteniendo resultados satisfactorios para todos los casos entre las iteraciones número 15 a 20. Asignando para cada imagen obtenida un valor específico que puede variar de 1 a 4 y que depende directamente de la calidad de la misma, asignando el número 1 a las imágenes de mala calidad y el número 4 a las de muy buena calidad.

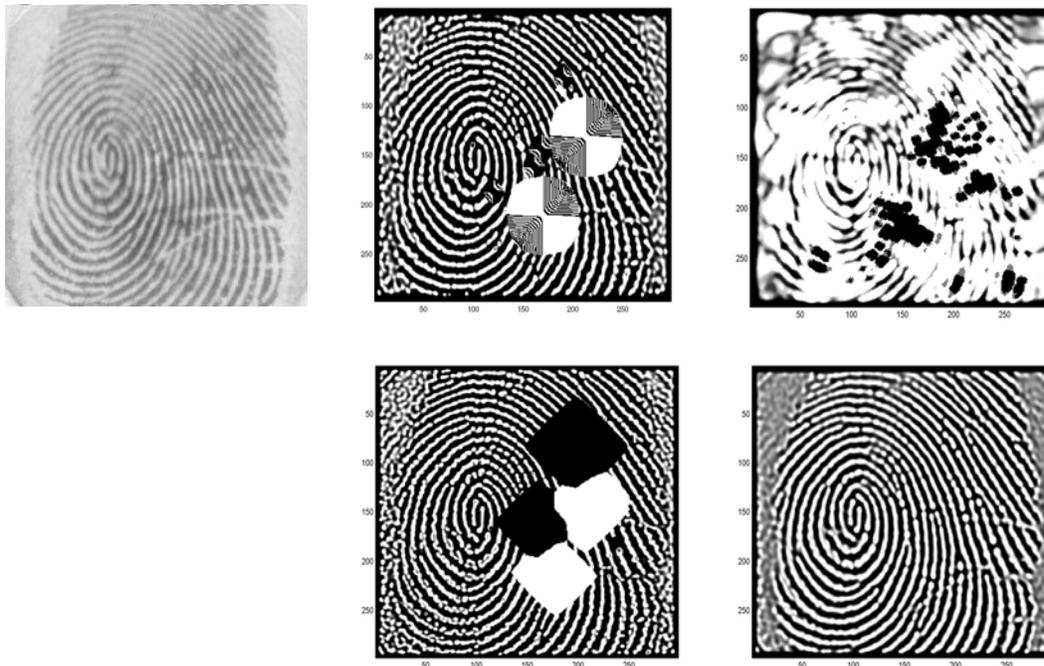


Figura 5.5 Imágenes resultantes de la aplicación del DRD adaptativo en la huella dactilar 1.

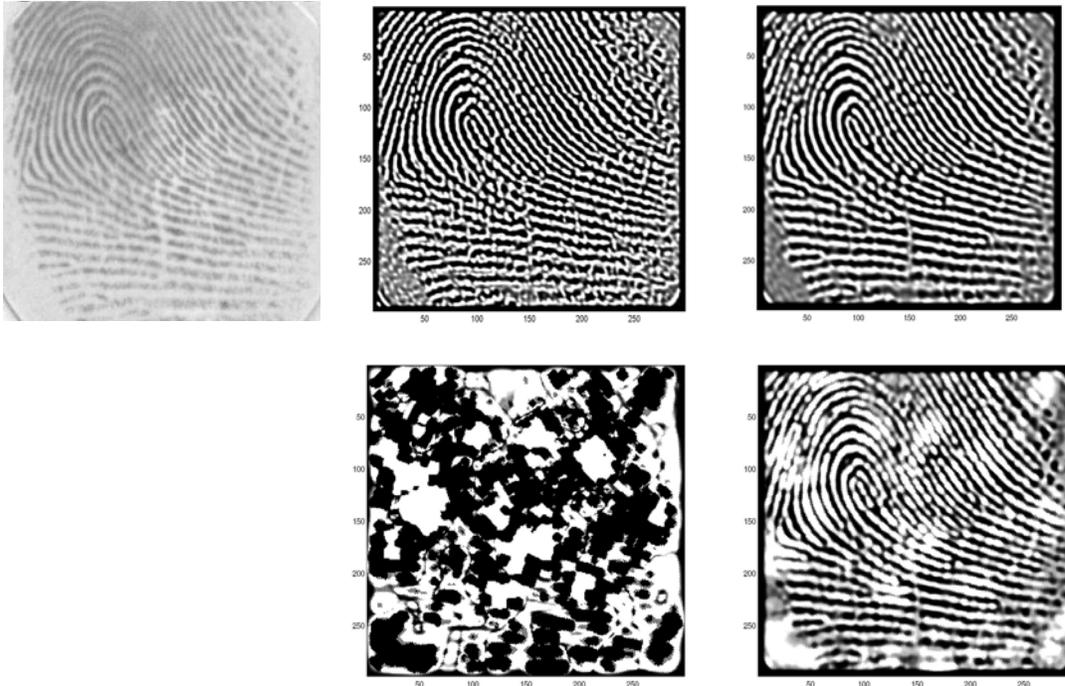


Figura 5.6 Imágenes resultantes de la aplicación del DRD adaptativo en la huella dactilar 2.

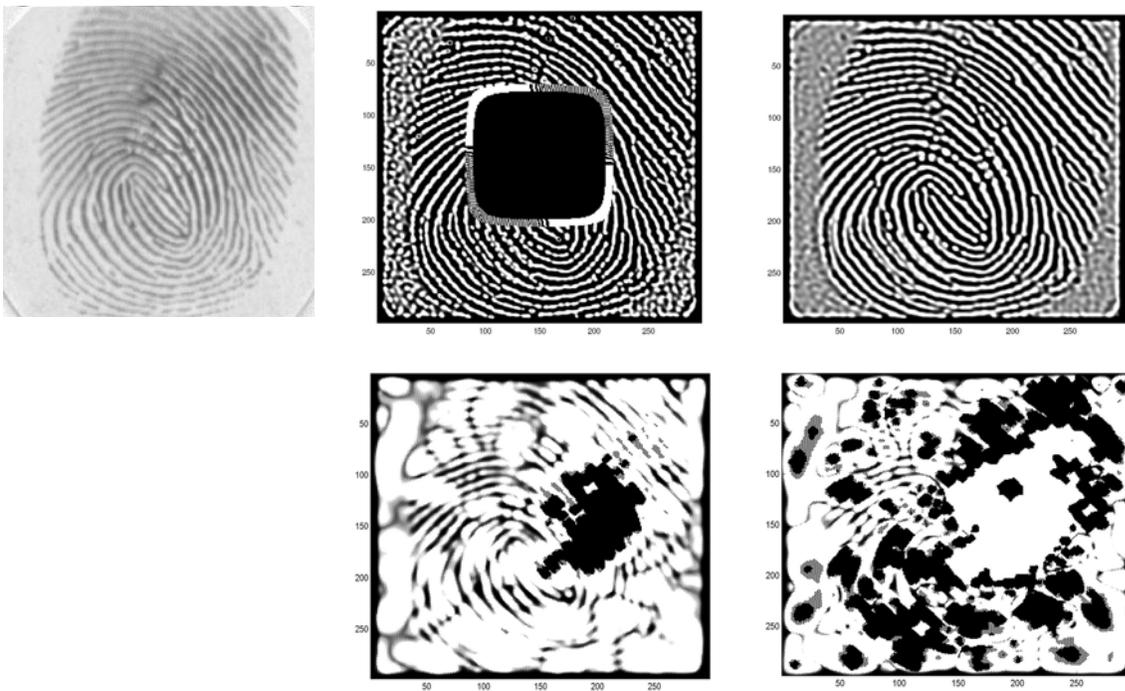
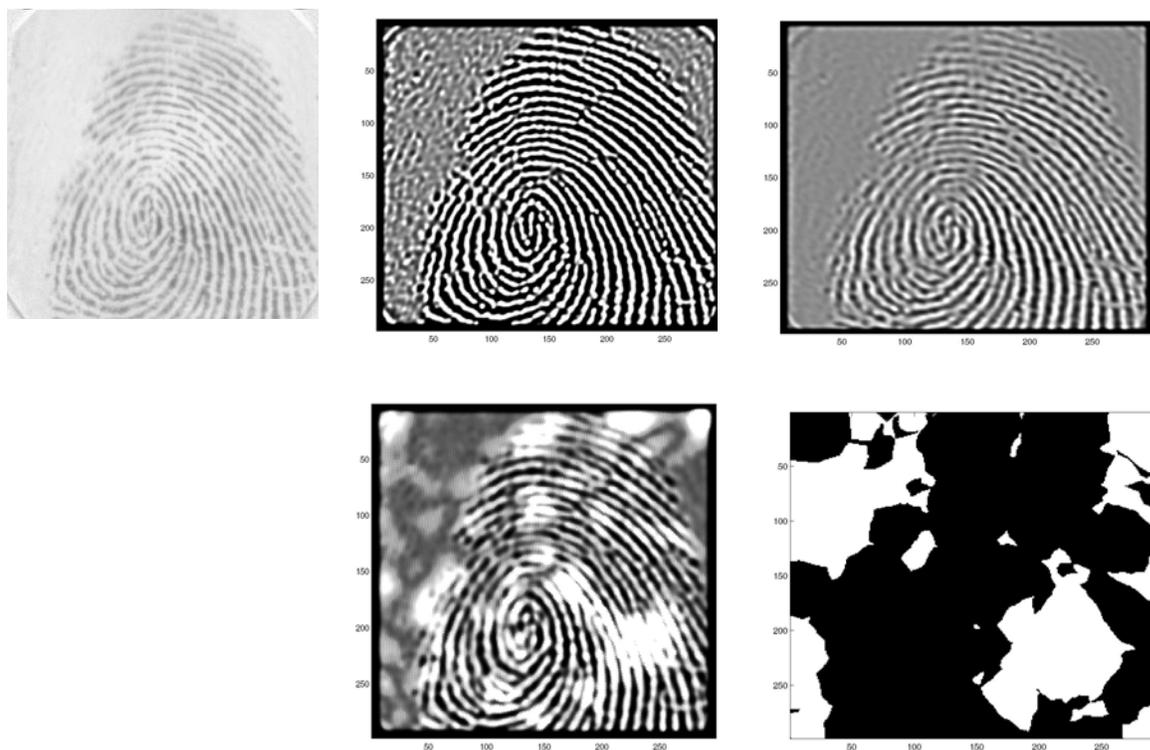


Figura 5.7 Imágenes resultantes de la aplicación del DRD adaptativo en la huella dactilar 3.



**Figura 5.8** Imágenes resultantes de la aplicación del DRD adaptativo en la huella dactilar 4.

Es importante señalar que se efectuaron un total de 81 experimentos para cada imagen de huella dactilar en donde la asignación de los valores en los parámetros involucrados varían dentro de los siguientes rangos:

- a) Los coeficientes de difusión  $D_1$  y  $D_2$  tienen asignados valores que para el caso de  $D_1$  van de 0.009 a 0.006 y para el caso de  $D_2$  de 0.09 a 0.05, valores que se permutan entre ellos formando 9 posibles ordenaciones.
- b) Para el caso de los rangos de difusión  $A_1$  y  $A_2$  los valores se encuentran comprendidos entre 0.8 y 1.2, esto para ambas variables por lo que efectuando sus posibles ordenaciones se obtienen de nueva cuenta 9 grupos que permutados con los otros 9 de los coeficientes de difusión ( $D_1$  y  $D_2$ ) obtenemos los 81 experimentos resultantes.
- c) Las constantes cinéticas  $k_1$  y  $k_2$  poseen valores que se fijan en 2 y 4 respectivamente para cada uno de los 81 experimentos.
- d) En los factores de tiempo y espacio  $T_0, T_1, T_2$  los valores se fijan en 0.01, 0.6863 y 0.5759 respectivamente de nueva cuenta para cada uno de los 81 experimentos.

Lo anterior se puede visualizar en las tablas que se encuentran en el CD anexo.

El desarrollo de los experimentos se efectuó mediante una computadora Intel Pentium D@2.8Ghz con 1024 Mb de memoria RAM, en donde el desempeño en la ejecución de los experimentos fue de la siguiente forma:

a) tiempo por iteración; 2 minutos 10 segundos, b) tiempo por experimento; 32 minutos 30 segundos, c) tiempo por huella dactilar; 43 horas 50 minutos (total de 81 casos).

Una vez efectuados los 81 experimentos en cada imagen de las huellas dactilares (324 en total) se procedió a obtener las superficies de respuesta de los resultados generados de la DRD, esto con la finalidad de observar su comportamiento, obteniendo de esta forma una serie de 36 gráficas que se muestran a continuación.

Como ejemplo se muestran las gráficas en donde se observa el comportamiento de las imágenes obtenidas a partir de la huella dactilar 1.

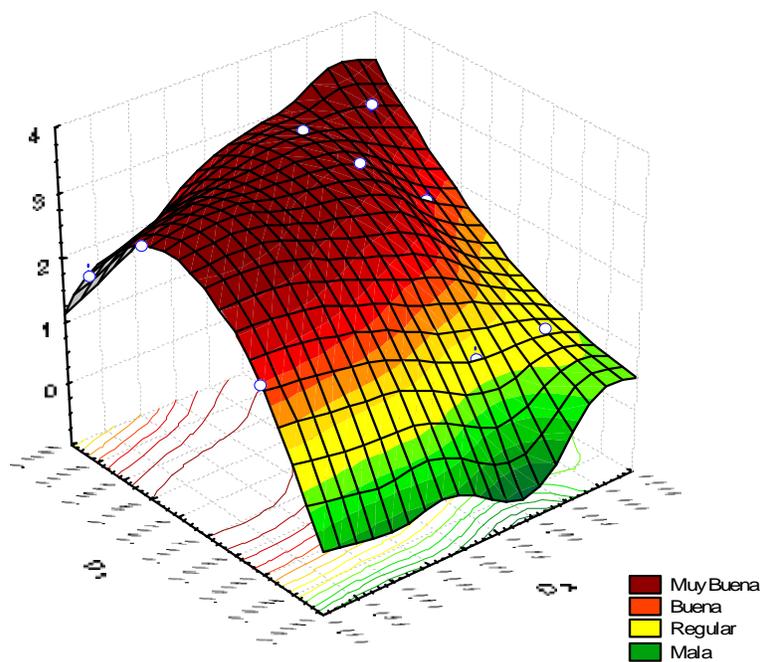


Figura 5.9 Superficie de respuesta para el DRD adaptativo con  $A_1 = 1.2, A_2 = 0.8$ .

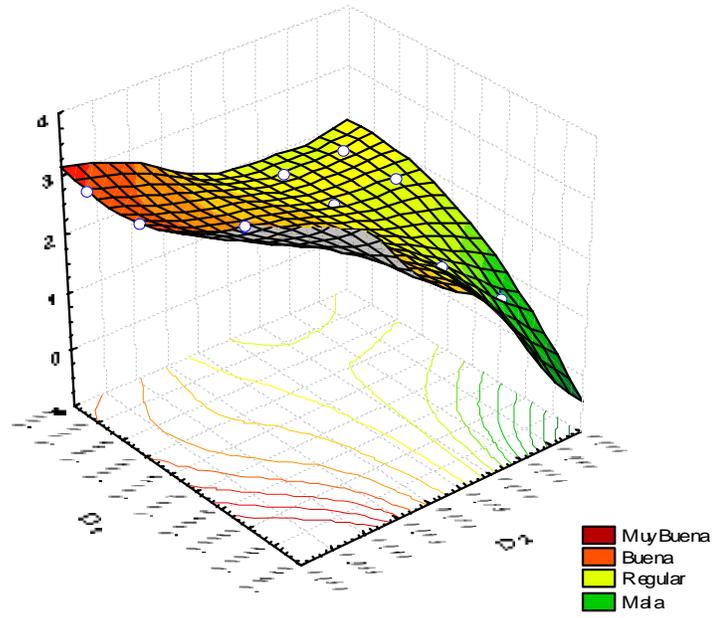


Figura 5.10 Superficie de respuesta para el DRD adaptativo con  $A_1 = 1.2, A_2 = 1.0$ .

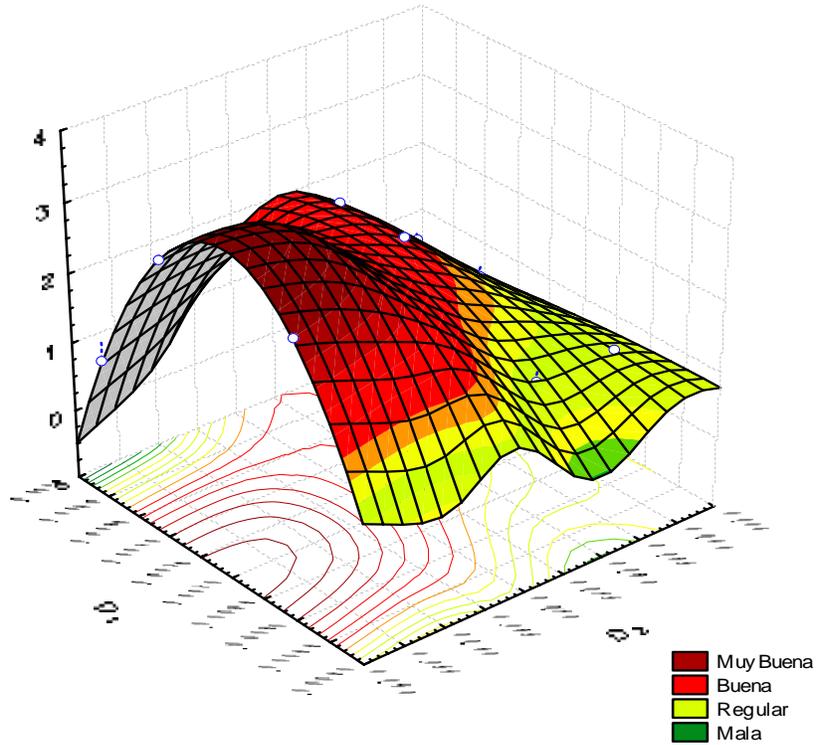


Figura 5.11 Superficie de respuesta para el DRD adaptativo con  $A_1 = 1.2, A_2 = 1.2$ .

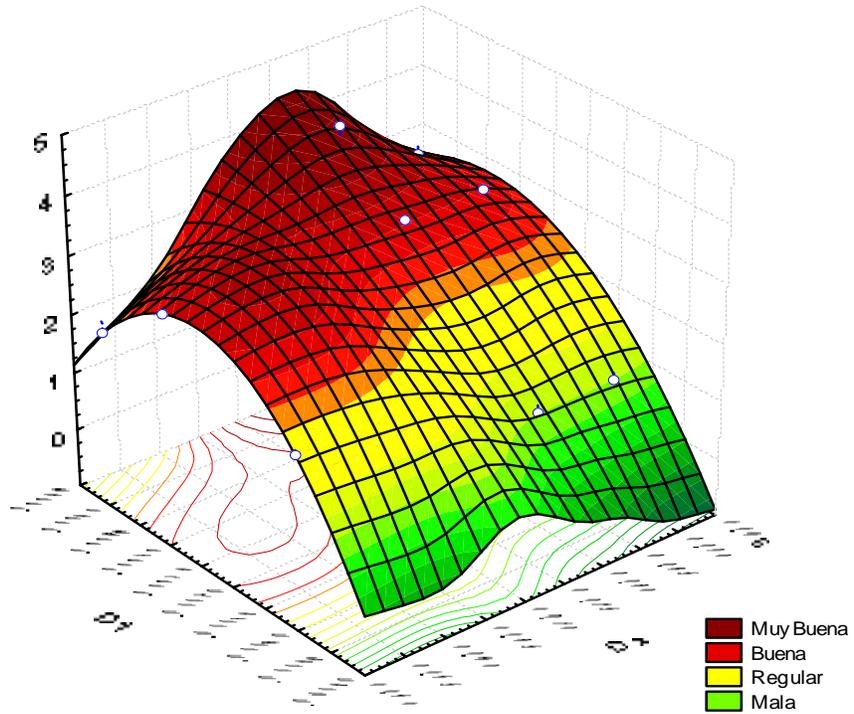


Figura 5.12 Superficie de respuesta para el DRD adaptativo con  $A_1 = 1.0, A_2 = 0.8$ .

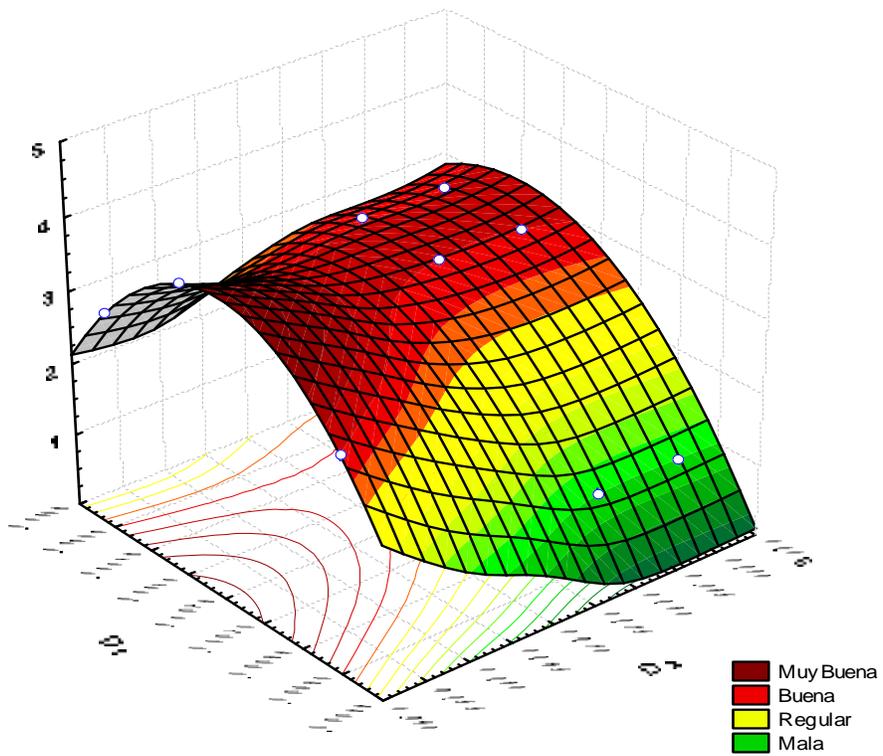


Figura 5.13 Superficie de respuesta para el DRD adaptativo con  $A_1 = 1.0, A_2 = 1.0$ .

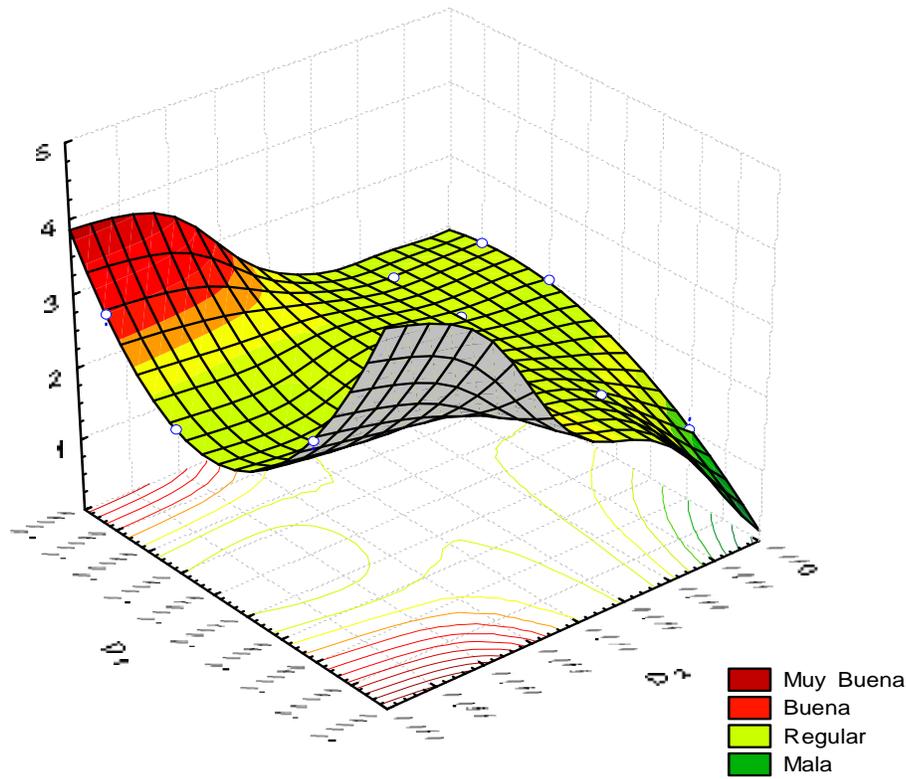


Figura 5.14 Superficie de respuesta para el DRD adaptativo con  $A_1 = 1.0, A_2 = 1.2$ .

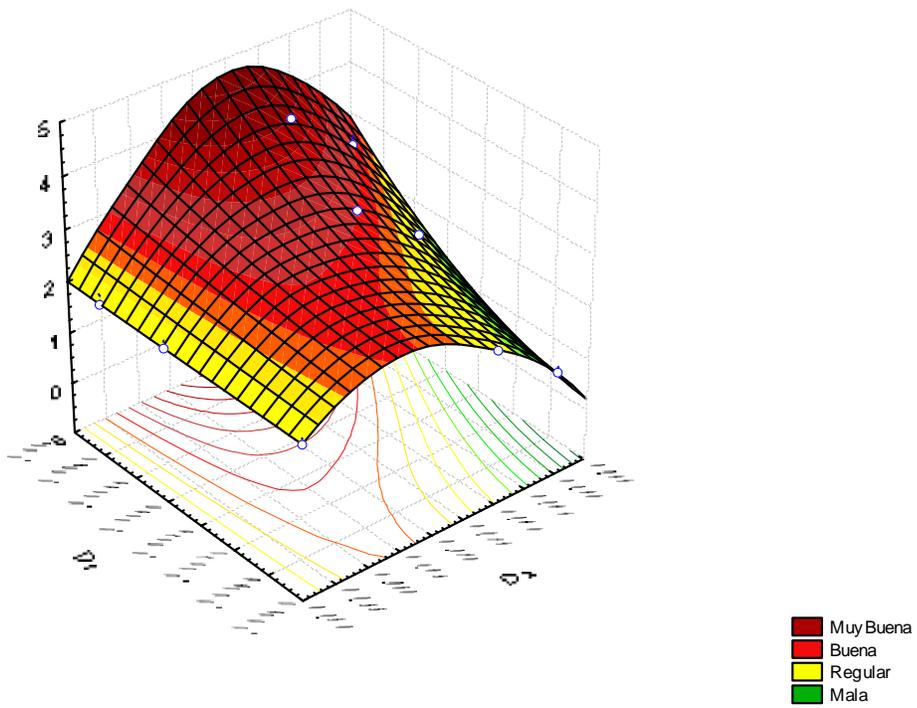


Figura 5.15 Superficie de respuesta para el DRD adaptativo con  $A_1 = 0.8, A_2 = 0.8$ .

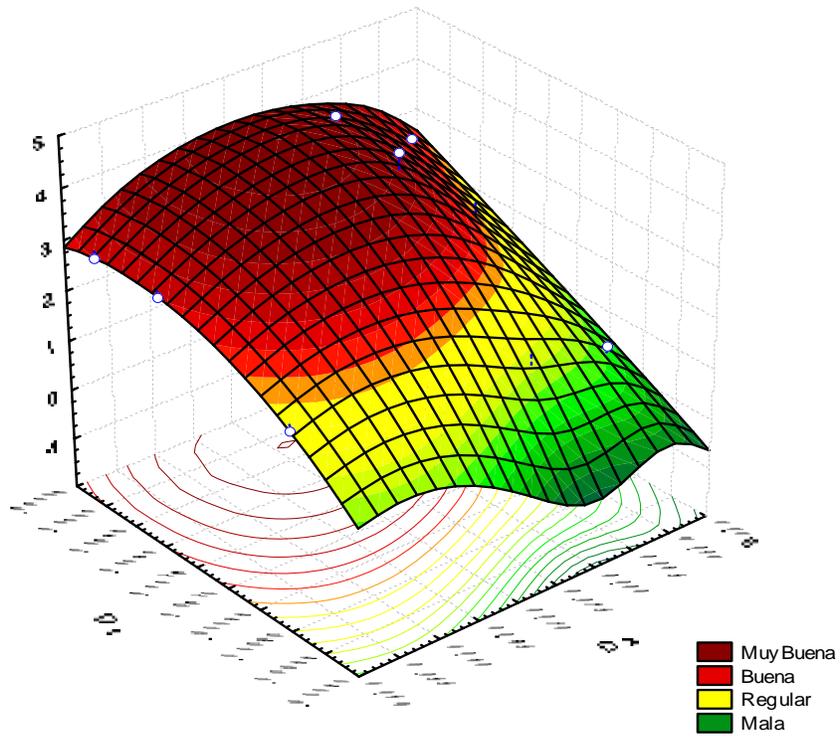


Figura 5.16 Superficie de respuesta para el DRD adaptativo con  $A_1 = 0.8, A_2 = 1.0$ .

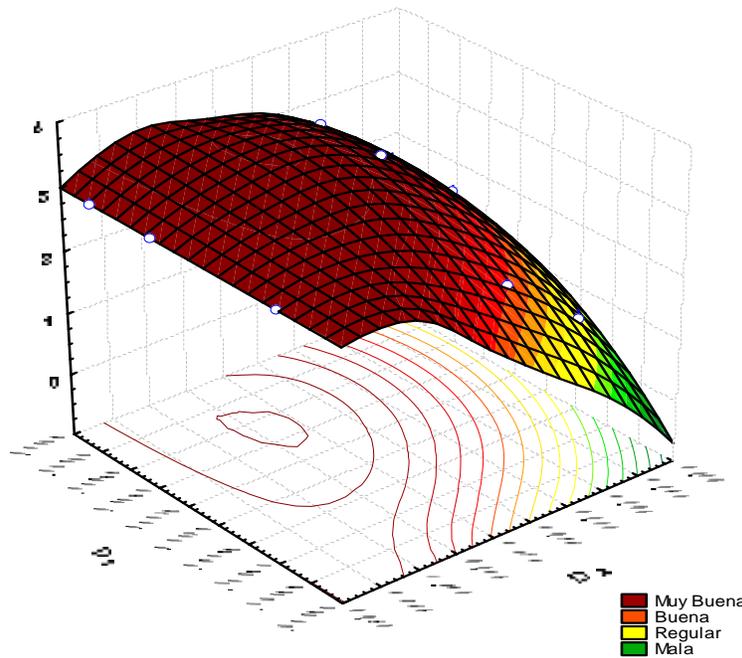


Figura 5.17 Superficie de respuesta para el DRD adaptativo con  $A_1 = 0.8, A_2 = 1.2$ .

## 5.2 DESCRIPTORES DE HUELLAS DACTILARES.

Los algoritmos de identificación de huellas dactilares nos llevan a estudiar los problemas de correspondencia. La mayoría de los algoritmos de extracción de minucias asocian a estas con tres características específicas. Dado que la transformación relativa entre dos huellas dactilares es de antemano desconocida, la correspondencia entre minucias es muy ambigua y cada minucia de una huella dactilar puede estar asociada con cualquier minucia de otra huella dactilar. Con la finalidad de reducir esta ambigüedad, información distintiva adicional puede ser adjuntada a cada minucia. Tal información adicional generalmente lleva el nombre de descriptor.

En este trabajo de tesis proponemos un descriptor de huellas dactilares que se encuentra basado en una DRD asociada a cada imagen.

Algunos métodos de clasificación de huellas dactilares produce, para cada descriptor un código en donde el patrón de la huella dactilar es transformado y representado dentro de una superficie tridimensional teniendo el eje coordenado  $Z$  un valor que depende de la frecuencia de aparición de las líneas que forman las rugosidades de un conjunto específico que se encuentra representado por los ejes coordenados  $x$  e  $y$ , y que toman su origen de las múltiples posiciones que aparecen sobre la parte descrita de las impresiones de la huella dactilar.

La elaboración de nuestro código se basa en la parametrización de la DRD cuyos parámetros nos llevan a obtener los códigos del descriptor que se emplearán en el realce e identificación de huellas dactilares. Este enfoque puede dar fundamentos útiles para el diseño de nuevos algoritmos de procesamiento de imágenes y texturas inspiradas en los patrones que aparecen en la naturaleza.

Mediante el empleo de diversos valores en los parámetros involucrados en el descriptor DRD intentamos explorar los efectos obtenidos en las imágenes realzadas, valores que constituyen el vector  $(A_1, A_2, D_1, D_2)$  que define la dinámica de la reacción difusión en la imagen realzada siendo de facto este ya un descriptor de una imagen. De este modo tenemos 364 descriptores vectoriales derivados a partir de nuestros experimentos.

En búsqueda de un descriptor escalar, efectuamos un análisis estadístico y determinamos el mejor ajuste polinomial para superficies definidas de nueve puntos en 81 diferentes grupos de parámetros  $(A_1, A_2, D_1, D_2)$ , en donde encontramos que para los 81 casos, el mejor polinomio de ajuste es de tipo cuadrático y se encuentra definido por:

(5.8)

$$z_0(A_1, A_2) + z_{D_1}(A_1, A_2)D_1 + z_{D_2}(A_1, A_2)D_2 + z_{D_1D_2}(A_1, A_2)D_1D_2 + z_{D_1^2}(A_1, A_2)D_1^2 + z_{D_2^2}(A_1, A_2)D_2^2$$

En donde  $z_\Gamma(A_1, A_2)$  (para  $\Gamma = 0, D_1, D_2, D_1D_2, D_1^2, D_2^2$ ) son funciones cuadráticas de  $A_2$  para  $A_1$  fijo; esto es.

$$z_\Gamma(A_1, A_2) = z_0(A_1) + z_{A_2}(A_1)A_2 + z_{A_2^2}(A_1)A_2^2.$$

Siendo  $z_\Gamma(A_1)$  (para  $\Gamma = 0, A_2, A_2^2$ ) funciones cuadráticas de  $A_1$ .

Obteniendo para las nueve opciones de cada huella dactilar por cada iteración del algoritmo DRD las siguientes ecuaciones. Ver ejemplo en pagina 92. Figuras 5.9 – 5.17.

### Ecuaciones obtenidas para la huella dactilar 1.

Caso 1:  $A_1 = 1.2, A_2 = 0.8$

$$z = -7.5971 - 13.8278D_1 + 2609.2796D_2 - 833.3333D_1^2 + 15934.0659D_1D_2 - 2.2222E5D_2^2$$

Caso 2:  $A_1 = 1.2, A_2 = 1.0$

$$z = 15.9341 - 206.9292D_1 - 1208.7912D_2 + 277.7778D_1^2 + 16483.5165D_1D_2 + 4.2342E - 7D_2^2$$

Caso 3:  $A_1 = 1.2, A_2 = 1.2$

$$z = -5.1392 - 16.7888D_1 + 2725.8852D_2 - 1111.1111D_1^2 + 18131.8681D_1D_2 - 2.7778E5D_2^2$$

Caso 4:  $A_1 = 1.0, A_2 = 0.8$

$$z = -11.1447 + 6.0134D_1 + 3291.8193D_2 - 1111.1111D_1^2 + 19505.4945D_1D_2 - 2.7778E5D_2^2$$

Caso 5:  $A_1 = 1.0, A_2 = 1.0$

$$z = -6.6026 - 274.359D_1 + 5008.547D_2 + 833.3333D_1^2 + 17307.6923D_1D_2 - 3.8889E5D_2^2$$

Caso 6:  $A_1 = 1.0, A_2 = 1.2$

$$z = 12.8315 - 53.5104D_1 - 2200.2442D_2 - 277.7778D_1^2 + 8791.2088D_1D_2 + 1.1111E5D_2^2$$

Caso 7:  $A_1 = 0.8, A_2 = 0.8$

$$z = -0.6026 + 333.9744D_1 - 2491.453D_2 - 3333.33D_1^2 + 17307.6923D_1D_2 + 1.11E5D_2^2$$

Caso 8:  $A_1 = 0.8, A_2 = 1.0$

$$z = -17.044 + 287.9731D_1 + 2360.8059D_2 - 2777.7778D_1^2 + 10989.011D_1D_2 - 1.6667E5D_2^2$$

Caso 9:  $A_1 = 0.8, A_2 = 1.2$

$$z = -7.7051 + 204.0598D_1 + 1183.7607D_2 - 2222.2222D_1^2 + 9615.3846D_1D_2 - 1.11E5D_2^2$$

Una vez calculadas las 36 ecuaciones se determinaron sus respectivos discriminantes, los cuales como se menciono al inicio de esta sección proponemos como un descriptor escalar de huellas dactilares.

Mostrando finalmente en la Tabla 5.1 un resumen de los análisis que se efectuaron sobre las cuatro huellas dactilares en donde se observa claramente que el número y tipo de minucias y la calidad de la imagen original afectan el comportamiento de las imágenes producidas por el DRD; como un ejemplo, entre mayor número de minucias tenga la huella dactilar, mas alto es el valor del discriminante.

HUELLAS DACTILARES				
Terminaciones	8	29	22	19
Bifurcaciones	33	20	33	25
Cores	1	1	1	1
Deltas	0	1	1	0
Discriminantes	Discriminante	Discriminante	Discriminante	Discriminante
Promedio	1569875	507190.9	3296948	-1835240
Mediana	442346.9	2021469	2858324	-365272
Desviación Estándar	4798584	6734162	3041609	3277892
Valor Máximo	12620907	7764228	9972964	1489049
Varianza	2.302641E+13	4.534893E+13	9.251386E+12	1.074457E+13

Tabla 5.1.- Huellas dactilares, minucias correspondientes y características estadísticas de la RDD basada en el Bruselador, discriminantes polinomiales de los descriptores de huellas dactilares.

## REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.

1. Ito K., Aoki T., Higuchi T., "*Digital reaction-diffusion system-A foundation of bio-inspired texture image processing,*" IEICE Trans. Fundamentals, E84-A (2001), 1909-1918.
2. M. Kass and A. Witkin, Analyzing Oriented Patterns, Computer Vision, Graphics, and Image Processing, vol. 37, no. 3, pp. 362-385, Mar. 1987.
3. A.R. Rao and R.C. Jain, "Computerized Flow Field Analysis: Oriented Texture Fields, IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine: Intelligence, vol. 14, no. 7, pp. 693-709, July 1992.
4. N. Ratha, S. Chen, and A. Jain, Adaptive Flow Orientation Based Feature Extraction in Fingerprint Images, Pattern Recognition, vol. 28, pp. 1657-1672, 1995.
5. A.K. Jain, L. Hong, S. Pankanti, and R. Bolle, An Identity-Authentication System Using Fingerprints, Proc. IEEE, vol. 85, no. 9, pp. 1365-1388, Sept. 1997.
6. P. Perona, Orientation Diffusions, IEEE Trans. Image Processing, vol. 7, no. 3, pp. 457-467, Mar. 1998.

## CONCLUSIONES

Las conclusiones del presente trabajo doctoral se pueden resumir a continuación.

La singularidad de las huellas dactilares es una hipótesis en desarrollo que en el sentido matemático es difícil (más no imposible) de probar. Es más factible el demostrar lo contrario, específicamente el hecho de encontrar dos dedos idénticos. Hasta ahora no se han encontrado dos huellas dactilares idénticas que provengan de diferentes dedos.

Desde un punto de vista científico, el término singularidad es sustituido por la probabilidad de encontrar dos huellas dactilares idénticas de diferentes dedos. Además, la probabilidad de que huellas dactilares de la misma persona se presentan bajo diferentes nombres es mucho mayor.

Aunque se han descrito algunos mecanismos básicos de formación de patrones, una gran variedad de texturas pueden ser producidas mediante la variación de las condiciones iniciales y de frontera, el número de morfógenos involucrados, las constantes de velocidad para cada uno de ellos, las funciones que gobiernan las interacciones y la manera en la cual las concentraciones son mapeadas dentro de la superficie de aparición. En la presente tesis se muestran las texturas que hemos producido y se describen las opciones que llevaron a su creación.

Por ejemplo es claro que los valores absolutos de  $K_1 = k_1A$  y  $K_2 = k_2B$  son importantes en la evolución de la dinámica de la imagen de la huella dactilar. Aquí A y B son establecidas como constantes para fijar la concentración de los morfógenos A y B.

Encontrando que estas tienen relación en la formación de los patrones y la definición de la imagen, entre otros, apareciendo una gran variedad de topologías en la imagen final después de 900 iteraciones para diversos de estos valores.

Habiéndose dicho que no es posible el obtener información importante analizando el morfógeno X2 en el DRD basado en el bruselador, en este trabajo de tesis encontramos que esta información es errónea, ya que de la dinámica para cada morfógeno se obtienen diferentes calidades de imágenes mejoradas.

En las figuras 4.6 y 4.7 presentamos algunos ejemplos del DRD basado en el Oreganor. Aquí se muestra la evolución de los tres morfógenos xyz. Interesantemente esta dinámica es mucho más rápida comparada con el DRD basada en el Bruselador. En lugar de necesitar 900 iteraciones para obtener buenos resultados (como es el caso del

Bruselador) son necesarias 6 iteraciones aproximadamente. Esto debido a la bien conocida fuerza en las oscilaciones y a la duración de las inestabilidades de reacción BZ. Claramente para el caso basado en el Oreganor, el morfógeno X es el único adecuado para ser empleado en el mejoramiento de la imagen de la huella dactilar mientras que el morfógeno Y como de forma similar como X para el caso basado en el Bruselador.

Esto prueba que el desempeño de la dinámica específica no lineal de los morfógenos puede influenciar fuertemente en la implementación del DRD, al menos en el sentido de elegir la dinámica que el morfógeno ha seguir para el mejor desempeño en el realce de las huellas digitales.

Comparando las figuras 4.3 y 4.4 con las figuras 4.6 y 4.7, es fácil notar que el DRD basado en el Oreganor posee una característica importante que no es compartida con el caso del DRD basado en el Bruselador, esto es el dividir la imagen original de la huella dactilar de tal manera que el ruido es fácilmente identificable sin la necesidad de expertos en el área.

En la Figura 4.7, se muestra el efecto que tienen los diferentes conjuntos de parámetros en el sistema DRD basado en el Oreganor sobre el realce en la imagen de la huella digital.

Curiosamente el DRD basado en el Oreganor muestra una fuerte sensibilidad al conjunto de parámetros empleados para el realce de las imágenes, siendo este mucho más inestable que el caso basado en el Bruselador. En otras palabras una elección inapropiada en los valores de los parámetros en la reacción BZ fácilmente desestabiliza el sistema mientras que para el Bruselador se tiene una mayor libertad de acción.

En este trabajo analizamos el rol que juega el conjunto de parámetros del DRD que es tratado como un vector de descriptores; es decir la forma en que evolucionan las diferentes calidades de realce en la imagen de la huella dactilar, a través de un análisis estadístico, cómo un descriptor escalar, es decir, el discriminante de el mejor ajuste polinomial en el mejoramiento espacio fase, para el comportamiento de una huella dactilar específica. Se puede observar claramente en la Tabla 5.1 que el número y tipo de minucias y la calidad de la imagen original afectan el comportamiento de las imágenes producidas por el DRD; como un ejemplo, entre mayor número de minucias tenga la huella dactilar, mas alto es el valor del discriminante.

El descriptor propuesto no es empleado únicamente para resolver eficientemente el problema de correspondencia, sino que también tiene la finalidad de proporcionar información general adicional para calcular el grado de similitud entre dos impresiones.

En contraste a las características de estructuras locales empleadas por la mayoría de los algoritmos de asociación, nuestro descriptor es independiente de cualquier minucia detectada en el patrón de la huella dactilar y por lo tanto puede ser mucho más resistente a los resultados erróneos de los algoritmos de detección de minucias. Por lo que se concluye que el enfoque del DRD para comprender las texturas de las huellas dactilares es lo suficientemente sensible para producir descriptores con un buen comportamiento. Es importante mencionar que se debe hacer trabajo adicional para poder cuantificar mejor estos efectos.