



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

FISION Y FUSION CONTEXTUAL DE IMAGENES DE PERCEPCIÓN REMOTA

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
LICENCIADO EN INGENIERÍA
EN TELECOMUNICACIONES
P R E S E N T A :
OSCAR RIVAS NAVA

TUTOR :
DR. MIGUEL MOCTEZUMA FLORES



MÉXICO, D.F.

ENERO 2005

m.340669



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

DEDICADO A:

DIOS, que me dio la bendición de la vida y el cual ha guiado mi camino en este paso por el mundo.

Mi MADRE, que sin tus ánimos y tus fuerzas tal vez no hubiera logrado una más de mis metas; gracias por tus desvelos, tus atenciones, tus bendiciones, gracias por ser quien eres. Te quiero Mamá.

Mi PADRE, que sin tu esfuerzo y sufrimiento arduo en el trabajar de cada día, no hubiera concluido mi carrera; gracias por el ánimo que me inyectaste para mirar siempre hacia adelante, gracias por esas mañanas, gracias por ser mi mejor amigo y mi máximo orgullo. Te quiero Papá.

Mis hermanos EMILIO, ALEJANDRO y CÉSAR, que estuvieron conmigo en todo momento de alegría, sufrimiento y esfuerzo; gracias por su apoyo y palabras siempre acertadas y consoladoras. Los quiero.

Mi ABUELITA Carlota y mis ABUELOS donde quiera que estén, el conocerlos me inyectó ánimos para cumplir con mis metas, sueños, aspiraciones y crecer como persona; gracias por sus consejos.

Mis AMIGOS, a todos en general, pero en especial a Maribel, Juan Carlos, Saúl, José Manuel y Heidi, el haberlos conocido y escuchado me enseñó a no caminar sólo, a crecer y madurar; recuerden que los sueños y las ilusiones se cumplen si nos lo proponemos.

GRACIAS a todos los que alguna vez estuvieron en mi vida, se que con un solo minuto que hayamos compartido basta para aprender, para saber que Dios nunca nos deja solos, ya que siempre encontrarás a alguien que estará contigo. GRACIAS.

Autorizo a la Dirección General de Bibliotecas de la UNAM a difundir en formato electrónico e impreso el contenido de mi trabajo recepcional.

NOMBRE: Rivas Nava Oscar

FECHA: 2-Feb-2005

FIRMA: Rivas Nava Oscar

ÍNDICE

1 Introducción

1.1	Objetivo	1
1.1.1	Antecedentes del tema	1
1.1.2	Definición del problema	1
1.1.3	Metodología empleada	2

2 Fundamentos de Percepción Remota

2.1	Descripción General	4
2.1.1	¿Qué es la percepción remota o teledetección?	4
2.2	Principios y fundamentos	6
2.2.1	Trayectorias de la Radiación	8
2.2.2	Fuentes de radiación electromagnética	9
2.2.3	Efectos atmosféricos en la propagación de la Radiación Electromagnética	10
2.2.4	Sistemas Sensores	12
2.2.5	Nivel de adquisición de datos	14
2.3	Aplicaciones	
2.3.1	Fotografías aéreas	18
2.3.2	Imágenes multiespectrales	19
2.3.3	Imágenes sar	22
2.3.3.1	Obtención de Imágenes SAR	25
2.3.3.3	Procesamiento "Multi-Look"	28

3 Principales Satélites de Percepción Remota

3.1	ENVISAT	30
3.1.1	El sistema DORIS	32
3.1.2	El sistema RA-2	32
3.2	ERS 1y2	34
3.2.1	ERS-1	34
3.3	LANDSAT	35
3.3.1	Imageador RBV	35
3.3.2	Imageador MSS	36
3.3.3	Imageador TM	36
3.4	SPOT	37
3.5	IKONOS	38
3.5.1	La fabricación del Sistema de la Carga Útil	40

4 ANÁLISIS TEXTUAL

4.1 Matrices de coocurrencia en niveles de gris (GLCM)	52
4.1.1 Algoritmos No Convencionales de la Clasificación	53
4.1.1.1 Clasificación basada en la Religión	54
4.1.1.2 Clasificación basada en la Ventana de píxel	54
4.2 Suma y diferencia de Histogramas (SADH)	59
4.3 Aproximación del Vector Diferencia de Niveles de Grises (GLDV)	62

5 ESQUEMA DE FISIÓN DE DATOS POR CAMPOS ALEATORIOS DE MARKOV.

5.1 Antecedentes de los modelos de Campos Aleatorios de Markov en visión	73
5.2 Problema del Etiquetado en visión	75
5.2.1 Notación	75
5.2.2 El problema del etiquetado	76
5.3 Campos Aleatorios de Markov y distribución de Gibbs	80
5.3.1 Sistema de vecinos y cliques	80
5.3.2 Campos Aleatorios de Markov (CAM)	83
5.4 Definición de Campos Aleatorios de Markov	85
5.4.1 Auto modelos	86
5.4.2 Modelo Logístico Multinivel	89
5.5 Fisión y Fusión Markoviana	91
5.5.1 El paso de Fisión	91
5.5.2 El paso de Fusión	93

6 Resultados de Segmentación

6.1 Detección de derrames petroleros	95
6.2 Ejemplo de dos imágenes del derrame petrolero del buque PRESTIGE	100

7 Conclusiones

Conclusiones	113
Apéndices	116
Referencias	123

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Objetivo

Los objetivos de esta tesis son:

- Investigar sobre análisis de texturas y técnicas de segmentación.
- Definir un esquema estadístico para la segmentación de imágenes SAR y un esquema estocástico para la fusión de las imágenes.
- Material de apoyo académico para alumnos de Licenciatura.

1.1.1 Antecedentes del tema

Para entender el contenido de este trabajo, se requiere tener conocimientos en:

- Procesamiento de señales aleatorias.
- Probabilidad y estadística.
- Análisis matemático.
- Conocimientos de ondas electromagnéticas.

1.1.2 Definición del problema

Existen regiones del planeta de difícil acceso para la adquisición de datos. Las condiciones meteorológicas son factores determinantes en regiones muy frecuentemente cubiertas por nubes. Otro factor adicional son las condiciones de iluminación del sol en las imágenes adquiridas en el rango espectral visible e infrarrojo. En este contexto que las tecnologías contemporáneas de Procesamiento Digital de Imágenes y de Percepción Remota se sitúan como fuentes de datos útiles a los sistemas de información ambiental.

Las imágenes provenientes de instrumentos de Radar de Apertura Sintética (SAR) se han revelado con una fuente de datos de enorme potencial de aplicación, debido a su naturaleza de adquisición por captosres activos. En desventaja, diversos problemas surgen por la adquisición empleando fuentes de iluminación coherentes. El *speckle* y las interacciones de la atmósfera con la superficie de los océanos crean efectos de difícil análisis al emplear técnicas de procesamiento tradicionales. Es en este contexto que en el presente tema de tesis, se pretende el estudio de técnicas bayesianas para la segmentación de imágenes de percepción remota.

El ejemplo que se expondrá, pretende la detección de derrames petroleros, empleando imágenes SAR. El análisis se aplicará empleando una serie de imágenes adquiridas en la zona de hundimiento del buque petrolero "Prestige" en las costas de España en el 2002.

1.1.3 Metodología empleada

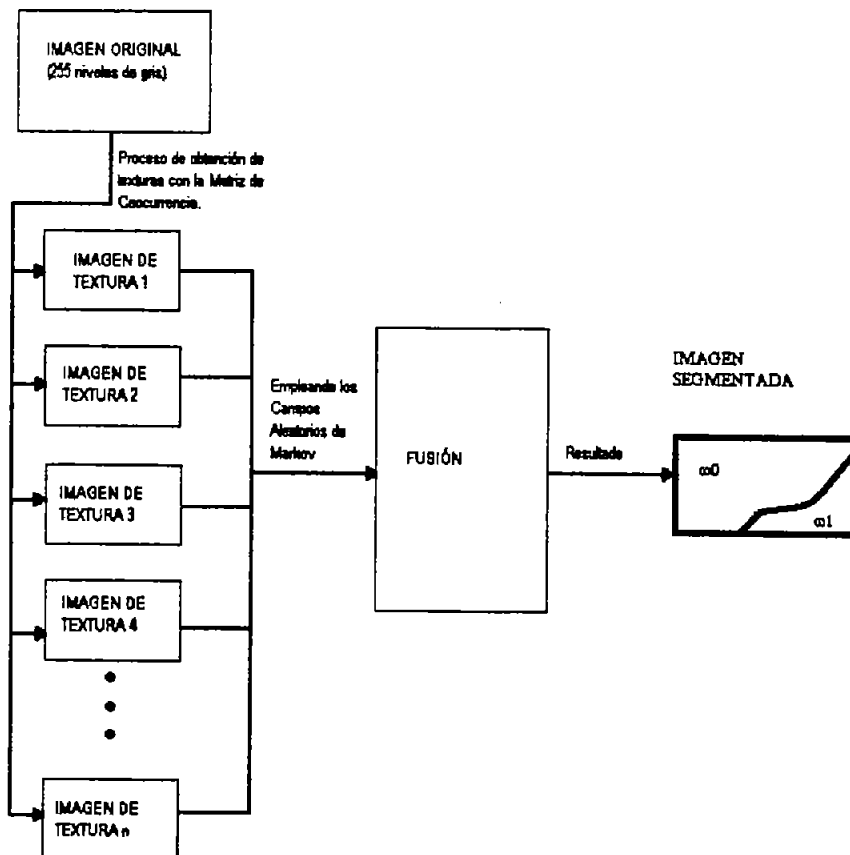
Se estudiará el proceso de una imagen obtenida por medio de la Percepción Remota; en la actualidad existen diferentes técnicas de fotografiado de regiones por medio de Satélites. En esta tesis se verá el proceso de la Percepción Remota, ya que proporciona datos de relieve (textura) que nos permite observar con mayor precisión el comportamiento de la imagen. Dando una reseña sobre la Percepción Remota y la toma de imágenes SAR.

Posteriormente como sabemos, con el avance tecnológico surgen mejores técnicas en los satélites para la competitividad entre ellos. Por tal motivo, existe un apartado referente a los diferentes satélites que se ocupan en la actualidad para la toma de imágenes por medio de la Percepción Remota, mostrando algunas de sus características, posiciones orbitales y tecnología que se emplea.

Una vez tomadas las imágenes satelitales, se aplica un proceso estadístico de segmentación de imágenes para estudiar su textura; como contraste, homogeneidad, entropía, etc., ayudados del proceso conocido como Matriz Plana de Coocurrencia en

Niveles de Grises (GLCM); así como, la Diferencia de Histogramas (SADH) y el Vector de Diferencia en Niveles de Grises (GLDV). Una vez obtenidas las texturas, se aplicará un proceso estocástico como los Campos Aleatorios de Markov para fusionar las imágenes y obtener una imagen clasificada, basado en la Probabilidad de Gibbs y otros parámetros. Este proceso requiere de un número infinito de iteraciones, pero para fines de experimentación se hará con un número determinado de estas. Estos, procesos los aplicaremos a imágenes del derramamiento petrolero del buque Prestige en el año 2002. Con el fin de ejemplificar el proceso de textura en una imagen satelital.

Para entender mejor el proceso que mostrará esta tesis, los pasos antes citados los describo en el siguiente diagrama.



2. FUNDAMENTOS DE PERCEPCIÓN REMOTA

2.1 DESCRIPCIÓN GENERAL

2.1.1 ¿QUE ES LA PERCEPCIÓN REMOTA O TELEDETECCIÓN?

El origen de la percepción remota o teledetección está ligado a los experimentos de Newton (1822), quien constató que un rayo luminoso (luz blanca), al atravesar un prisma, se desdobra en un haz de colores; un espectro de colores.

Desde entonces los científicos fueron ampliando sus estudios al respecto de tan fascinante materia. Verificaron que la luz blanca era una síntesis de diferentes tipos de luz, una especie de vibración compuesta básicamente, de muchas vibraciones diferentes. Posteriormente, descubrieron que cada color descompuesto en el espectro correspondía a una temperatura diferente y que la luz roja incidiendo sobre un cuerpo, lo calentaba más que la luz violeta.

Además del rojo visible, existen radiaciones invisibles para los ojos, que pasan a ser ondas, rayos o inclusive radiaciones infrarrojas. Después, Titter reveló otro tipo de radiación: la ultravioleta. Siempre avanzando en sus experimentos, los científicos consiguieron probar que la onda de luz era una onda electromagnética, mostrando que la luz visible es sólo una de las diferentes especies de ondas electromagnéticas.

Algunos autores colocan el origen de la Percepción Remota ligado al desarrollo de sensores fotográficos, cuando las fotografías aéreas eran obtenidas desde globos.

La evolución de la teledetección está ligada a algunos de los principales eventos citados a continuación:

- 1822 - Desarrollo de la teoría de la luz;
 - - Newton: descomposición de la luz blanca;

- - Utilización de una cámara primitiva;
- 1939 - Desarrollo de equipos ópticos;
 - - Investigaciones de nuevas sustancias fotosensibles;
- 1859 - Utilización de cámaras fotográficas a bordo de globos aéreos;
- 1903 - Utilización de fotografías aéreas con fines cartográficos;
- 1909 - Obtención de fotografías aéreas por aviones;
- 1930 - Coberturas sistemáticas del territorio con fines de levantamiento de recursos naturales;
- 1940 - Desarrollo de equipos para radiometría sensibles a la radiación infrarroja;
 - - Utilización de películas infrarrojas en la II Guerra Mundial, para la detección de camuflajes;
- 1944 - Primeros experimentos para utilizar cámaras multiespectrales;
- 1954 - Desarrollo de radiómetros de microondas;
 - - Pruebas iniciales con el objetivo de construir radares de vista lateral;
- 1961 - Desarrollo de procesamientos ópticos y digitales;
 - - Primeros radares de vista lateral;
- 1962 - Desarrollo de vehículos espaciales tripulados y no tripulados;
 - - Lanzamientos de satélites meteorológicos;
 - - Primera fotografía orbital MA-4-Mercury;
- 1972 - Fotografías orbitales obtenidas por el programa Gemini;
 - - Surgen otros programas espaciales envolviendo satélite de recursos naturales: SEASAT, SPOT, ERS, LANDSAT;
- 1983 - Lanzamiento del Landsat 4, SIR-A, SIR-B, MOMS;
- 1991 - Lanzamiento del ERS-1.

Una definición de **Percepción Remota** puede ser: "Es la utilización de sensores para la adquisición de informaciones sobre objetos o fenómenos sin que haya contacto directo entre el sensor y los objetos"; o bien, "la **Percepción Remota** (*Remote Sensing*) o **Teledetección** puede definirse como la ciencia y arte de obtener información de un objeto analizando los datos adquiridos

mediante algún dispositivo que no está en contacto físico con dicho objeto”.

La Segunda Guerra Mundial dio un gran impulso a la fotografía aérea así como a otras formas de percepción remota. Sin embargo, el "salto cuántico" en esta disciplina se produjo en la década de 1960 cuando las plataformas satelitales reemplazaron a las aéreas y los sensores electrónicos multispectrales, acoplados a computadoras, reemplazaron las cámaras fotográficas. El esquema operativo de un *satélite de observación* se representa en forma muy simplificada en la figura 1.

Los objetos terrestres, iluminados por la radiación solar, reflejan ésta, luego de introducir en ella modificaciones inducidas por la misma estructura y composición de dichos objetos. La radiación reflejada es capturada por los sensores del satélite, siendo parcialmente procesada a bordo de éste y retransmitida a estaciones receptoras terrestres para su posterior procesamiento y análisis (*fuentes emisora, sensor, cerebro*).

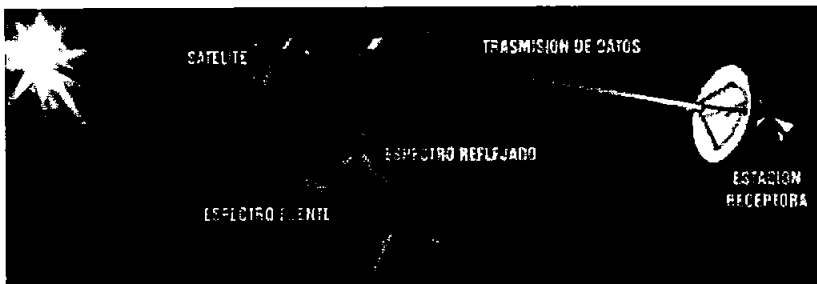


Figura 1. Esquema operativo de un satélite de observación.

2.2 PRINCIPIOS Y FUNDAMENTOS.

Para poder entender el principio del funcionamiento de la percepción remota, describiremos algunos conceptos que nos serán útiles.

Sensores: son equipos capaces de coleccionar energía proveniente del objeto, convirtiéndola en una señal posible de ser registrada y

presentándola en forma adecuada para la extracción de informaciones.

Energía: la mayoría de las veces se refiere a la energía electromagnética o radiación electromagnética.

Un concepto más específico puede ser: " Es el conjunto de las actividades relacionadas con la adquisición y el análisis de datos de sensores remotos ", donde:

Sensores Remotos: son sistemas fotográficos u óptico-electrónicos capaces de detectar y registrar, en forma de imágenes o no, el flujo de energía radiante reflejado o emitido por objetos distantes.

Un flujo de radiación electromagnética al propagarse por el espacio puede interactuar con superficies u objetos, siendo reflejado, absorbido o emitido por dichas superficies u objetos. Las variaciones que estas interacciones producen en el flujo considerado, dependen fuertemente de las propiedades físico-químicas de los elementos en la superficie.

Todo en la naturaleza está en constante vibración, emitiendo o modificando ondas electromagnéticas (energía) y presentando "perturbaciones" de los campos magnéticos y gravimétricos de la Tierra. Todos los instrumentos que captan y transforman esa energía pueden ser clasificados como sensores: radio, televisión, máquina fotográfica, por sólo citar algunos.

Durante la fase de adquisición de datos por los sensores, se pueden distinguir los siguientes elementos básicos: energía radiante, fuente de radiación, objeto (albo), trayectoria y sensor (sistema de imagen óptico y detector). La figura 2 presenta estos elementos y ejemplifica los diferentes caminos que la radiación electromagnética puede tomar antes de ser captada por el sistema sensor.

Una cámara fotográfica con flash puede servir como ejemplo de un sistema sensor: "cuando el sistema de la cámara es activado, el flash es accionado y emite radiación. La radiación fluye para el albo y es reflejada de éste, para el sistema óptico de

la cámara. Entonces la radiación reflejada es registrada sobre el plano de la película, que constituye un detector fotoquímico de radiación. Una imagen del patrón de radiación es formada en la película y después es desarrollada químicamente".

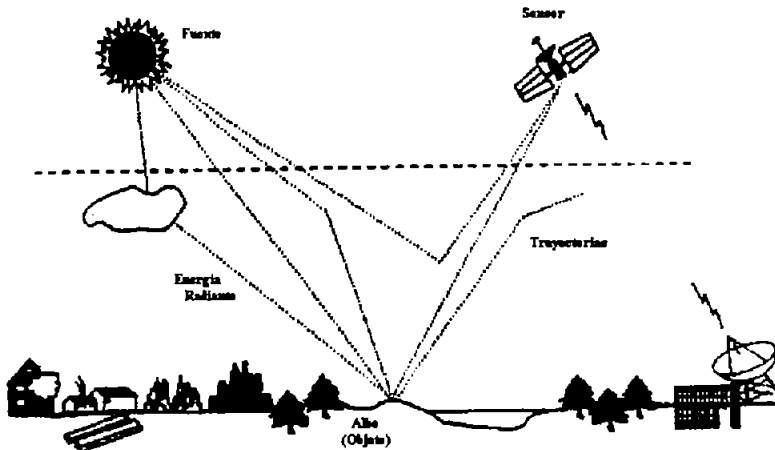


Figura 2. Adquisición de datos

2.2.1 Trayectorias de la Radiación.

Como sabemos, siempre que se realiza un trabajo algún tipo de energía debe ser transferida de un cuerpo para otro, o de un local para otro en el espacio. De todas las formas posibles de energía, existe una de especial importancia para la Percepción Remota: *la energía radiante o energía electromagnética*, la cual es la única que no necesita de un medio material para propagarse. El ejemplo de energía radiante más familiar y de mayor importancia es la energía solar, que se propaga por el espacio vacío desde el Sol hasta la Tierra.

¹ La banda más utilizada en Percepción Remota está entre $0.3 \mu\text{m}$ y $15.0 \mu\text{m}$, la cual se conoce como espectro óptico. En esta faja, los componentes ópticos de reflexión y refracción tales como lentes, espejos y prismas, son utilizados para coleccionar y reorientar la radiación.

¹ Las bandas del espectro electromagnético, se encuentran en el Apéndice A.

2.2.2 Fuentes de radiación electromagnética

Las fuentes de radiación electromagnética (REM) pueden ser divididas en naturales (sol, tierra, radioactividad) y artificial (radar, láser, entre otras).

El sol es la fuente natural más importante, ya que al interactuar su energía con las diversas sustancias de la superficie de la Tierra, origina una serie de fenómenos (reflexión, absorción, transmisión, luminiscencia, calentamiento,...) investigados por la Percepción Remota.

Cualquier fuente de energía electromagnética es caracterizada por su espectro de emisión, el cual puede ser continuo o distribuido en bandas discretas. El sol, por ejemplo, emite radiación distribuida continuamente en una banda que va de los rayos X hasta la región de microondas, aunque concentrado en el intervalo de $0.35 \mu\text{m} - 2.5 \mu\text{m}$.

Toda sustancia con temperatura superior al cero absoluto (0°K ó -273°C) emite radiación electromagnética, como resultado de sus oscilaciones atómicas y moleculares. Esta radiación emitida puede incidir sobre la superficie de otra sustancia pudiendo ser reflejada, absorbida o transmitida. En el caso de la absorción, la energía es generalmente reemitida, con diferentes longitudes de onda.

En la práctica, los cuatro procesos: *emisión*, *absorción*, *reflexión* y *transmisión* ocurren simultáneamente y sus intensidades relativas caracterizan la sustancia que está siendo investigada. Dependiendo de las características físicas y químicas de la sustancia, los cuatro procesos ocurren en diferentes regiones del espectro con intensidades distintas. Este comportamiento espectral de las diversas sustancias es denominado **firma espectral** y es utilizado en Percepción Remota, para distinguir diversos materiales entre sí.

2.2.3 Efectos atmosféricos en la propagación de la Radiación Electromagnética

Cuando se colecta una información a través de un sensor remoto, sea a nivel de satélite o aeronave, la mayoría de las veces la señal colectada corresponde a la radiación proveniente del sol, que interactúa con la atmósfera hasta alcanzar el albedo y retorna al sensor interactuando nuevamente con la atmósfera. Así la señal medida es la radiación emitida por el objeto, la señal siempre interactúa con la atmósfera hasta alcanzar el sensor.

Existen regiones del espectro electromagnético en las cuales la atmósfera es opaca, o sea, no permite el paso de la radiación electromagnética. Estas regiones definen las "*bandas de absorción de la atmósfera*". Las regiones del espectro electromagnético en las que la atmósfera es transparente a la radiación electromagnética proveniente del Sol, son conocidas como "*ventanas atmosféricas*".

De esta manera, los siguientes factores interfieren en la Percepción Remota y siempre deben ser asociados con la atmósfera: absorción, efectos de masa de aire, dispersiones debido a moléculas gaseosas o partículas en suspensión, refracción, turbulencias, emisión de radiación por los constituyentes atmosféricos, entre otros.

Así, se puede concluir que la atenuación de la radiación es dada por:

$$\text{Atenuación} = \text{Absorción} + \text{Dispersión}$$

Donde,

Absorción: la energía de un haz de radiación electromagnética es transformada en otras formas de energía. Es una atenuación selectiva observada en varios constituyentes, tales como vapor de agua, ozono y monóxido de carbono. En muchos casos, la absorción puede ser despreciada por ser muy pequeña.

Dispersión: la energía de un haz de radiación electromagnética es removida por cambios de dirección. Al interactuar con la atmósfera, por el proceso de dispersión, generará un campo de luz difusa, que se propagará en todas las direcciones.

Existe tres tipo de dispersión:

- (a) **Dispersión Molecular o Rayleigh:** Producida esencialmente por las moléculas de los gases de la atmósfera. Este tipo de dispersión se caracteriza por el hecho de que su intensidad es inversamente proporcional a la cuarta potencia de la longitud de onda ($E = \lambda/4$), lo que explica la coloración azul del cielo, donde la longitud de onda en esta banda es menor.
- (b) **Dispersión MIE:** Ocurre cuando el tamaño de las partículas que causan la dispersión es similar a la longitud de onda de la radiación.
- (c) **Dispersión no selectiva:** Ocurre cuando los diámetros de las partículas son mayores que la longitud de onda. La radiación de diferentes longitudes de onda será dispersa con igual intensidad. La apariencia blanca de las nubes es explicada por este proceso.

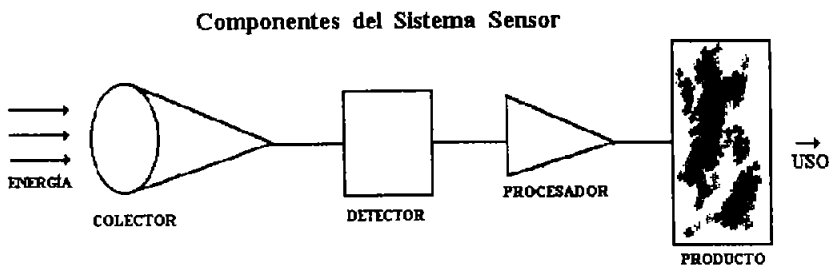
La atenuación de la radiación puede explicar también el color rojizo del atardecer, ya que las menores longitudes de onda (azul) de la luz quedan retenidas en donde la atmósfera tiene un espesor mayor, pasando la componente roja de la luz solar.

Debido a los factores de atenuación es importante planificar bien, antes de la adquisición de los datos y de dar inicio a los procesos de interpretación.

2.2.4 Sistemas Sensores

Como ya fue mencionado, todos los materiales y fenómenos naturales absorben, transmiten, reflejan y emiten selectivamente radiación electromagnética. Con el desarrollo actual es posible medir con una precisión razonable y a distancia, las propiedades espectrales de aquellos materiales y fenómenos.

Cualquier sistema sensor presenta los siguientes componentes necesarios para captar la radiación electromagnética (ver la figura siguiente).



Componentes del Sistema. Donde: colector = recibe la energía a través de una lente, espejo, antenas; detector = capta la energía colectada de una determinada banda del espectro; procesador = la señal registrada es sometida a un procesamiento (revelado, ampliación, ...) a través del cual se obtiene el producto; producto = contiene la información necesaria para el usuario.

Los sensores pueden ser clasificados en función de la fuente de energía o en función del tipo de producto que produce.

En función de la fuente de energía:

Pasivos: no poseen una fuente propia de radiación. Miden la radiación solar reflejada o la radiación emitida por los albos. Por ejemplo, los sistemas fotográficos.

Activos: poseen su propia fuente de radiación electromagnética, trabajando en bandas restringidas del espectro. Por ejemplo, los radares.

En función del tipo de producto:

No imageadores: no generan una imagen de la superficie observada. Por ejemplo, los radiómetros (salida en dígitos o gráficos) y los espectrorradiómetros (firma espectral).

Son esenciales para la adquisición de informaciones minuciosas sobre el comportamiento espectral de los objetos de la superficie terrestre.

Imageadores: se obtiene como resultado una imagen de la superficie observada. Suministran informaciones sobre la variación espacial de la respuesta espectral de la superficie observada.

B.1 - sistema de cuadro ("framing systems"): adquieren la imagen de la totalidad de la escena en un mismo instante, por ejemplo: RBV (Cap.3, en 3.3.1)

B.2 - sistema de barrido ("scanning systems") por ejemplo: TM, MSS, SPOT (que se explicaran más adelante en el Capítulo 3).

B.3 - sistema fotográfico

Los imageadores no fotográficos (sistema de imageamiento de barrido) se originaron para cubrir la laguna dejada por los problemas inherentes al uso del más difundido sensor óptico, la cámara fotográfica. Esta, a pesar de presentar condiciones más fáciles de operación y costos, tiene una limitación en captar la respuesta espectral, debido a que las películas cubren solamente el espectro del ultravioleta próximo al infrarrojo lejano. También este tipo de sensor limita las horas de sobrevuelo, ya que debido a fenómenos atmosféricos no es posible observar frecuentemente el suelo, a grandes altitudes.

Como los datos de estos sensores no fotográficos son colectados en forma de señal eléctrica, estos datos podrán ser

fácilmente transmitidos para estaciones distantes, donde un procesamiento electrónico hará el análisis discriminatorio.

La tabla siguiente presenta un análisis comparativo de los sensores fotográficos e imageadores de barrido.

	Imageamiento por sensores fotográficos.	Imageamiento por sensores de barrido.
Resolución geométrica	alta *	media
Resolución espectral	media	alta *
Frecuencia	baja	alta *
Visión sinóptica	baja	alta *
Base de datos	analógica	digital *

* Mayor ventaja sobre la otra

2.2.5 Nivel de adquisición de datos

La figura 3 muestra los niveles de adquisición de los datos de Percepción Remota, ya que la altitud del sensor con relación a la superficie imageada también es un factor de gran Interferencia, no sólo en la intensidad y calidad de la señal, como en las formas de registro y análisis de los datos.

Al pasar de un nivel para otro, se modifican las dimensiones del área a ser Imageada, consecuentemente se obtienen imágenes con diferentes resoluciones, lo que exigirá estudios para metodologías de análisis diferentes.

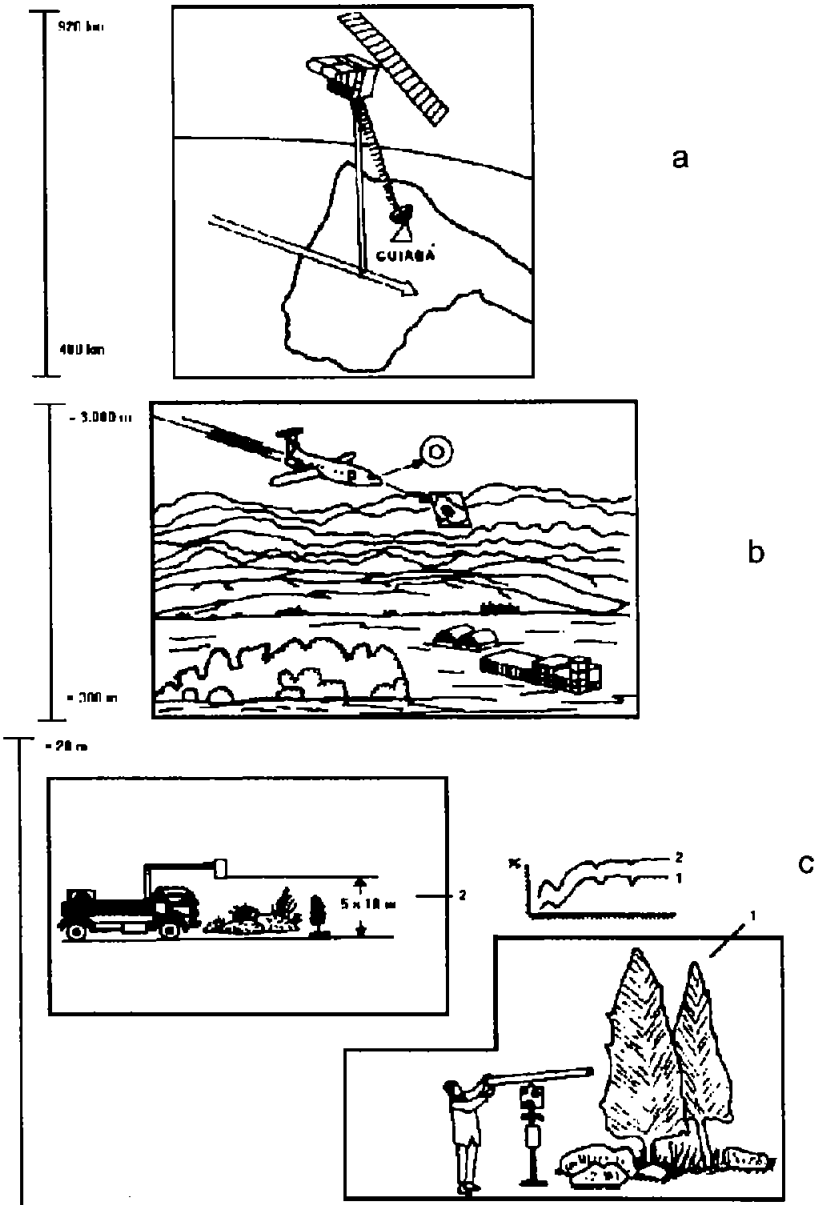


Figura 3. Niveles de adquisición de datos. Donde (a) nivel orbital, (b) nivel aeronave y (c) nivel de Laboratorio.

Nivel de laboratorio (0 a 20 m) - se trabaja con porciones reducidas de la materia y se estudia su comportamiento espectral casi sin interferencia de factores ambientales. El área posible de ser analizada por estos métodos es reducida.

Nivel de Aeronave (300 a 3.000 m) - la energía registrada por el sensor no se refiere a un determinado objeto, sino a un grupo de objetos de la escena. Algunos objetos pueden ser individualmente detectados por su configuración.

Nivel Orbital (400 a 920 m) - en cada elemento de resolución en el terreno, la energía registrada corresponde a la integración de la respuesta de diferentes objetos.

Las técnicas de Percepción Remota nacieron en un principio, a partir de necesidades militares. Actualmente estas técnicas y las investigaciones realizadas han producido herramientas cada vez más sofisticadas, ampliando su aplicabilidad a una gran gama de problemas ecológicos, urbanos y de recursos naturales. Sin embargo, en la selección de una determinada técnica de teledetección, el usuario debe tener el conocimiento anticipado del significado de los parámetros medidos con relación al problema que está siendo investigado.

Básicamente, en la Percepción Remota se debe dar atención a dos partes: la **adquisición** y la **utilización** de los datos.

La fase de adquisición de datos se puede dividir en:

- *Plataforma:* aérea o espacial, la selección de la plataforma depende de los objetivos del programa. La combinación de los dos tipos (aéreo y espacial) genera excelentes resultados.
- *Sensor:* existen diversos tipos y su selección está íntimamente relacionada con el tipo de fenómeno a ser investigado.
- *Trayectoria:* depende de la localización del área de interés, así como de la necesidad de recubrimiento espacial y temporal.

- *Verdad terrestre:* los datos de campo (factor vital). Es a través del muestreo que se consigue el entrenamiento, la verificación y la evaluación de todo el sistema de Percepción Remota.
- *Preprocesamiento:* engloba las modificaciones de las informaciones colectadas por los sensores antes de que la plataforma retorne a la Tierra o antes de ser transmitidas a las estaciones de rastreo. En este ítem se incluyen las correcciones radiométricas, geométricas, conversión de datos analógicos en digitales, etc... Los diversos productos necesarios para la interpretación son generados o procesados, como es el caso de las imágenes y cintas compatibles con computador (CCT).

2.3 Aplicaciones

2.3.1 Fotografía aérea

Una de las formas más comunes de la percepción remota es la fotografía aérea. Las ventajas básicas que ofrece esta técnica son:

- Permite tener una vista de los detalles de la superficie en estudio en su contexto espacial a escala menor que la imagen satelital. Esto la transforma en una herramienta muy útil para trabajar en áreas pequeñas.
- Flexibilidad por el hecho de usar plataformas aéreas para embarcar los sensores de imagen, es muy fácil rediseñar el plan de trabajo según las necesidades que vayan surgiendo.
- La fotografía nos da una visión instantánea de procesos bajo condiciones dinámicas (Inundaciones, derrames de petróleo, tráfico, incendios). Si bien este tipo de trabajo se realiza muy bien con imagen satelital, la fotografía aérea permite desplazarse al lugar de interés sin demoras. De esta forma se dispone de un medio complementario al uso de plataformas satelitales especialmente apto para cubrir aquellos procesos dinámicos con períodos de cambio inferiores a la revisita de los satélites (catástrofes).

El sensor usado en esta técnica es la película fotográfica. Existen diferentes tipos de película pensados para diferentes tipos de problemas

Las películas a las que estamos más acostumbrados son aquellas que son capaces de "ver" la imagen en forma similar a como lo hace el ojo humano. Estas películas, con algunas características adicionales, son usadas en fotografía aérea y permiten analizar y resolver muchos problemas. En el siguiente ejemplo podemos ver el tipo de detalles que se ven al volar sobre la superficie terrestre a 2500 m de altura (Imagen 1).



Imagen 1. Campos cercanos al Río Negro. Color Normal.

2.3.2 Imágenes multiespectrales

Para otros tipos de problemas es necesario recurrir a películas que "ven colores" en donde el ojo humano no ve nada. Estamos hablando en este caso de film sensible a la radiación infrarroja. El ejemplo siguiente corresponde a la misma imagen pero usando film sensible al infrarrojo cercano. Esta foto es en falso color ya que no podemos hablar de color en el infrarrojo. (Imagen 2).



Imagen 2. Campos cercanos al Río Negro. Falso Color Infrarrojo.

Otra característica importante es que este film filtra completamente el color azul eliminando el efecto de dispersión de luz atmosférica conocido como "haze". Este efecto disminuye el contraste de la imagen y le da una tonalidad azul grisáceo. Si comparamos ambas fotos vemos la eliminación de este efecto en la fotografía infrarroja. En la Imagen 3 es posible ver y analizar los detalles (p. Ej. heterogeneidades en las áreas cultivadas) que se presentan en la fotografía infrarroja, en comparación con su correspondiente versión en color real.

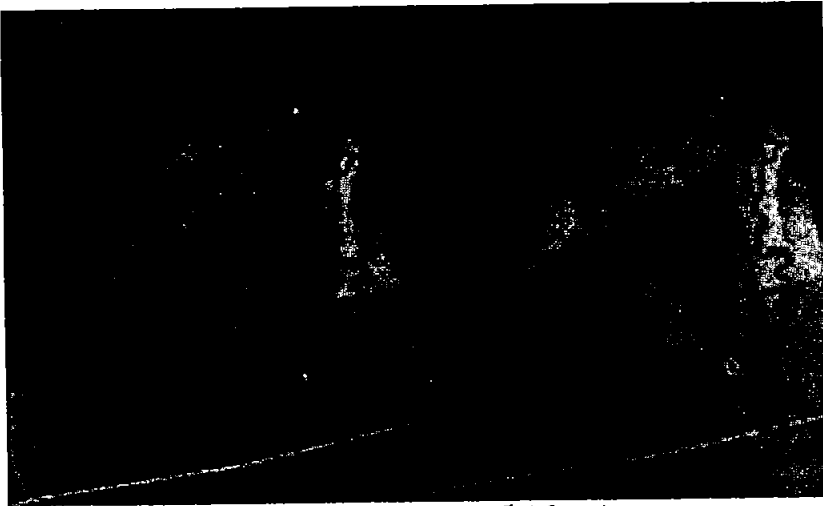


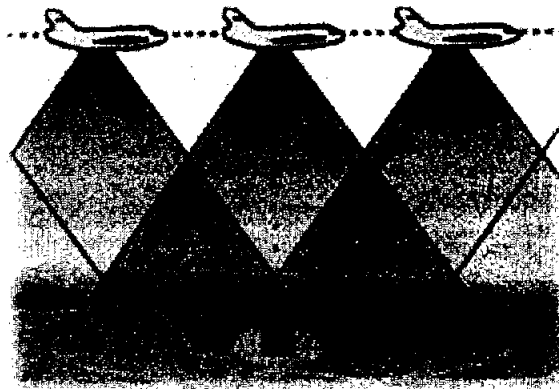
Imagen 3. Eliminación del haze en la fotografía Infrarroja.

- Cuando hablamos de fotografía infrarroja debemos de tener cuidado de no confundirla con la fotografía térmica. En esta técnica también estamos trabajando con radiación infrarroja pero de diferente tipo a la que es sensible la película infrarroja que se usó en este ejemplo. En esta película queda registrado un rango de radiación infrarroja que da información acerca de la naturaleza química de los objetos fotografiados.

2.3.3 Imágenes SAR

Los SAR (Synthetic Aperture Radar) son sistemas de radares coherentes que generan imágenes de alta resolución. Una apertura sintética o antena virtual, consiste en un extenso arreglo de sucesivas y coherentes señales de radar que son transmitidas y recibidas por una pequeña antena que se mueve a lo largo de un determinado recorrido de vuelo u órbita. El procesamiento de la señal usa las magnitudes y fases de la señal recibida sobre sucesivos pulsos para crear una imagen.

Los puntos en los cuales son transmitidos pulsos sucesivos son considerados como largos arreglos sintéticos usados para generar la imagen SAR. Se envían pulsos de señal a los mismos puntos de la superficie terrestre en dos o más momentos distintos de la trayectoria del radar y la resolución que se obtiene es equivalente a la que si se utilizara una antena de similar longitud que la distancia entre los pulsos. Este concepto de larga antena virtual es la base de los radares de apertura sintética.



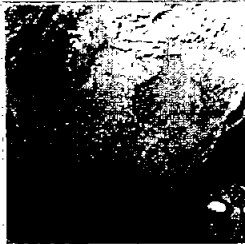
Generación de apertura sintética: el objeto es registrado desde distintas posiciones del sensor.

A continuación se presenta una serie de imágenes obtenidas por diferentes satélites de Percepción Remota.

- Baja resolución (NOAA)



25 de Agosto de 1999 - NOAA 14 -
Composición RGB
Falso Infrarrojo Bandas 1,2,3 - Resolución
1,100km por píxel: Subcuadrante Uruguay.




25 de Agosto de 1999 - NOAA 14 -
Composición RGB
Falso Infrarrojo Bandas 2,1,1 - Resolución
1,100km por píxel: Subcuadrante Uruguay.




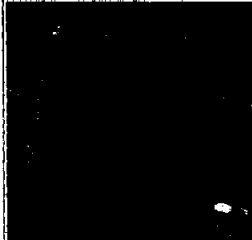
17 de Setiembre de 1999 - NOAA 14 -
Composición RGB Falso Infrarrojo Bandas
1,2,3 - Resolución 2,200km por píxel: si
bien la resolución original es de 1,100km
por píxel, su resolución fue reducida en un
50% para poder ser visualizada a través de
Internet.



12 de marzo de 2000 - NOAA 15 -
Composición RGB
Falso Infrarrojo Bandas 2,1,1 - Resolución
1,100km por píxel: Subcuadrante Cordillera
de los Andes: amanecer en los Andes

	<p>16 de agosto de 1999 – NOAA 14 - Banda 1 - Resolución 1,100km por píxel: Subcuadrante Paraguay centro y sur. Como puede verse, esta imagen fue sometida a varios niveles de procesamiento. Las zonas blancas en forma de "cometa" corresponden a plumas de incendios de origen intencional, cuyo objetivo es sin duda la quema de campos. Obsérvese que estos incendios se distribuyen en prácticamente las tres cuartas partes del territorio paraguayo. El impacto ambiental resultante de esta práctica, dadas sus proporciones, realmente debe preocupar.</p>
---	---

- Alta resolución (LANDSAT)

	<p>1 de Enero de 1997 , Landsat 5, Composición RGB Falso Infrarrojo Bandas 4,3,2 Cuadrante de 90km x 90km, 30mts de resolución por píxel. En este caso, debido al gran tamaño de la imagen, su resolución fue reducida a un 10% de la original. Esto es lo que en Percepción Remota llamamos Vista Rápida o "Quick Look". Zona: Departamentos de Paysandú y Río Negro</p>
	<p>Subescena del Cuadrante anterior, ésta sí con su resolución original de 30mts por píxel: Montes del Queguay</p>



1 de Febrero de 1999 - Landsat 5,
Composición RGB
Falso Infrarrojo Bandas 4,5,3 - 30mts de
resolución por píxel: Zona Arrocerá al sur de
la Ciudad de Artigas.



27 de Julio de 1997 - Landsat 5,
Composición RGB Falso Infrarrojo Bandas
3,4,5 - 30mts de resolución por píxel:
Subescena, Río Paraguay, área sur del
Pantanal.

2.3.3.1 Obtención de Imágenes SAR

En la figura 4 se muestra la geometría básica de un sistema de imageamiento por Radar de Abertura Sintética. En este sistema, la plataforma (avión o satélite) con el sensor SAR se desloca a una velocidad V en relación con el suelo, a una altura H , apuntando la antena lateralmente con un ángulo θ con relación al nadir.

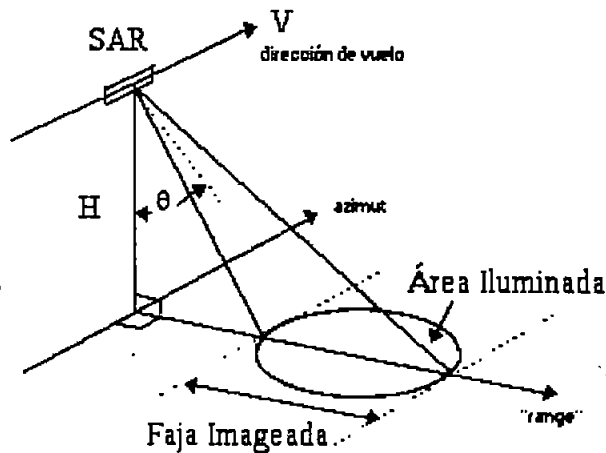
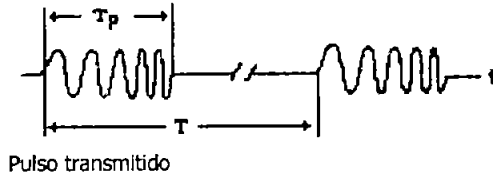


Figura 4. Geometría del sistema SAR

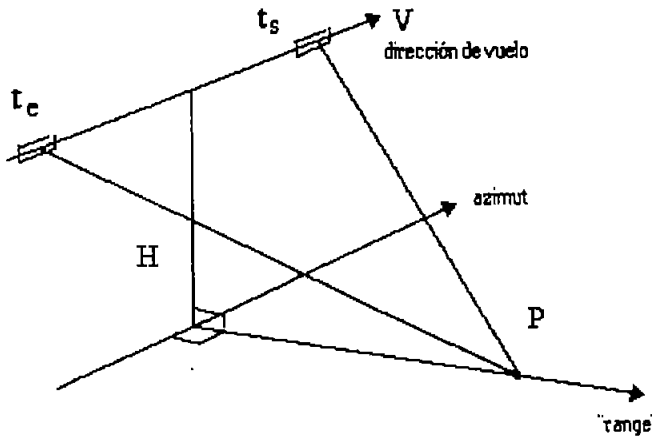
A medida que la plataforma se desloca el transmisor envía pulsos de ancho T_p a intervalos regulares de T segundos, como muestra la figura a continuación:



El pulso transmitido es modulado linealmente en frecuencia (conocido como "*chirp*"), con una variación de frecuencia entre un valor mínimo f_{\min} y un valor máximo f_{\max} . Esta variación de frecuencia se conoce como *ancho de banda del pulso*, $B_p = f_{\max} - f_{\min}$ y determina la resolución en dirección perpendicular al vuelo (range).

Para entender mejor lo que ocurre en un sistema de imageamiento **SAR**, se utiliza como modelo el comportamiento de un albo puntual, desde su entrada hasta la salida del campo visual de la antena.

La figura siguiente muestra el imageamiento de un punto P , desde su entrada en el campo visual de la antena, en el instante t_1 , hasta su salida en el instante t_2 . En el intervalo de tiempo $(t_1 - t_2)$, el radar envía un cierto número N de pulsos, colectándose N muestras del eco del punto P en ese intervalo. Estas muestras son almacenadas en un dispositivo de memoria. Durante el intervalo $(t_1 - t_2)$ la plataforma SAR se desloca $V(t_1 - t_2)$ metros, que es conocido como la longitud de la "*Abertura Sintética*".



Intervalo de la abertura sintética $(t_s - t_e)$.

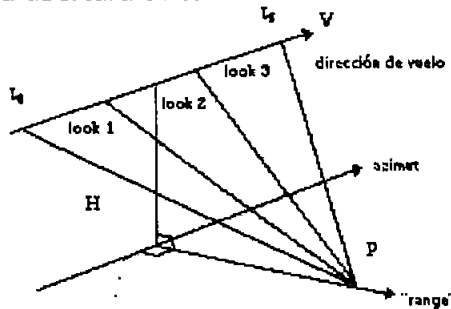
El eco recibido de cada pulso enviado, sufre una variación de frecuencia debido a la velocidad V de la plataforma. Esa variación es conocida como efecto **Doppler**. La variación de frecuencia en el intervalo t_e hasta t_s es conocida como ancho de **banda Doppler**, B_D .

Las variaciones de frecuencia B_P y B_D influyen directamente en las resoluciones de **"range"** y de azimut: Cuanto mayores sean las variaciones de frecuencia, menores serán las resoluciones de range y de azimut.

Los datos (ecos) adquiridos por un sistema SAR necesitan ser procesados para que sea generada una imagen correspondiente a estos datos. En el pasado, este procesamiento era realizado por un sistema óptico, poco flexible, impreciso y caro. Con el desarrollo de computadores cada vez más rápidos, fue posible generar imágenes SAR digitales más precisas, a través de algoritmos apropiados.

2.3.3.3 Procesamiento "Multi-Look"

El proceso "**multi-Look**" consiste en dividir la apertura sintética en vistas (**looks**). La figura a seguir ilustra un ejemplo de la división de la apertura sintética en 3 "**looks**".



Ejemplo de "multi-look", número de "looks" = 3.

La imagen final es compuesta por la media de las imágenes de cada "**look**", generadas separadamente. Se asume que las imágenes de cada "**look**" son estadísticamente independientes entre sí. Esta técnica aumenta la relación señal-ruido de la imagen final, que es proporcional a la raíz cuadrada del número de "**looks**", disminuyendo el efecto del ruido **Speckle**.

El procesamiento "**multi-look**" ocasiona una degradación de la resolución en azimut, una vez que las imágenes de cada "**look**" poseen un ancho de banda menor que el ancho total B_D , o sea:

$$B_{\text{look}} = B_D / n_l \quad \text{donde "n_l" es igual al número de "looks".}$$

La resolución en azimut en este caso se torna "**n_l**" veces menores que la imagen de un "**look**".

3. PRINCIPALES SATÉLITES DE PERCEPCIÓN REMOTA

En este capítulo se hablará con mayor profundidad sobre los principales satélites de Percepción Remota como el sistema Landsat y los sistemas SPOT, ENVISAT, IKONOS y ERS-1 y 2. En la actualidad, el sistema Landsat representa la mayor fuente de datos de Percepción Remota y es el que tiene mayor potencial de continuidad a lo largo del tiempo.

Antes de comentar sobre cada uno de los sistemas, se presentan algunas características orbitales, las cuales se basan en las siguientes premisas:

- la órbita debería ser circular, para garantizar que las imágenes tomadas en diferentes regiones de la Tierra tuvieran la misma resolución y escala;
- la órbita debería permitir el imageamiento cíclico de la superficie, para garantizar la observación periódica y repetitiva de los mismos lugares;
- la órbita debería ser síncrona con el sol (heliosíncrona), para que las condiciones de iluminación de la superficie terrestre se mantuvieran constantes;
- el horario de pasada del satélite debería atender las solicitudes de diferentes áreas de aplicación (geología, geomorfología, agricultura, etc.,....).

3.1 ENVISAT

No se trata de un satélite de radioaficionados, es un satélite que llama la atención por varios aspectos:

- Su puesta en órbita ha sido portada de numerosos periódicos.
- Es el mayor satélite europeo puesto en órbita
- Emite una multitud de frecuencias, algunas de las cuales podemos recibir en América.

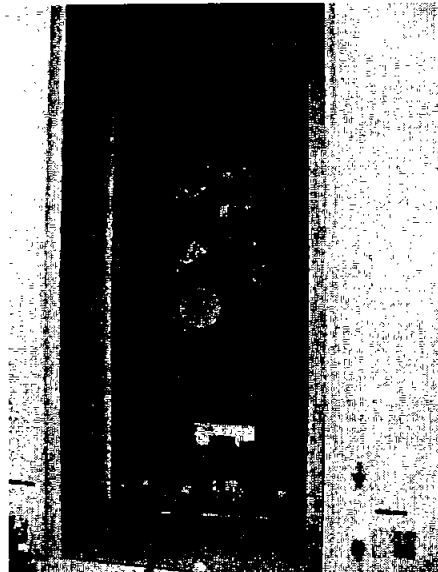


Satélite ENVISAT.

El satélite Envisat de la Agencia Espacial Europea fue puesto en órbita en marzo del 2002.

Su misión es controlar el calentamiento global, el grado de la contaminación atmosférica y controlar los riesgos de desastres naturales para poder mitigar sus efectos.

Su peso es de 8.2 toneladas. Para esta misión, que bate todos los record de peso de lanzamiento, el Ariane-5 fue equipado por primera vez con una cápsula en su extremo de 17 metros que envuelve y protege al mayor satélite jamás construido en Europa, según el consorcio europeo Arianespace.



Cápsula del Ariane-5, para transportar al satélite ENVISAT.

Fabricado por un consorcio de una cincuenta de empresas bajo la dirección de ASTRIUM; Envisat queda situado

en una órbita geoestacionaria casi polar.

Tras desplegar sus antenas solares, Envisat alcanza una dimensión de 25 metros de largo por 10 de ancho y da una vuelta a la Tierra cada cien minutos.

Una vez en órbita, está inclinado 98 grados con respecto al ecuador, sobrevuela los polos a 800 Km de altitud y puede analizar siempre las zonas a la misma hora solar. Desde esa posición privilegiada, nada deberá escapar a los diez sofisticados instrumentos con los que va equipado: gases de efecto invernadero, cambios del nivel de los océanos, fundición de glaciares, destrucción de bosques tropicales, restos de hidrocarburos en el mar, inundaciones, erupciones volcánicas o el fenómeno de "El Niño", entre otros.

Los instrumentos GOMOS, MIPAS y SCIAMACHY tienen la misión de sondear y cartografiar la atmósfera, con el fin de determinar las concentraciones de gases de efecto invernadero o los contaminantes industriales, y seguir la evolución del agujero en la capa de ozono. SCIAMACHY analizará también los efectos de los incendios forestales, de las tormentas de polvo y las erupciones volcánicas.

El espectrómetro MERIS captará los colores de los mares y océanos, de forma que verá, por ejemplo, el paso del azul normal al rojo característico de la proliferación de algas, identificará los diferentes estadios en el crecimiento de las plantas y medirá los niveles de clorofila.

Uno de sus instrumentos de observación terrestre es el denominado ASAR (Advanced Synthetic Aperture Radar) que opera en la banda C de las microondas. Este sensor activo puede operar en distintos modos y resoluciones para adquirir información de relevancia tanto en la superficie oceánica como en tierra firme.

Entre otros, el ENVISAT dispone de 4 sistemas que pueden interesarnos: DORIS, RA-2, MWR y LRR.

3.1.1 El sistema DORIS:

Si observamos la figura anterior la antena de izquierda es la antena del sistema DORIS. Un sistema que consta de:

- Un receptor con dos cadenas de recepción.
- Un oscilador de cristal ultraestable.
- Una antena omnidireccional bibanda.
- Una unidad de control

Cada 10 segundos el receptor mide el cambio de Doppler de las señales transmitidas continuamente desde balizas en tierra en las frecuencias de 2036.25 MHz y 401.250 MHz. El oscilador del sistema DORIS obtiene la referencia de las mediciones de forma súper fiable.

Los receptores del satélite pueden seguir dos balizas simultáneamente.

3.1.2 El sistema RA-2

Este emite un poco mas arriba, en 13.575 GHz (banda Ku) y 3.2 GHz (Banda S).

Participaron en este proyecto Austria, Bélgica, Canadá, Dinamarca, Francia, Finlandia, Alemania, Italia, Holanda, Noruega, España, Suecia, Suiza y el Reino Unido.

Un ejemplo de la utilización de este satélite es el derrame petrolero del Buque Prestige, que se explicará en el Capitulo 6.

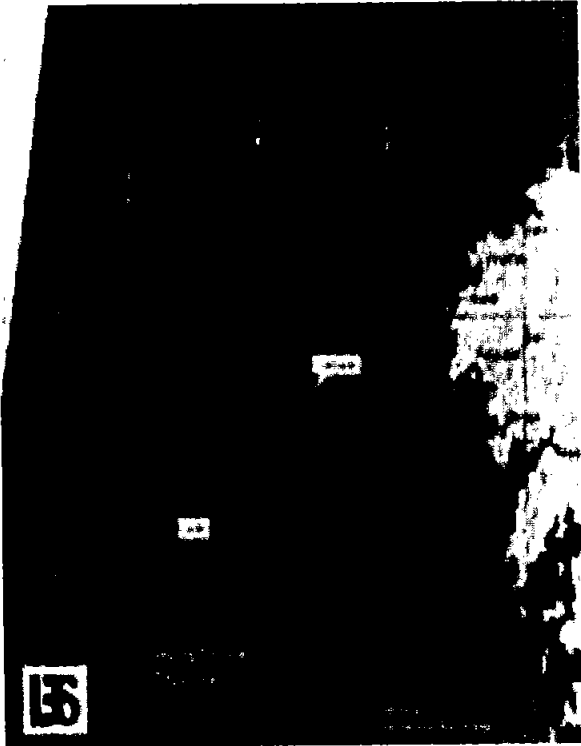


Imagen del satélite Envisat obtenida el 17 de noviembre del 2002. El petrolero Prestige fue dejando un reguero de fuel, como se aprecia en la imagen que tiene superpuesta la trayectoria que siguió hasta que se hundió el 19 del mismo mes. Se aprecia cómo la dirección de la corriente, del oeste, desplazó en tan sólo un día varios kilómetros la mancha hacia el este. La dirección de la corriente (en rojo) es debida al giro que sufre, de 45 grados, con respecto a los vientos que la originaron, del suroeste (en azul). La mancha situada en $42^{\circ} 30'N$, $9^{\circ} 30'W$ llegaría a las costas del

río de Muros y Noia en la madrugada del lunes 18. En esta imagen se aprecia ya la zona afectada de la Costa da Morte (Muxía, Camariñas, Camelle, Laxe).

Como curiosidad podemos apreciar una serie de puntos brillantes en el centro de la imagen. Que corresponde a los barcos de gran tonelaje en el corredor Atlántico, paso obligado de todos los barcos con mercancías peligrosas que navegan desde el Atlántico Sur, o Mediterráneo hacia Europa.

3.2 ERS 1 y 2

3.2.1 ERS-1

Fue construido por la Agencia Espacial Europea (ESA), el ERS-1 fue lanzado del centro espacial de Guyana Francesa por el cohete Ariane-4 el 16 de julio de 1991. Originalmente con una misión de dos años, los objetivos estaban orientados principalmente a estudios oceánicos y de heladas, en varias áreas de ciencias naturales.

Entre los diferentes sensores a bordo del satélite, se tiene el AMI (Active Microwave Instruments), constituido por un radar de Abertura Sintética (SAR) y un escaterómetro (para medición de vientos). Las imágenes adquiridas por el SAR, suministran datos de una faja de 100 x 100 Km, con una resolución espacial de 30 metros.

Una antena de 10 x 1 metros emite y recibe un haz de microondas en la región de 5.3 GHz (banda C), con polarización VV y un ángulo de incidencia de 23 grados.

La operación del SAR en modo Imagen produce una tasa de datos muy alta (105 Mbps), haciendo que las imágenes sólo puedan ser generadas en zonas equipadas con estaciones receptoras. La superficie terrestre podrá estar enteramente cubierta e imageada en ciclos de 35 días.

3.3 LANDSAT

El sistema LANDSAT está compuesto hasta el momento por 5 satélites, que fueron desarrollados por la NASA (National Aeronautics and Space Administration), inicialmente recibieron el nombre Earth Resources Technology Satellite-1 (ERTS-1) y en enero de 1975 pasaron a ser llamados LANDSAT.

El Landsat1 y 2 llevaban a bordo dos sistemas sensores con la misma resolución espacial, pero con diferentes concepciones de imageamiento: el sistema RBV, con imageamiento instantáneo de toda la escena y el sistema MSS, con imageamiento del terreno por barrido de líneas (line-scanner).

Ambos sistemas tenían la finalidad de adquirir datos multiespectrales, pero el desempeño del sistema MSS, en términos de fidelidad radiométrica, hizo que el tercer satélite de la serie tuviera un sistema RBV modificado, de modo de proveer datos con mejor resolución espacial en una única faja del espectro. Por otro lado, se adicionó una banda espectral al sistema MSS, para operar en la región del infrarrojo termal.

A partir de los Landsat4 y 5, en vez del sensor RBV, la carga útil del satélite pasó a contar con el sensor TM (Thematic Mapper), operando en 7 bandas espectrales¹. Este sensor conceptualmente es semejante al MSS ya que es un sistema de barrido de líneas (line-scanner), pero presenta una serie de mejoras tanto en los componentes ópticos como en los componentes electrónicos.

3.3.1 Imageador RBV

RBV (Return Beam Vidicon): es un sistema semejante a una cámara de televisión y permite el registro instantáneo de un área del terreno. La energía proveniente de toda la escena sensibiliza la superficie fotosensible del tubo de la cámara y durante un determinado tiempo, la entrada de energía es interrumpida por un obturador, para que la imagen del terreno sea barrida por un haz

¹ Las bandas espectrales del ENVISAT 7, se describen en el apéndice C.

de electrones. La señal de vídeo puede ser transmitida teleméricamente.

3.3.2 Imageador MSS

MSS (MultiSpectral Scanner): es un sistema sensor que permite el imageamiento de líneas del terreno en una faja de 185 Km., perpendicularmente a la órbita del satélite. El barrido del terreno es realizado con ayuda de un espejo que oscila perpendicularmente al dislocamiento del satélite. Durante la oscilación del espejo, la imagen del terreno, a lo largo de la faja, es captada por una matriz de detectores. La dimensión de cada detector que compone la matriz de detectores, es responsable por el campo de visión instantáneo (área de la superficie de la Tierra observada por cada detector). La energía registrada por cada detector es transformada en una señal eléctrica y posteriormente es transmitida para las estaciones en la Tierra.

A cada oscilación del espejo, el satélite se disloca a lo largo de la órbita, para proporcionar un imageamiento continuo del terreno. El movimiento de rotación de la Tierra ocasiona un pequeño dislocamiento del punto inicial del barrido para el oeste, a cada oscilación del espejo, o sea, a cada seis líneas imageadas. Si se considera el dislocamiento de 185 Km. a lo largo de la órbita del satélite, hay un dislocamiento de 12,5 cm entre la primera y la última columna de píxeles.

3.3.3 Imageador TM

TM (Thematic Mapper): es un sistema avanzado de barrido multiespectral concebido para proporcionar: resolución espacial más fina, mejor discriminación espectral entre objetos de la superficie terrestre, mayor fidelidad geométrica y mejor precisión radiométrica con relación al sensor MSS.

La energía proveniente de la escena alcanza el espejo de barrido que oscila perpendicularmente a la dirección de dislocamiento del satélite en sentido este-oeste y oeste-este. La señal atraviesa un telescopio y un conjunto de espejos, cuya función principal es corregir la señal colectada por el espejo de

barrido. De esta manera, la señal detectada en cada matriz de detectores de cada banda es transferida para un amplificador y convertida en una señal digital a través de un sistema A/D (analógico/digital). Los datos de salida son entonces transmitidos vía telemetría.

3.4 SPOT

El sistema SPOT es un programa espacial francés semejante al programa Landsat, que fue concebido por el Centre National d'Etudes Spatiales (CNES) y lleva a bordo dos sensores de alta resolución (HRV - HAUT Resolution Visible). Estos sensores fueron concebidos para operar en dos modos diferentes. El modo multispectral permite la adquisición de datos en tres bandas del espectro electromagnético con una resolución espacial de 20 metros y el modo pancromático con una banda de resolución espacial de 10 metros.

Una de las características principales de los instrumentos a bordo del SPOT es la posibilidad de observación "off-nadir". El sensor podrá ser direccionado de modo de observar escenas laterales a la órbita en la que se encuentra el satélite en un momento determinado. Esta posibilidad de observación "off-nadir" aumenta los medios de obtener un aumento en el recubrimiento repetitivo de determinadas áreas. Otra ventaja de la vista "off-nadir" es la posibilidad de obtener pares estereoscópicos de determinadas áreas.

La luz proveniente de la escena alcanza un espejo plano, que puede ser controlado a partir de las estaciones terrestres variando en ángulos de $\pm 0.6^\circ$ hasta 27° con relación al eje vertical.

La energía que alcanza el espejo plano es captada por una matriz lineal de detectores del tipo CCD (Charge-Coupled Device). Cada matriz consiste en 6000 detectores ordenados linealmente, formando lo que se denomina "push-broom scanner" o sistema de barrido electrónico. Este sistema permite el imageamiento instantáneo de una línea completa en el terreno,

perpendicularmente a la dirección de dislocamiento del satélite en su órbita.

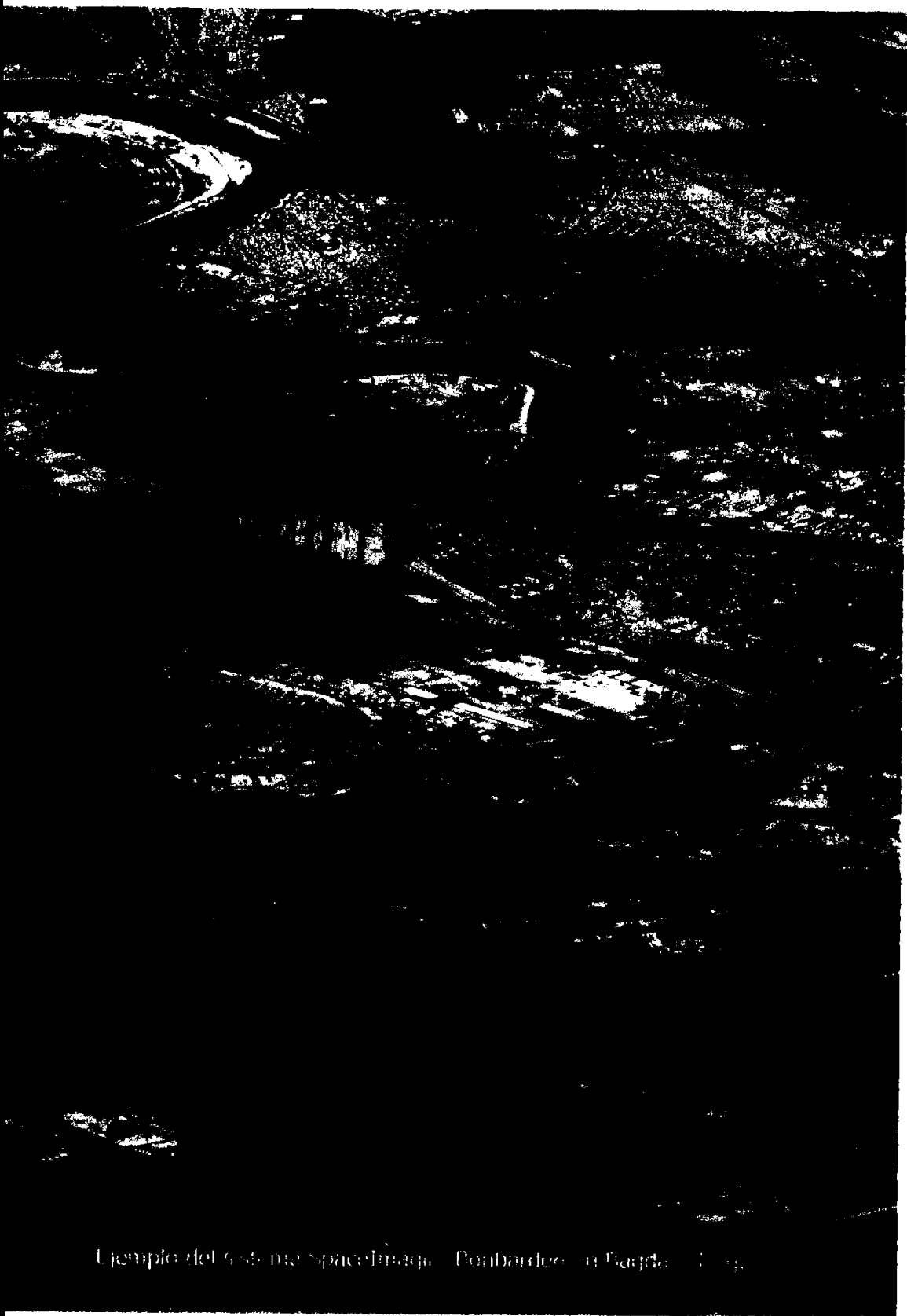
3.5 IKONOS



Se lanza el 24 de Septiembre de 1999, el satélite es presentador de telemando de propaganda de Imagen de Espacio IKONOS, inclusive el despliegue de su sistema digital de cámara diseñado y construido por Kodak, marca el comienzo de la era esperada desde hace mucho tiempo de una de las mejores resoluciones de imágenes terrestres.

Satélite IKONOS.

Desarrollado para Thornton, Colorado, basándose en SpaceImaging durante 54 semanas, el integrado imaginado para la carga útil habilita a IKONOS a reunir en pancromático (escala de gris) los datos de la imagen de la Tierra en un metro de resolución; y los datos multiespectrales (rojo, verde, azul, y cerca del infrarrojo) a 4 metros de resolución.



Ejemplo del sistema SpaceImag. Bombardero en Parícuti. 1991.

La cámara del satélite puede distinguir objetos en el suelo tan pequeños como en un metro en tamaño de 643.7 Km. encima de la Tierra. Con este sistema poderoso de telemando se espera cambiar al público y a la industria privada mundial la manera de ver la superficie de la Tierra y el plan para su futuro. Las imágenes resultantes revelarán los aspectos de la superficie de la Tierra previamente indisponible al mundo comercial. Las imágenes últimamente ofrecerán información nueva a granjeros, planificadores de ciudad, planificadores ambientales, los corredores de bienes raíces, los geólogos, los medios y otros.

3.5.1 La fabricación del Sistema de la Carga Útil

La cámara del espacio de la asamblea electro-óptica se compone de un catalejo ligero, una serie focal del avión, y un compresor de datos -todo diseñado, fabricado y armado por Kodak-.

Todos los espejos reflectores del catalejo han sido terminados paraa usar un plano atómico de uniformidad, una técnica pulidora propietaria conocida como ²figura de ion.

Usando este proceso controlado por la computadora, Ópticos de Kodak formaron el telescopio de 28 pulgadas de diámetro del espejo primario tan perfectamente que si fueron ampliados a 161 Km. en el diámetro, ¿usted podría manejar esa distancia?. La precisión óptica de esta magnitud es lo que habilita este sistema de cámara a producir las imágenes de alta calidad.

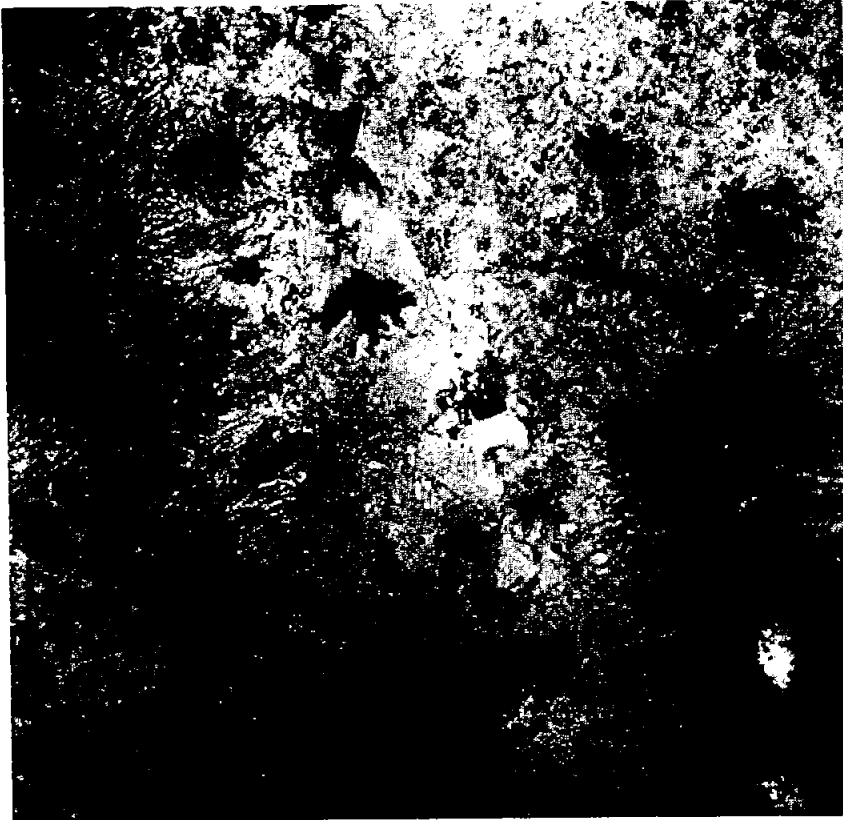
Para desarrollar las cámaras de ojos electrónicos, Kodak acudió a su división de Tecnología de Microelectrónica. Su pericia produjo dos sensores diferentes de la imagen capaces de sobrevivir los rigores del espacio.

Los "ojos" de IKONOS – Kodak está en la tabla imaginando sensores – capturan imágenes a través de 11 Km. estrechos de la superficie de la Tierra. Una vez que esta imagen se obtiene, la

² El Sistema de Figura de Ion de Kodak utiliza un rayo acelerado de iones neutralizados de argón para corregir los errores de superficie ópticos de la figura rápidamente y precisarla al nivel atómico.

Unidad de Proceso Digital de Kodak, comprime y formatea las imágenes digitales para la transmisión del espacio a las estaciones terrenas localizadas a través del mundo.

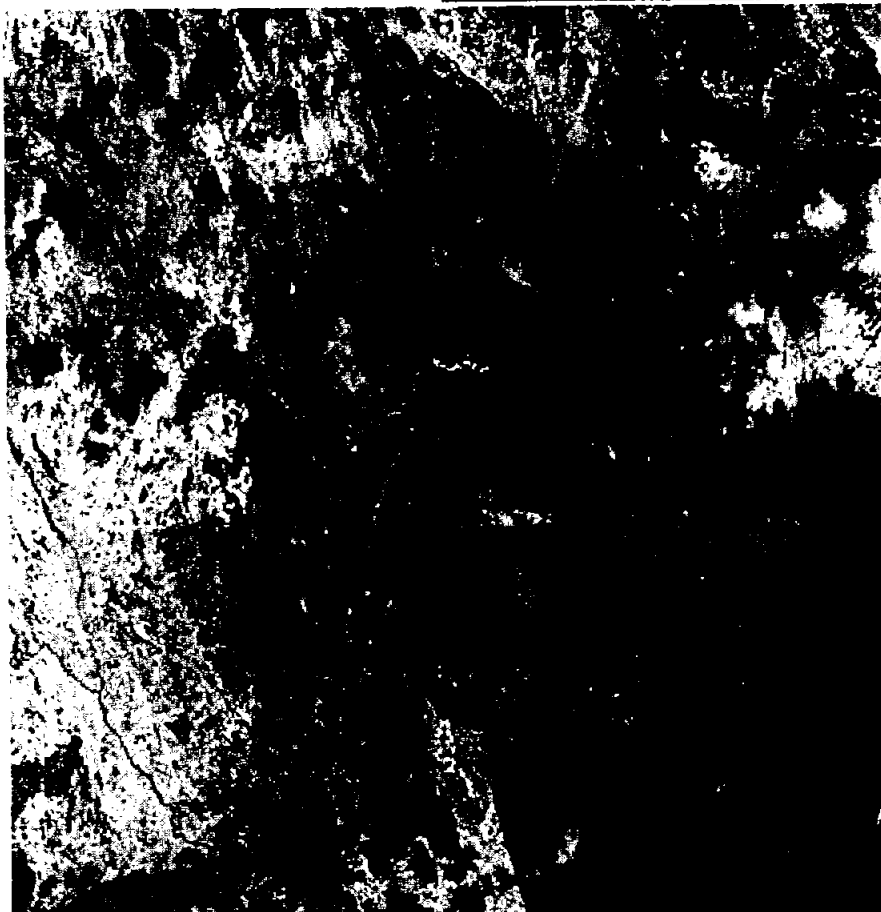
A continuación se muestra una galería de imágenes de los satélites que se presentaron en este capítulo:



Ciudad de México, la capital de la Ciudad de México tiene una población de 18 millones de habitantes. Tomada por Landsat 7.



Esta imagen de Bagdad, Iraq, fue tomada el 2 de abril del 2003. Fue recolectada por el Landsat 7 "True Color" bandas 3-2-1



Esta toma del Landsat7 es la escena de una nube rara liberando la vislumbre de la estructura del impacto de Manicouagan en Québec, Canadá. El lago Manicouagan y el lago Musalagan rodean la sustentación central del cráter. El diámetro original del cráter era de 100 Km., y la edad de unos 214 millones de años. Shattercones, la fractura formada en rocas estriadas deformes por el paso de las ondas del golpe y las piedras quebrantadas, confirman el origen del impacto del cráter. Varios avances glaciares han dañado el cráter a su forma presente. Algunos científicos creen que este impacto fue responsable de una extinción de masa asociada con la pérdida áspera del 60 % de toda especie. Se ha propuesto que el impacto fue creado por un asteroide con un diámetro de acerca de cinco kilómetros.

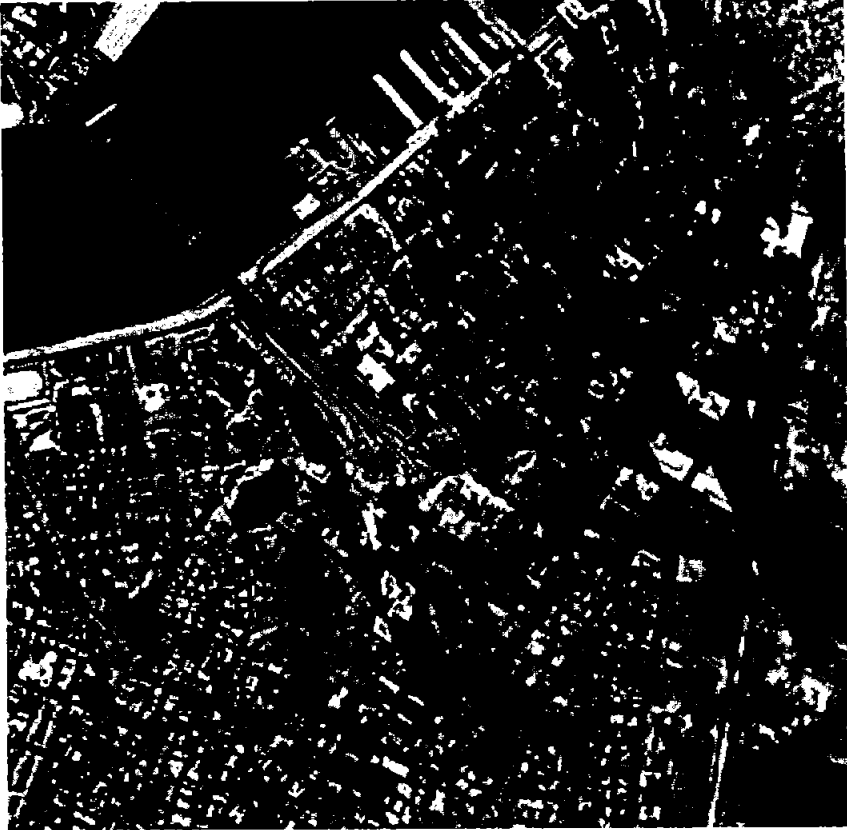


Imagen en blanco y negro de Manhattan, Nueva York; incluye el puente de Brooklyn y el Worl Trade Center de Nueva York. Tomada por el satélite IKONOS, el 5 de Noviembre de 1999.

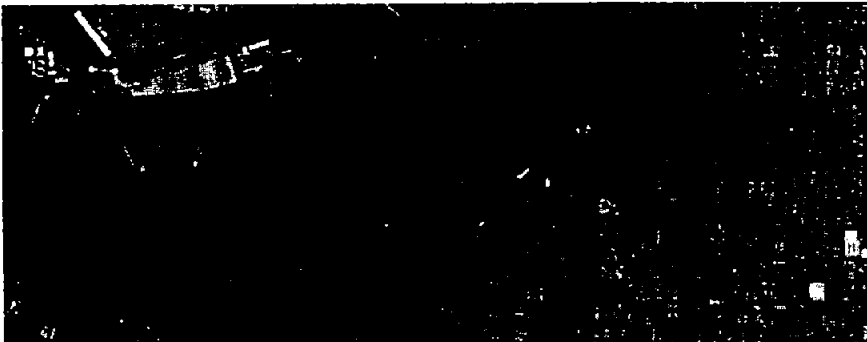


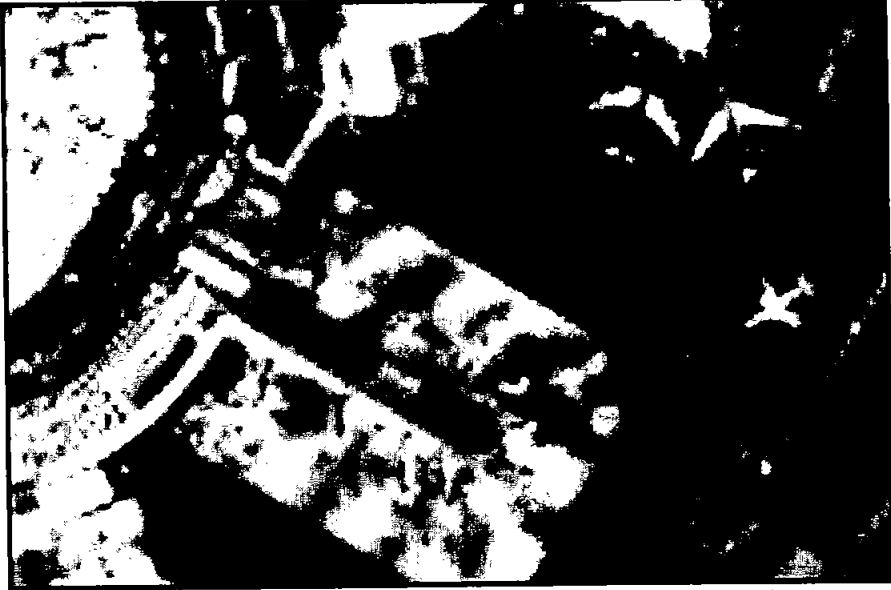
Imagen blanco y negro de Washington, DC. Captado por el satélite IKONOS, el 12 de Octubre de 1999.



El Cairo, Egipto. Representando el río Nilo y áreas subterráneas y agrícolas.
Tomada por IKONOS, el 5 de Noviembre de 1999.



Imagen del Pentágono, USA; a las 11:46 a.m. el 12 de Septiembre de 2001, por IKONOS. Muestra el daño extenso al lado occidente y anillos interiores de la multiconstrucción.



El panorama de cinco metros de resolución. Vista de pilotos que chocan.



Vista con un metro de resolución. Pilotos que chocan

Imágenes tomadas por IKONOS. Choque de dos aviones en un Aeropuerto de Estados Unidos.

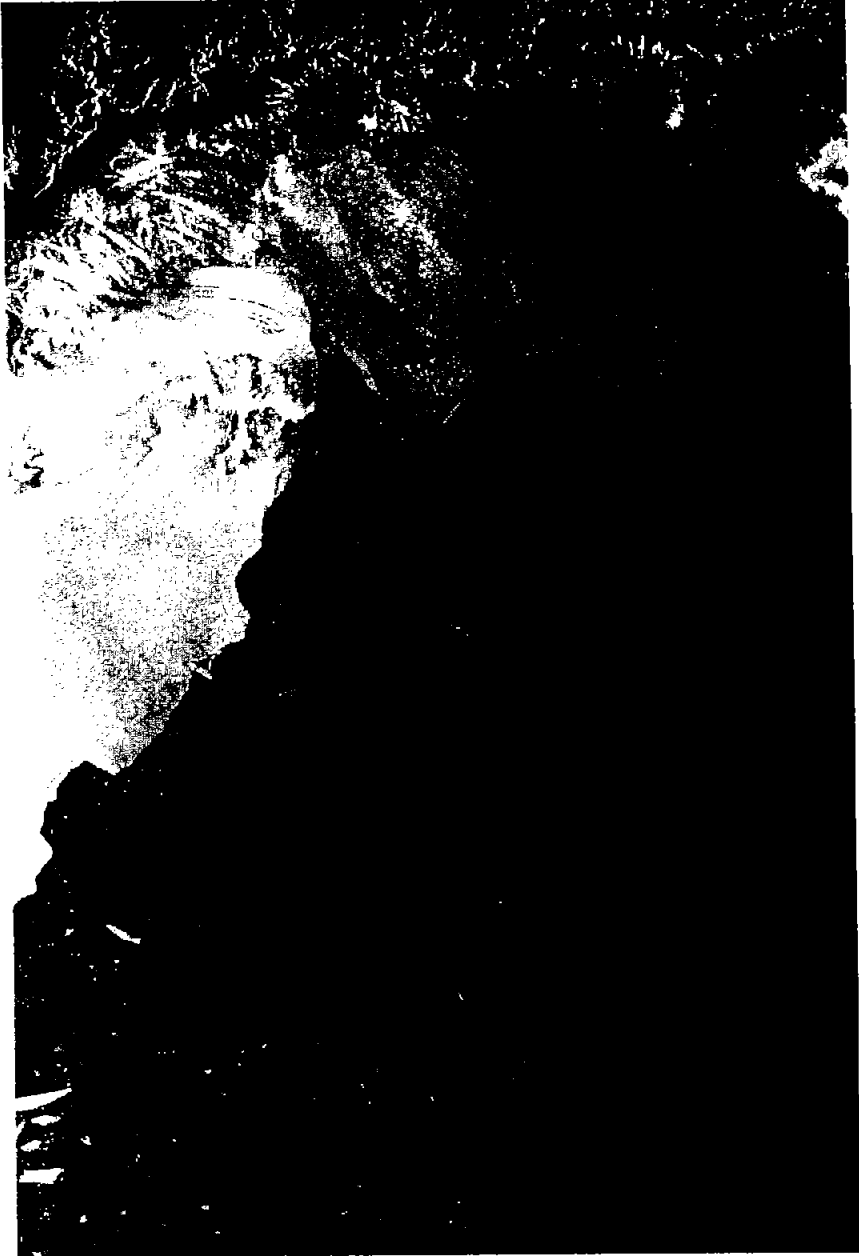
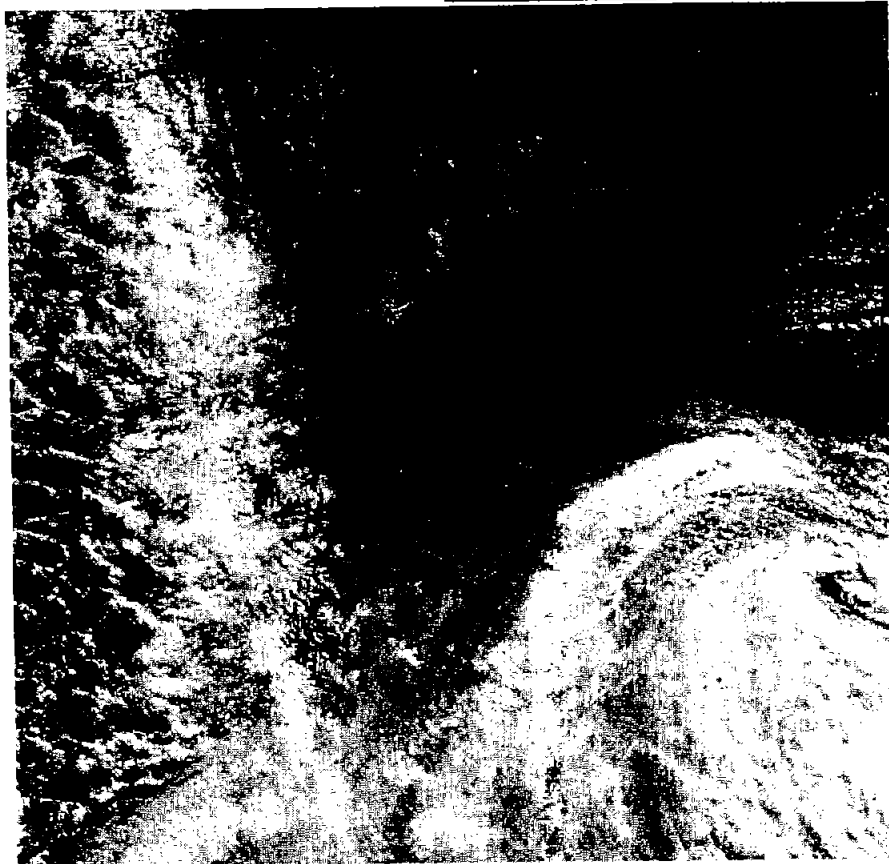


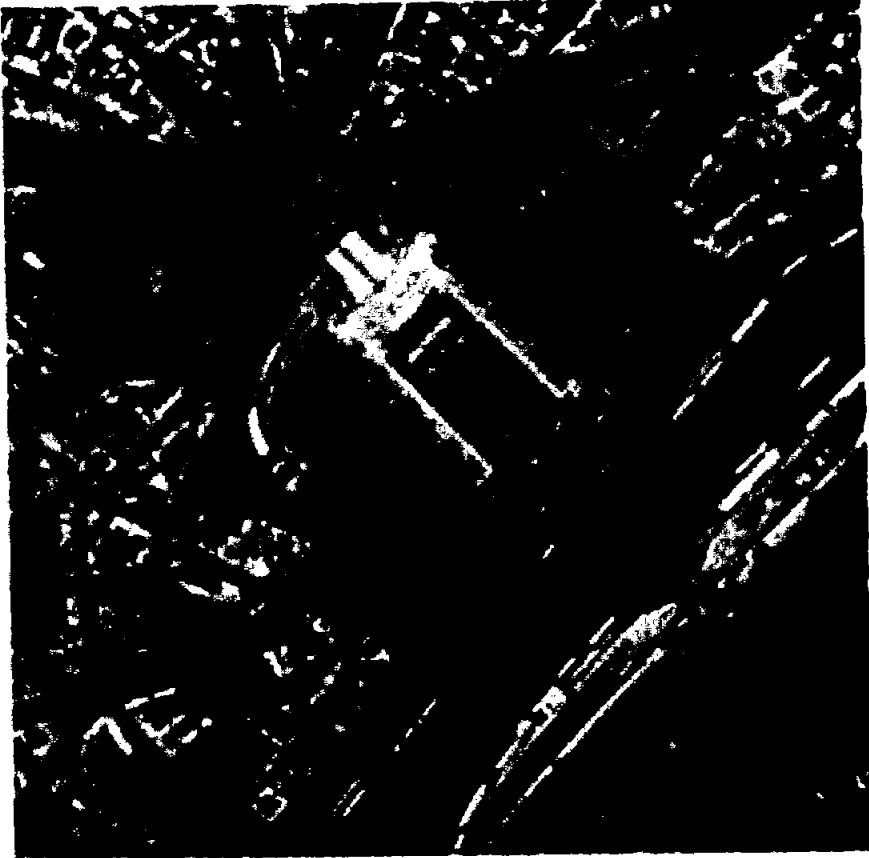
Imagen ASAR, tomada por el ENVISAT. Península Antártica, tomada el 19 de Marzo de 2002.



Bolivia y Chile, MERIS, 23 de Abril de 2002, 300m de resolución.
ENVISAT.



Argentina, MERIS, 24 de Marzo de 2002, 300m de resolución. ENVISAT.



Paris (Trocadero, Río Sena y la Torre Eiffel), simulado por SPOT 5, 5m de resolución.

4. ANÁLISIS TEXTURAL

Los mecanismos físicos que se aplican en los procesos de la formación de la imagen de SAR e imágenes ópticas son diferentes. De ahí, las técnicas que se requieren para la interpretación de estas también son diferentes. La textura de una región de la imagen depende de la relación entre niveles de grises al colindar los píxeles. Las características de la textura se derivan comúnmente de la Matriz Plana de Coocurrencia en Niveles de Gris (GLCM), que es una matriz de frecuencias P relativas con dos píxeles vecinos separados por una distancia s en la imagen, uno con nivel gris uno y el otro con el nivel gris B .

En este capítulo conoceremos la Matriz Plana de Coocurrencia en Nivel de Gris, operaciones con Histogramas y el Vector de Diferencia en Nivel de Grises.

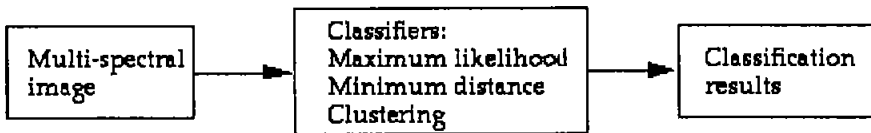
4.1 Matrices de coocurrencia en niveles de gris (GLCM)

En la descripción de imágenes, el color del píxel y el brillo se utilizan comúnmente como parámetros. Un parámetro menos utilizado a menudo es la textura (grain). Así como la formación del color y el brillo (que se asocian con 1 píxel), la textura esta compuesta de un conjunto de píxeles conectados.

Hay varios métodos para medir la textura matemáticamente. Uno de ellos se basa en la Matriz Plana (GLCM siglas en inglés), llamada *Matriz de Coocurrencia en Niveles de Gris*. Una GLCM es un histograma de dos dimensiones de niveles de grises en un par de píxeles (Ref, Nbr) que son separados por una relación espacial fija (s). El GLCM se aproxima a una distribución conjunta de la probabilidad de un par de píxeles. La mayor parte de las mediciones de GLCM se realizan por computadora. Además, algunas medidas de la textura se computan de un *Vector de Diferencias en Niveles de Gris* (GLDV), que se deriva de la GLCM. Este se estudiará más adelante.

4.1.1 Algoritmos No Convencionales de la Clasificación

Por la clasificación convencional, nosotros nos referimos a los algoritmos que hacen el uso de sólo multi información espectral en el proceso de la clasificación.



Esquema 1

El problema con multi imagen espectral en el proceso de la clasificación es que ninguna información espacial en la imagen se ha utilizado. De hecho, eso es la diferencia entre interpretación humana y clasificación asistida por ordenador de imagen. La interpretación humana siempre implica el uso de información espacial tal como textura, la forma, la sombra, el tamaño, el sitio, etc. de asociación. Mientras que la fuerza de técnica de computadora está en el manejo de los valores del nivel gris en la imagen, en términos de utilizar información espacial, demora la técnica de computadora. Por lo tanto, es un campo activo en la comprensión de la imagen (que da la pauta de un subcampo del reconocimiento, o la inteligencia artificial de utilizar las pautas espaciales en una imagen).

Podemos resumir tres tipos generales de la clasificación no convencional:

- a) El enfoque de preproceso,
- b) El poste, procesar el enfoque, y
- c) El uso de clasificación contextual.

El esquema 1 muestra los procedimientos implicados en un método de preproceso. La parte indispensable de un método de la clasificación de preproceso es el involucramiento de procedimientos de característica espacial de extracción.

Gracias al desarrollo en el campo de la comprensión de la imagen, podemos utilizar la parte de la información espacial en la clasificación de la imagen. En términos generales, hay dos tipos de enfoques para utilizar la información espacial.

- La clasificación basada en la región.
- La clasificación basada en la ventana de píxel.

4.1.1.1 Clasificación basada en la Región

Para clasificar objetos, uno tiene que dividir de algún modo las imágenes originales. Esto se puede hacer con las técnicas de segmentación de imagen, tal como *resolución, creciente de región y arracimar*.

Teniendo la imagen dividida resultante se puede pasar al procedimiento de la extracción de la región, donde se tratan los segmentos totales del objeto para el procesamiento sucesivo.

Por ejemplo, nosotros podemos engendrar una tabla para cada objeto como una tabla de entidad. De la tabla de la entidad, nosotros podemos avanzar con varios algoritmos para completar la clasificación, o antes de clasificar, nosotros podemos hacer algún preproceso, tal como filtrar algunos objetos pequeños.

4.1.1.2 Clasificación basada en la ventana de píxel

En una clasificación basada en la ventana de píxel, se toma una decisión que es causada por el marcado de un píxel según los datos del multi espectral. Estos datos contienen información no sólo en el píxel sino también su vecindario.

Una ventana de píxel puede ser de cualquier tamaño, tan largo sin que exceda el tamaño de la imagen. No se pueden calcular sencillamente, sin embargo, los cuadrados calibrados impares se utilizan (Fig. 1).

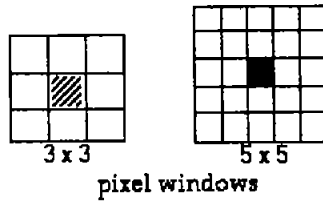


Figura 1. Ventanas de medición.

La variabilidad plana del gris dentro de una ventana de píxel se puede medir y puede ser utilizada en un algoritmo de la clasificación. La variabilidad plana del gris es referida como la **textura** (Haralick, 1979).

El empleo de la técnica GLCM emplea los siguientes pasos. La probabilidad de Coocurrencia entre dos niveles de gris i y j dan una orientación relativa (α) y una distancia (D) que puede ser computadas para todas las posibilidades de coocurrencia de los pares de niveles de gris en una ventana de la imagen (Fig. 2).

$D = 1 \quad \alpha = 45$

0	0	1	1	2
0	0	1	2	2
1	1	1	1	0
3	2	1	0	0
3	1	1	0	0

0	1	2	3	
0	2	3	0	0
1	3	2	3	0
2	1	1	0	0
3	0	1	0	0

Grey levels in a
pixel window

Figura 2. Ventana de 5 x 5 con cuatro niveles de grises (0-3).

La orientación relativa entre píxel es usualmente colocada de cualquier forma $\{0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ\}$ o con un promedio de las orientaciones. Los pares orientados coocurriendo en 0° son también orientados a 180° , lo que genera una GLCM simétrica. Estos conceptos se extienden a $45^\circ, 90^\circ$, y 135° también.

El contraste

Esto es lo contrario de la Homogeneidad. Es una medida de la cantidad de la variación local en la imagen. Es alto cuando la región local tiene un contraste alto en la escala espacial.

$$MCONTR = \sum_i \sum_j (i - j)^2 \cdot \hat{P}(i, j)$$

Desemejanza

Semejante al contraste. Alta cuando la región local tiene un contraste alto.

Mean

Es la media del nivel de gris en la ventana local.

$$MMEAN = \sum_i \sum_j i \cdot \hat{P}(i, j) = \mu$$

La Desviación Típica

Es la desviación típica plana de gris en la ventana local. Es alta cuando hay una desviación típica plana de gris y grande en la región local.

Entropía

Es alta cuando los elementos de GLCM tienen los valores relativamente iguales. Es baja cuando los elementos son cerca de 0 o 1 (y/o cuando la imagen es uniforme en la ventana).

$$MENTRO = \sum_i \sum_j -\hat{P}(i, j) \cdot \log\{\hat{P}(i, j)\}$$

Segundo Momento Angular

Es lo contrario de la entropía. Es alto cuando el GLCM tiene pocas entradas de la magnitud grande, y bajo cuando todas las entradas son casi iguales. Es una medida de la homogeneidad local.

La Correlación

Mide la dependencia lineal de niveles de grises al colindar los píxeles. Cuándo la escala de la textura local es mucho más grande que la distancia espacial, la correlación es típicamente alta. Cuándo la textura local tiene una escala semejante a 0 o más pequeña que la espacial, habrá una correlación baja entre pares de píxeles.

$$MCORR = \sum \sum (i - \mu) \cdot (j - \mu) \cdot \hat{P}(i, j)$$

Cluster Shade

$$MSHADE = \sum \sum (i + j - 2\mu)^3 \cdot \hat{P}(i, j)$$

Cluster Prominente

$$MPROM = \sum \sum (i + j - 2\mu)^4 \cdot \hat{P}(i, j)$$

Donde: (i, j) son las coordenadas del píxel.

$\hat{P}(i, j)$ es el valor del nivel de gris

μ es la media de la ventana

Como se mostró anteriormente, algunas de las medidas texturales están relacionadas con características específicas de textura de la imagen, tal como el tamaño del elemento de la textura y el contraste. Las otras caracterizan la complejidad y la naturaleza de las transiciones planas de grises que ocurren en la imagen. Aunque estas características contienen información acerca de las texturas de la imagen, es difícil (más no imposible) identificar cuál característica específica de textura es representada por cada una de estas características.

4.2 Suma y diferencia de Histogramas (SADH)

Una desventaja principal de usar la aproximación de GLCM es la exigencia de memoria grande para almacenar las matrices de coocurrencia. User (1986) propuso el método SADH (*Sum and Difference Histogram Approach*) en el cual la probabilidad de segundo orden de la función de una matriz de coocurrencia es substituida por las estimaciones de la probabilidad de primer orden, funciones a lo largo de los "ejes principales" de la matriz de coocurrencia. Estos son las distribuciones de la suma y la diferencia de los márgenes en la matriz de coocurrencia. Geométricamente, estas combinaciones lineales representan la selección de un nuevo sistema de coordenadas, I y la J como los ejes de coordenadas. Los ejes principales proporcionan una descripción simple de la estructura de covariancia.

El procedimiento es similar a la aproximación de GLCM. Para el par (I, J) , las variables aleatorias $K=I+J$, $L=I-J$ son definidas. Entonces en las separaciones de píxel de $d = 1, 2, 4, 8, 16$, y 64 , dos funciones de densidad $P_d^S(K)$ y $P_d^D(L)$ son generados, lo cual son la suma y diferencia de histogramas, respectivamente. Los histogramas son normalizados dividiendo las frecuencias individuales por la suma de frecuencias de los componentes en cada vector. En este método, el umbral del rango de los niveles de grises son los valores máximos de 127 para histogramas de diferencia y los valores máximos de 255 para histogramas de suma. Esto causa un alivio del almacenaje y la carga computacional, comparado con la aproximación de GLCM.

Las medidas antes citadas para la GLCM, se muestran ahora para SADH.

Mean

La media esta dada por

$$\mu_s = \sum_k k P^S(k)$$

$$SMEAN = \frac{1}{2} \mu_s$$

Contraste

El contraste es el cuadrado ponderado diferencial y es una medida natural del grado de extensión en los niveles de grises, en una d de distancia fija. Un valor pequeño de contraste indica la alta concentración de acontecimientos sobre la diagonal principal y representa una textura gruesa.

$$SCONTR = \sum_l l^2 P^D(l) = \sigma_D^2$$

Segundo Momento Angular

El segundo momento angular es una medida de homogeneidad en la escena. Esta medida es la más pequeña cuando los niveles de grises son igualmente probables. El ASM grande, por otra parte, indica que hay algunos niveles dominantes de grises.

$$SASM = \sum_k [P^S(k)]^2 \sum_l [P^D(l)]^2$$

Correlación

La correlación puede ser representada como

$$\text{SCORR} = \frac{1}{2} \left[\sum_k (k - \mu_s)^2 P^S(k) - \sum_l l^2 P^D(l) \right] / \sigma^2$$

El cual, bajo la aproximación normal es equivalente a la correlación $\text{CORR}(I, J)$ del acercamiento de GLCM. El característica de SCORR se acerca sobre la CORR, quitando la necesidad del cómputo explícito bidimensional de éste. La correlación es una medida del nivel de gris de dependencias lineales en la escena de pares de píxeles separados por una distancia fija en una dirección dada.

Entropía

La entropía es una medida de desorden en la escena. Es lo más grande para niveles igualmente distribuidos de grises y más pequeño cuando son desigualmente distribuidos.

$$\text{SENTRO} = - \sum_k P^S(k) \log(P^S(k)) - \sum_l P^D(l) \log(P^D(l))$$

Homogeneidad Local

La homogeneidad local es el momento de diferencia inversa, representando una medida de semejanza local. Una textura gruesa tiene un valor más grande de homogeneidad local que una textura fina.

$$\text{SHOMOG} = \sum_l P^D(l) / (1 + l^2)$$

Cluster Shade para la suma

El cluster shade es una medida del grado para el cual el outliers en el histograma favorece un lado u otro. Esto es una indicación de asimetría u oblicuidad en la distribución.

$$\text{SSHAD}E = \sum_k \frac{(k - \mu_s)^3 P^S(k)}{\sigma_s^{3/2}}$$

Cluster Prominente para la suma

El cluster prominente, también llamado *exceso*, mide el efecto de los perfiladores sobre el pico de la distribución, el grado "alcanzando su punto máximo". Un valor de cero indica alcanzare un punto máximo igual a el de una distribución normal.

$$SPROM = \left[\sum_k (k - \mu_s)^4 PS(k) \right] / \sigma^2 - 3$$

4.3 Aproximación del Vector Diferencia de Niveles de Grises (GLDV)

El *Gray Level Different Vector* (GLDV) está basado en las diferencias absolutas entre los pares de niveles de grises. Con la misma dependencia implícita en la d de desplazamiento y la ϕ de ángulo, el vector diferencia de la función de densidad $P^A(M)$ esta definido para $M = |I - J|$. Es normalizado dividiendo las frecuencias de nivel de grises de la ocurrencia entre las frecuencias totales. Con imágenes de MSS, Landsat, el vector desplazamiento valora la gama de M de 0 a 127.

Las características de GLDV están definidas abajo.

Mean

$$DMEAN = \mu_A = \sum_m m P^A(m)$$

Desviación estándar

$$DSD = \sigma_A = \left[\sum_m (m - \mu_A)^2 P^A(m) \right]^{1/2}$$

Contraste

$$D\text{CONTR} = \sum_m m^2 P^A(m)$$

Segundo Momento Angular

$$D\text{ASM} = \sum_m [P^A(m)]^2$$

Entropía

$$D\text{ENTRO} = -\sum_m P^A(m) \log P^A(m)$$

Homogeneidad Local

$$D\text{HOMOG} = \sum_m P^A(m) / [1 + m^2]$$

Cluster Shade para la Diferencia

$$D\text{SHADE} = \left[\sum_m (m - \mu_A)^3 P^A(m) \right] / \sigma_A^{3/2}$$

Cluster Prominente para la Diferencia

$$D\text{PROM} = \left[\sum_m (m - \mu_A)^4 P^A(m) \right] / (\sigma_A^2 - 3)$$

Aunque en el Capítulo 6 se analizará un ejemplo del derrame del buque petrolero Prestige, analicemos el siguiente ejemplo para comprender mejor el proceso de la Matriz de Coocurrencia.

En el ejemplo tenemos:

Tres imágenes SAR de un mapa de Finlandia que fueron tomadas por URGENCIAS-1. Las imágenes habían sido rectificadas en las mismas coordenadas, y el tamaño del píxel de las imágenes y el mapa es de 25m. Las fechas de la adquisición fueron:

- Imagen 1: 30 junio, 1993
- Imagen 2: 4 agosto, 1993
- Imagen 3: 23 febrero, 1994

Sólo analizamos la primera imagen, fue en condiciones de verano. Las cosechas de junio crecen en áreas de campo, y en agosto ellas maduran.

El tamaño del área del estudio está alrededor de 14 km x 12 km, y hay varias clases diferentes del uso de la tierra en el área. Los valores de la medida de la textura se investigaron en clases de riego, el campo, el bosque y área urbana. Sólo esos píxeles se incluyeron en el análisis para lo cual el circundante es de 5x5 o 7x7 (dependiendo de la medida de la textura) de ventana. Los caminos dentro del área urbana fueron combinados a la clase área urbana. Las áreas de las clases del uso de la tierra obtenida se pueden ver en la Figura 1.



Figura 1. El agua (azul), el campo (amarillo), el bosque (verde) y áreas urbanas (rojas) en el área del estudio. Los píxeles de la frontera de las clases se excluyeron y los caminos del área urbana se combinaron con el área urbana.

Resultados al aplicar el método estadístico de la Matriz.

Imagen 1

Los histogramas calculados para las cuatro clases del uso de la tierra de la Imagen 1 antes de cualquier cálculo de textura se muestran en la Figura 2. La Figura 3 expone la imagen y los histogramas cuando se valúan los píxeles en una ventana de 5x5, que corresponde al promedio del filtro. Los resultados para los valores de medición de la textura VA, Medio de GLCM, el Contraste de GLCM y GLDV segundo momento Angular se presentan en las Figuras 4-7. Los resultados para VL y U no se muestran para la Imagen 1 porque la separación de clases entre ellos eran muy semejante al VA. Para hacer las comparaciones más fáciles, todas las imágenes y los valores de las medidas de la textura fueron escalados linealmente a un rango de 0-255 antes de calcular los histogramas. Para propósitos de visualización, los valores de los píxeles fueron aún más estrechos, pero esto fue hecho después de calcular los histogramas.

La figura 2. Muestra los histogramas calculados de la Imagen 1.

La figura 3. Muestra la imagen 1 con la valuación de una ventana de 5 x 5.

La figura 4. Muestra la imagen 1 con la medición de la textura VA.

La figura 5. Muestra la imagen 1 con la medición de la textura GLCM.

La figura 6. Muestra la imagen 1 con el contraste de la textura GLCM.

La figura 7. Muestra la imagen 1 con la medida de la textura GLDV segundo momento Angular.

Se puede ver que las posibilidades para separar las clases basadas en los datos originales de la imagen no son buenas (Figura 2). Hay una superposición notable entre valores de clases diferentes, y especialmente las distribuciones del bosque y área urbana son muy semejantes una del otro. Al promediar, mejora la separabilidad porque suaviza la imagen y reduce moteo (Figura 3). En la imagen promediada, los lagos y muchos campos son oscuros y el área urbana es relativamente luz. Sin embargo, hay una superposición todavía significativa entre agua y campo y entre

campos, el bosque y lo urbano. Los resultados de la medida de la textura VA (Figura 4) son aún peor que los de la imagen original. En esta imagen de la textura, el área urbana es más brillante que otras áreas, pero hay muchos píxeles oscuros dentro del área urbana, y las otras tres clases tienen los valores muy semejantes una de otra. Las orillas de los lagos son claramente visibles porque ellos tienen los valores altos. Los resultados del Medio de GLCM (la Figura 5) son semejantes a la imagen promediada (Figura 3). La separabilidad de clase es levemente mejorada, probablemente debido al tamaño grande de la ventana. En la imagen del Contraste de GLCM (Figura 6), los lagos y los campos tienen otra vez los valores más bajos y el área urbana los altos. El GLDV imagen del segundo momento Angular (Figura 7) es diferente de los otros porque las áreas más homogéneas (lagos y campos) tiene los valores más altos. La separabilidad de clases no es mejor.

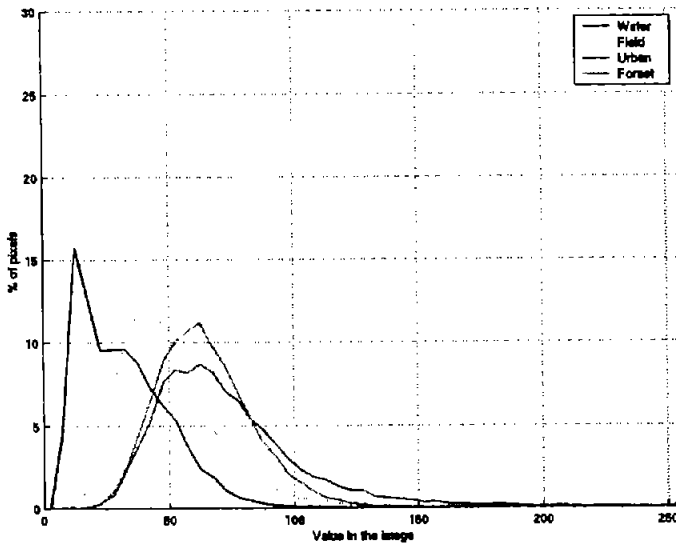


Figura 2. Histogramas calculados de la imagen 1.

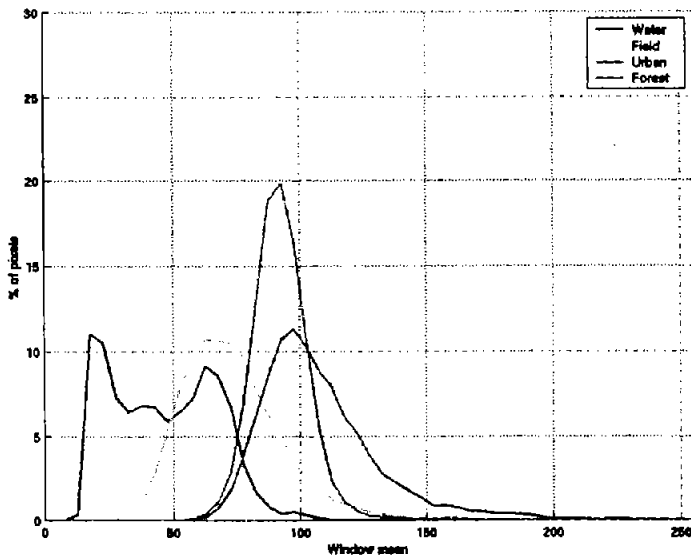


Figura 3. Imagen 1: Evaluación del cálculo de una ventana de 5 x 5.

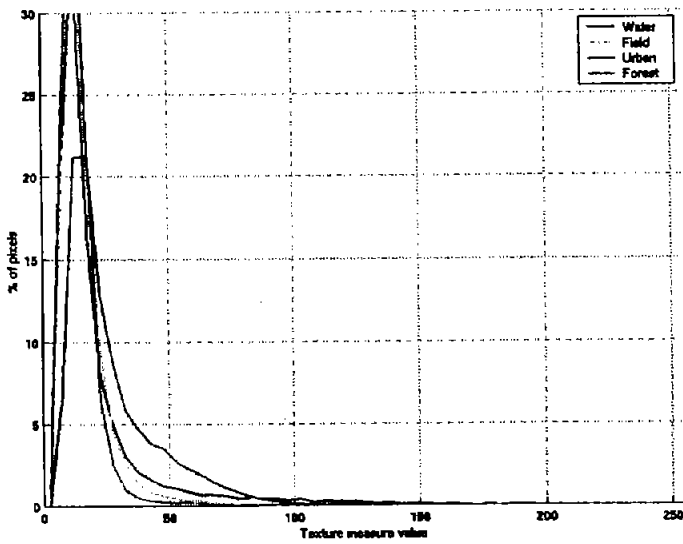
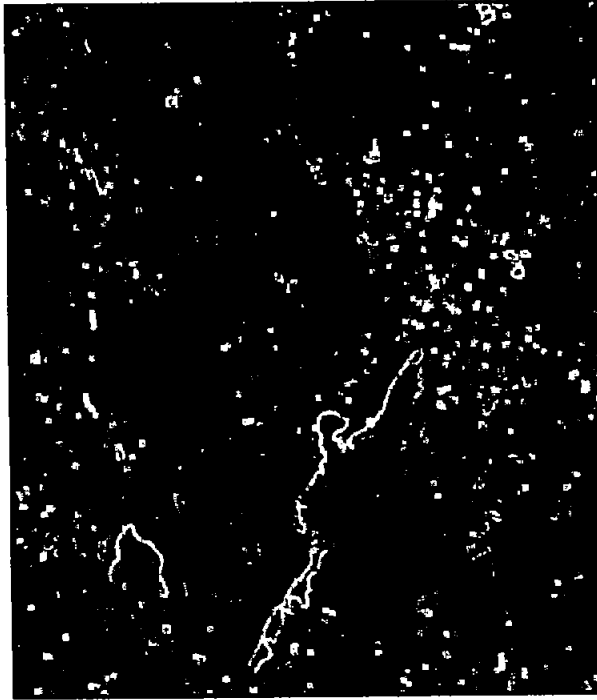


Figura 4. Imagen 1: Medición de la textura VA.

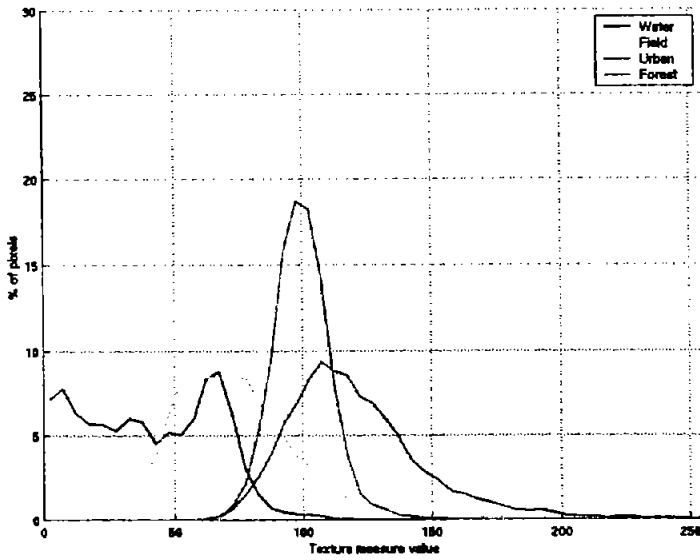
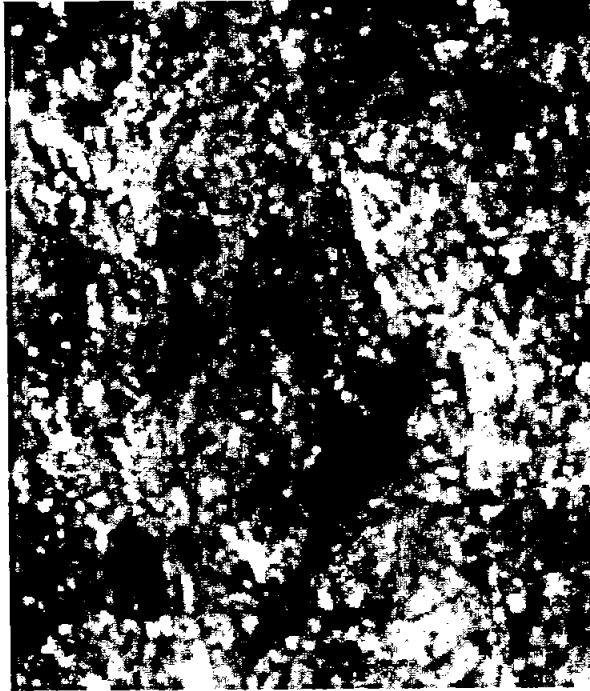


Figura 5. Imagen 1: Medición de la Textura GLCM.

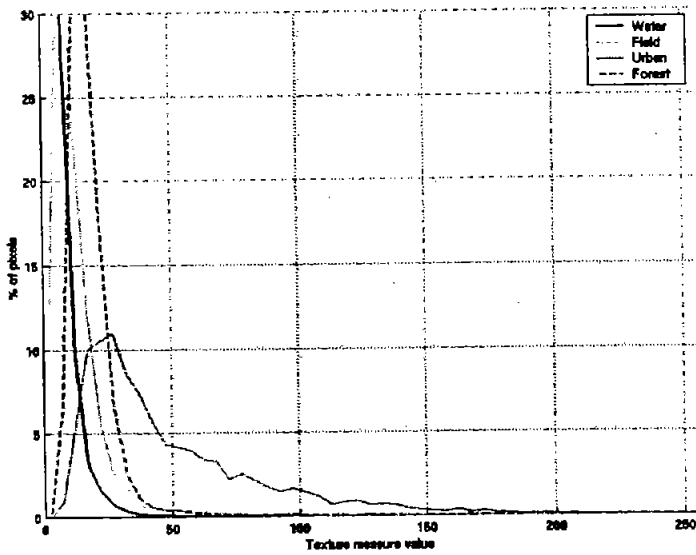


Figura 6. Imagen 1: Medición del contraste de la textura GLCM.

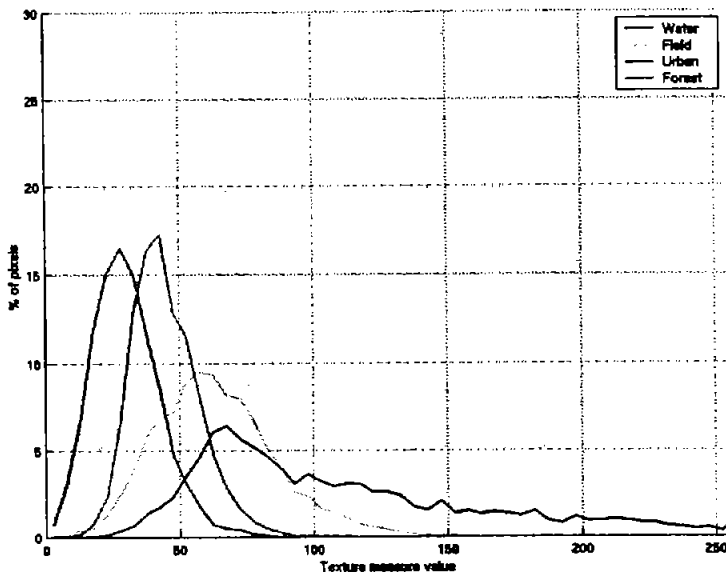


Figura 7. Imagen 1: Medición del Segundo momento angular de la textura GLDV.

5. ESQUEMA DE FISIÓN Y FUSIÓN DE DATOS POR CAMPOS ALEATORIOS DE MARKOV.

En este apartado se hará una revisión de los modelos de Campos Aleatorios de Markov (CAM) en visión, categorizando los distintos problemas de visión como uno de etiquetado, dependiendo de las distintas definiciones de los conjuntos de estados S y etiquetas L . Se introducirá la notación utilizada en los CAM, las principales definiciones que nos permitirá representar un CAM a través de la distribución de probabilidad de Gibbs. Se estudiarán los principales modelos de CAM dependiendo de las diferentes formas de definir sistemas de vecinos y "funciones clíque". Por último se mostrará una aplicación concreta: la definición de un modelo de Campo Aleatorio de Markov para el problema de segmentación de imágenes.

5.1. Antecedentes de los modelos de Campos Aleatorios de Markov en visión

Desde su comienzo en los años 60, la investigación en visión artificial ha ido evolucionando desde el diseño heurístico de algoritmos a la investigación sistemática de aproximaciones para resolver problemas de visión. En la búsqueda de soluciones, los investigadores se han dado cuenta de la importancia de la información contextual para la comprensión de las imágenes. Una escena se entiende en el contexto espacial y visual de los objetos que hay en ella; los objetos se reconocen en el contexto de las "características de objeto" en una representación de bajo nivel; y las características de objeto se extraen en el contexto de los píxeles de la imagen en el nivel más bajo de abstracción.

La teoría de los Campos Aleatorios de Markov (CAM) proporcionada de una manera conveniente, consta de modelar entidades dependientes del contexto tales como píxeles de la imagen y otras características espaciales correlacionadas. El uso

práctico de los CAM se atribuye a la equivalencia entre las distribuciones de probabilidad de los Campos Aleatorios de Markov y de Gibbs. Esto nos permite modelar matemáticamente problemas de visión manejables para el análisis de imagen en el marco bayesiano (1983).

Desde el punto de vista computacional, la característica local de los Campos Aleatorios de Markov conduce a algoritmos que se pueden implementar de una manera local o en paralelo. Estos modelos son atractivos por las siguientes razones:

- Se pueden desarrollar sistemáticamente algoritmos basados en los principios del sonido más que heurísticos ad-hoc para una diversidad de problemas.
- Hace más fácil el cálculo de medidas de ejecución cuantitativas para caracterizar cómo trabajan los algoritmos de análisis de imagen.
- Los modelos de CAM pueden ser usados para incorporar información contextual a priori, o bien restricciones, de manera cuantitativa.
- Los algoritmos basados en CAM tienden a ser locales y conducen a una implementación hardware paralelo de manera natural.

Los modelos de visión estocásticos completos basados en Campos Aleatorios de Markov están formulados dentro del campo de trabajo Bayesiano. Los resultados de la teoría CAM nos proporcionan herramientas para codificar restricciones contextuales en la probabilidad a priori. Esta es la principal razón para el modelo de visión usando CAM.

Los estudios basados en CAM han tenido éxito al modelar problemas de visión de bajo nivel, como son restauración de imágenes, segmentación, reconstrucción de superficies, análisis de texturas, flujo óptico, integración visual y detección de bordes (1989).

Más recientemente se ha comenzado la investigación y aplicación de los modelos CAM en visión de alto nivel, como para emparejamiento y reconocimiento de objetos.

La definición de un modelo de Campos Aleatorios de Markov se puede resumir en cinco pasos:

1. Plantear el problema de visión como uno de etiquetado en el que la configuración de etiquetas representa una solución.
2. Después plantearlo como un problema de etiquetado bayesiano en el que la solución óptima se define como la configuración de etiquetas MAP.
3. Usar la distribución de Gibbs para caracterizar la distribución a priori de las configuraciones del etiquetado.
4. Definir la Función de Energía de la distribución de Gibbs.
5. Usar un algoritmo (por ejemplo, Simulated Annealing) para minimizar la Función de Energía de la distribución de Gibbs y obtener así la configuración de etiquetas MAP.

5.2. Problema del Etiquetado en visión

Muchos problemas de visión pueden ser considerados como problemas de etiquetado, de manera que la solución al problema es el conjunto de etiquetas asignado a los píxeles de la imagen. El etiquetado es una representación natural para el estudio de los Campos Aleatorios de Markov.

5.2.1 Notación

Un problema de etiquetado puede especificarse en términos de un conjunto de estados y un conjunto de etiquetas. Sea S un conjunto discreto con m estados

$$S = \{1, 2, 3, \dots, m\} \quad (1)$$

Un estado puede representar un punto o una región del espacio euclídeo. El conjunto de estados puede ser clasificado en términos de su homogeneidad. Podemos denotarlo por

$$S = \{(i, j) \mid 1 \leq i, j \leq n\} \quad (2)$$

al conjunto de localizaciones de los píxeles de una imagen 2D de tamaño $n \times n$.

La relación entre los distintos estados aparece en la definición del *sistema de vecinos* (que se establece en el apartado 3.1).

Sea L el conjunto de etiquetas. L puede ser un conjunto discreto o continuo. En el caso continuo el conjunto de etiquetas puede corresponder a \mathcal{R} (conjunto de números reales) o a un intervalo compacto de \mathcal{R} ,

$$L_c = [x_l, x_k] \subset \mathcal{R} \quad (3)$$

En el caso discreto, las etiquetas se toman dentro de un conjunto discreto de M valores,

$$L_d = \{l_1, \dots, l_M\} = \{1, \dots, M\} \quad (4)$$

El conjunto de etiquetas puede ser caracterizado en términos de su continuidad. Además de la continuidad, otra característica esencial de un conjunto de etiquetas es poder establecer un orden entre las etiquetas. Por ejemplo, los elementos en el conjunto continuo de etiquetas \mathcal{R} puede ser ordenados en relación a "ser más pequeño que". En un conjunto discreto como, por ejemplo, la intensidad del tono de gris $\{0, 1, \dots, 255\}$, podemos ordenar los elementos según los valores de la intensidad $0 < 1 < \dots < 255$.

5.2.2 El problema del etiquetado

El problema de etiquetado consiste en asignar una etiqueta del conjunto de etiquetas L a cada estado de S . Por ejemplo, la detección de bordes en una imagen consiste en asignar una etiqueta f_i dentro del conjunto $L = \{\text{borde}, \text{no borde}\}$ para cada estado $i \in S$, donde S está formado por los píxeles de la imagen.

Definición 1. Llamaremos etiquetado a

$$f = \{f_1, \dots, f_m\} \quad (5)$$

donde a cada estado de S se le ha asignado una de las etiquetas L .

Definición 2. Llamaremos "mapping" a toda función

$$f : S \rightarrow L \quad (6)$$

que a cada estado de S le asigna una única etiqueta f_i de L .

En terminología de Campos Aleatorios de Markov, llamaremos *configuración* al etiquetado. En visión artificial, una configuración de etiquetas puede corresponder a una imagen, a un mapa de bordes de la imagen, a una interpretación de una imagen con características en términos de características de objeto, una interpretación de los objetos que aparecen en una escena, etc.

Cuando todos los estados tienen el mismo conjunto de etiquetas L , el conjunto de todas las configuraciones posibles, es el producto cartesiano

$$\mathfrak{S} = \underbrace{LxLx\dots xL}_{m \text{ veces}} = L^m \quad (7)$$

donde m es el tamaño de S .

En restauración de imágenes, por ejemplo, L contiene los valores admisibles de cada píxel de S y \mathfrak{S} define todas las imágenes admisibles. Si $L = \mathfrak{R}$, entonces $\mathfrak{S} = \mathfrak{R}^m$. Si L es un conjunto discreto, entonces el tamaño de \mathfrak{S} es combinatorial. Para un problema con m estados y M etiquetas existentes M^m configuraciones posibles en \mathfrak{S} .

5.2.2.1. Clasificación del problema del etiquetado en visión

En términos de homogeneidad y de continuidad, podemos clasificar un problema de etiquetado en visión dentro de una de las categorías siguientes:

- PE1: Estados homogéneos con conjunto de etiquetas continuo.
- PE2: Estados homogéneos con conjunto de etiquetas discreto.
- PE3: Estados no homogéneos con conjunto de etiquetas discreto.
- PE4: Estados no homogéneos con conjunto de etiquetas continuo.

Las dos primeras categorías caracterizan el proceso de bajo nivel realizado bajo las imágenes observadas y las dos últimas el procesado de alto nivel realizado sobre las características extraídas.

La restauración de imágenes en niveles de gris, o el suavizado de imágenes, son ejemplos de PE1. El conjunto de estados S corresponden a los píxeles de la imagen y el conjunto de etiquetas L a un intervalo real. La restauración consiste en estimar la señal de la imagen real a partir de una imagen degradada o con ruido.

La restauración de imágenes binarias, o imágenes multinivel, son ejemplos de PE2. Del mismo modo que la restauración continua, se intenta estimar la señal de la imagen real. La diferencia es que cada píxel de la imagen resultante aquí asume un valor discreto y, por tanto, L es conjunto discreto de etiquetas.

La segmentación de imágenes es un PE2. Se divide una imagen en regiones mutuamente excluyentes, cada una de las cuales tiene algunas propiedades uniformes y homogéneas cuyos valores son significativamente diferentes a los de las regiones vecinas. Los píxeles dentro de cada región tienen asignadas una

etiqueta única. La suposición principal en estos problemas es que la señal es suave o está formada por trozos suaves. Esto es complementario a la suposición sobre los bordes, en los que pueden ocurrir cambios bruscos.

La detección de bordes es también un PE2. A cada píxel (más concretamente, entre cada par de píxeles vecinos) se le asigna una etiqueta entre {*borde, no borde*} si existen diferencias significativas entre las propiedades del par de píxeles vecinos. La restauración continua con discontinuidades es una combinación de PE1 y PE2.

El agrupamiento perceptual es un PE3. Los estados normalmente corresponden a características segmentadas inicialmente (puntos, líneas y regiones) que están ordenadas no homogéneamente. Las características fragmentarias se deben organizar en grupos perceptualmente con significado. Entre cada par de características se puede asignar una etiqueta dentro de {*conectado, no conectado*}, indicando si las características deben ser unidas.

El reconocimiento y emparejamiento de objetos basados en características es un PE3. Cada estado indica una característica de la imagen tal como un punto, un segmento de línea o una región. Las etiquetas son un conjunto discreto por naturaleza y cada una de ellas indica una característica del modelo. La configuración resultante es un "*mapping*" a partir de la característica de la imagen, llegando a aquellos del objeto modelo. El emparejamiento estéreo es un PE3 similar.

La estimación de la orientación a partir de un conjunto de correspondencia de puntos puede ser formulada como un PE4. Cada etiqueta puede asumir el valor de una matriz real representando una transformación admisible (ortogonal, a fin o en perspectiva).

5.3. Campos Aleatorios de Markov y distribución de Gibbs

Los Campos Aleatorios de Markov son un parte de la Teoría de la Probabilidad que proporciona una herramienta para analizar dependencias especiales o contextuales de fenómenos físicos. Se usan en el problema del etiquetado en visión para establecer las distribuciones de probabilidad de las etiquetas.

5.3.1 Sistema de vecinos y cliques

Los estados de S están relacionados mediante lo que llamaremos un *sistema de vecinos*.

Definición 3. Llamamos *sistema de vecinos* para el conjunto de estados S a

$$N = \{N_i | \forall i \in S\} \quad (11)$$

donde N_i es el conjunto de los estados vecinos a i para los que

1. $i \notin N_i$ (12)
2. $i \in N_j \Leftrightarrow j \in N_i$

Para una rejilla regular S , el conjunto de vecinos de i está definido como el conjunto de estados próximos dentro de un radio r

$$N_i = \{j \in S | [dist(pixel_j, pixel_i)]^2 \leq r, j \neq i\} \quad (13)$$

donde $dist(A,B)$ denota la distancia euclídea entre A y B , y r es un número entero. Notar que los píxeles de la frontera o próximos a ella tienen pocos vecinos.

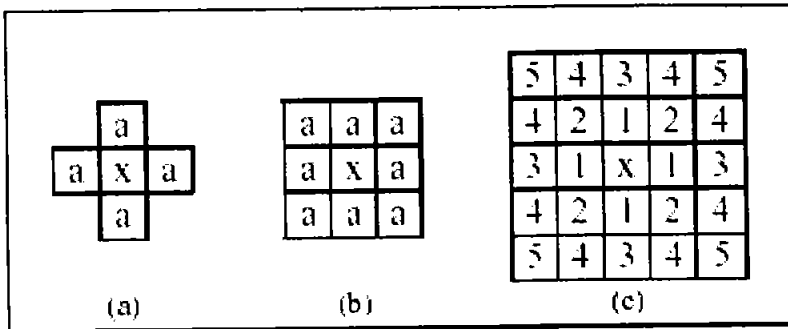


Fig. 1: Vecinos en una rejilla regular S

En el sistema de vecinos de primer orden, llamado sistema de 4-vecinos, cada estado (interior) tiene cuatro vecinos, según lo mostrado en la figura 1(a), donde x denota el estado considerado y a sus vecinos. En el sistema de vecinos en el segundo orden, también llamado sistema de 8-vecinos, hay ocho vecinos para cada estado (interior), según lo mostrado en la figura 1(b). Los números $n = 1, \dots, 5$ mostrados en la figura 1(c) indican los estados vecinos exteriores en el sistema de vecinos de orden n -ésimo.

Cuando se ha especificado un orden entre los elementos de S , el conjunto de vecinos se puede determinar más explícitamente. Por ejemplo, sea $S = \{1, 2, \dots, m\}$ un conjunto ordenado de estados cuyos elementos son los índices de los píxeles de una imagen 1D, entonces un estado interior $i \in \{2, \dots, m-1\}$ tiene dos vecinos $N_i = \{i-1, i+1\}$; y los estados de la frontera (los dos extremos) tienen un vecino cada uno, $N_1 = \{2\}$ y $N_m = \{m-1\}$. El conjunto de estados de una rejilla regular rectangular $S = \{(i, j) | 1 \leq i, j \leq n\}$ corresponde a los píxeles de una imagen en dos dimensiones de tamaño $n \times n$. Cada estado interior, representado por (i, j) , tiene 4 vecinos $N_{i,j} = \{(i-1, j), (i+1, j), (i, j-1), (i, j+1)\}$, los estados de la frontera tienen tres y los estados de las esquinas tienen dos.

Para un conjunto irregular de estados S , el conjunto de vecinos de i , N_i se define de la misma manera que (13) y corresponde a los estados próximos en un radio r

$$N_i = \{j \in S \mid \text{dist}(\text{característica}_j, \text{característica}_i) \leq r, j \neq i\} \quad (14)$$

La función $\text{dist}(A, B)$ necesita ser definida apropiadamente para puntos que no tienen características. Alternativamente, la vecindad se puede definir por la triangulación Delaunay (algunos algoritmos para construir la triangulación Delaunay en un espacio multidimensional pueden encontrarse en [Bowyer 1981; Watson 1981]), o su dual, los polígonos de Voronoi, en [Besag 1975]. En general, el conjunto de vecinos N_i para un conjunto irregular de estados S tiene dimensión y tamaño variables.

El par $\{S, N\}$ es un grafo en el sentido usual, donde S contiene los nodos y N determina las relaciones entre los nodos de acuerdo con el sistema de vecinos definido.

Definición 4. Una *clíque* c para $\{S, N\}$ se define como un subconjunto de S tal que c consiste en un único estado $c = \{i\}$ o un par de estados vecinos $c = \{i, j\}$, o tres estados vecinos $c = \{i, j, k\}$ y así sucesivamente.

Denotamos el conjunto de clíques de un solo estado, el conjunto de clíques de dos estados, ..., por C_1, C_2, \dots respectivamente, donde

$$C_1 = \{i \mid i \in S\} \quad (15)$$

$$C_2 = \{\{i, j\} \mid j \in N_i, i \in S\} \quad (16)$$

$$C_3 = \{\{i, j, k\} \mid i, j, k \in S, \text{con. vecinos. dos a dos}\} \quad (17)$$

⋮

El conjunto de todas las clíques para $\{S, N\}$, de una rejilla regular, viene determinado por su tamaño, dimensión y orientación. La figura 2 muestra distintos tipos de clíques para sistemas de vecinos de primer y segundo orden. A medida que aumenta el orden del sistema de vecinos, el número de clíques crece rápidamente y también el coste computacional asociado.

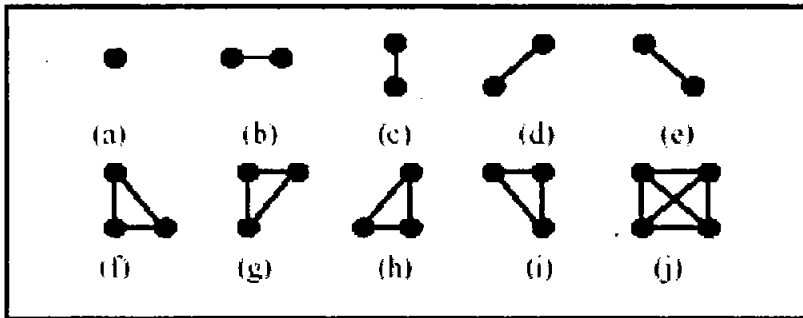


Fig. 2: Cliques en una rejilla regular S

5.3.2 Campos Aleatorios de Markov (CAM)

Definición 5. Sea $F = \{F_1, \dots, F_m\}$ una familia de variables aleatorias definidas en S , donde cada variable aleatoria F_i toma un valor f_i en L . Llamaremos *Campos Aleatorios* a la familia de variables aleatorias F . Usaremos la notación $F_i = f_i$ para denotar que el suceso F_i tomo el valor de f_i .

Definición 6. Un suceso conjunto $\{F_1 = f_1, \dots, F_m = f_m\}$, abreviadamente $F = f_i$, es una *relación de F* . Llamaremos *configuración* del suceso conjunto F a $f = \{f_1, \dots, f_m\}$.

Para un conjunto discreto de etiquetas L , denotamos por $P(F = f) = P(F_1 = f_1, \dots, F_m = f_m) = P(f)$.

Para un conjunto continuo de etiquetas L , denotamos a las funciones de densidad de probabilidad por $p(F_i = f_i)$ y $p(F = f)$ respectivamente.

Definición 7. Una familia de variables aleatorias F se dice que es un *Campo Aleatorio de Markov* sobre S con respecto a N si y sólo si:

1. $P(F = f) > 0 \quad \forall f \in \mathfrak{F} \quad (18)$

$$2. P(F_i = f_i, F_j = f_j, j \in d, j \neq i) = P(F_i = f_i | F_j = f_j, j \in N_i),$$

(propiedad Markoviana) (19)

La condición (1) es para exigir que F sea un Campo Aleatorio. La condición (2) se llama característica local. Se dice que la probabilidad de un suceso local a i condicionado a todos los sucesos restantes es equivalente a aquella condicionada a los sucesos vecinos de i . Puede demostrarse que la probabilidad conjunta $P(F = f)$ de cualquier Campo Aleatorio se determina únicamente por estas probabilidades condicionales locales¹. Cualquier F cumpliendo estas condiciones es un Campo Aleatorio de Markov con respecto a tal sistema de vecinos.

Un Campo Aleatorio de Markov puede tener otras características tales como homogeneidad e isotropía. Diremos que es homogéneo si $P(f_i | f_{N_i})$ se calcula sin importar la posición relativa del estado i en S . La isotropía se considerará posteriormente cuando definamos las funciones "clique potenciales".

Para ciertos problemas puede ser necesario definir más de un Campo Aleatorio de Markov, cada uno de ellos definido en uno de los conjuntos espaciales de estados con intersección no vacía.

El concepto de Campos Aleatorios de Markov es una generalización del de Procesos de Markov (PM) que han sido extensamente utilizados en análisis de secuencias. Los PM se definen normalmente en dominio de tiempo más que en dominios de espacios. Son una secuencia de variables aleatorias $\dots, F_1, \dots, F_m, \dots$ definidas sobre un conjunto de índices de tiempo $\{\dots, 1, \dots, m, \dots\}$. Un PM unilateral de orden n -ésimo satisface

$$P(f_i | \dots, f_{i-2}, f_{i-1}) = P(f_i | f_{i-1}, \dots, f_{i-n}) \quad (20)$$

Un PM bilateral no causal depende no solamente del pasado sino también del futuro. Un PM bilateral de orden n -ésimo satisface

¹ Besag 1974

$$P(f_i, \dots, f_{i-2}, f_{i-1}, f_{i+1}, f_{i+2}, \dots) = P(f_i | f_{i+n}, \dots, f_{i+1}, f_{i-1}, \dots, f_{i-n}) \quad (21)$$

Se generaliza en un Campo Aleatorio de Markov cuando los índices del tiempo son considerados como índices espaciales.

Hay dos especificaciones para un Campo Aleatorio de Markov, en términos de probabilidades condicionales $P(f_i | f_{N_i})$ y en términos de probabilidad conjunta $P(f)$. No hay método disponible para deducir la probabilidad conjunta de las probabilidades condicionales asociadas. Las probabilidades condicionales están sujetas a algunas condiciones de consistencias no obvias y altamente restrictivas. La especificación natural de equilibrio en un proceso estadístico es en términos de probabilidad conjunta en vez de en términos de distribución condicional de las variables. Afortunadamente, un resultado teórico sobre la equivalencia entre los Campos Aleatorios de Markov y la distribución de probabilidad de Gibbs² proporciona medios de especificar la probabilidad conjunta de un Campo Aleatorio de Markov matemáticamente manejables.

5.4. Definición de Modelos de Campos Aleatorios de Markov

En este apartado vamos a introducir la definición de algunos modelos útiles de Campos Aleatorios de Markov para modelar características de la imagen tales como regiones y texturas. Estamos interesados en sus distribuciones de probabilidad condicionales y conjuntas, y en sus correspondientes funciones de energía. Dependiendo de cómo está definida la función de energía podemos agruparlos en

5.4.1. Auto-Modelos.

5.4.2. Modelo Logístico Multinivel.

² La Distribución de Gibbs, se encuentra en el Apéndice D.

5.4.1. Auto-Modelos

Las restricciones de con textos entre dos etiquetas son un primer nivel a tener en cuenta en la información del contexto. Son muy utilizadas debido a su simplicidad y bajo coste computacional. Se codifican en la función de energía de Gibbs como funciones cliques potencial queda definida por

$$U(f) = \sum_{i \in S} V_1(f_i) + \sum_{i \in S} \sum_{j \in N_i} V_2(f_i, f_j) \quad (22)$$

que llamamos energía de segundo orden porque se calcula para cada clique formada por dos estados. Podemos especificar un Campo Aleatorio de Gibbs o un Campo Aleatorio de Markov mediante la selección apropiada de V_1 y V_2

Cuando $V_1(f_i) = f_i G_i(f_i)$ y $V_2(f_i, f_j) = \beta_{i,j} f_i f_j$, donde $G_i(f_i)$ son funciones arbitrarias y $\beta_{i,j}$ son constantes que reflejan la interacción entre cada par de estados i y j , entonces la función de energía es

$$U(f) = \sum_{\{i\} \in C_1} f_i G_i(f_i) + \sum_{\{i,j\} \in C_2} \beta_{i,j} f_i f_j \quad (23)$$

Definición 8. El modelo anterior recibe el nombre de *auto-modelo*. Los *auto-modelos* se pueden clasificar más a fondo según las suposiciones hechas sobre las f_i .

Definición 9. Un *auto-modelo* se dice que es un modelo *auto-logístico*, si las f_i toman valores en el conjunto de etiquetas discreto $L = \{0,1\}$ (o $L = \{+1,-1\}$). La correspondiente función de energía es de la forma

$$U(f) = \sum_{\{i\} \in C_1} \alpha_i f_i + \sum_{\{i,j\} \in C_2} \beta_{i,j} f_i f_j \quad (24)$$

donde $\beta_{i,j}$ puede ser interpretado como la interacción entre los coeficientes. Cuando el sistema de vecinos N es una rejilla (4-

vecinos en una rejilla 2D, o 2-vecinos en una rejilla 1D), entonces el modelo *auto-logístico* se reduce al modelo de *Ising*. La probabilidad condicional para el modelo *auto-logístico* con $L = \{0,1\}$ es

$$P(f_i | f_{N_i}) = \frac{e^{\alpha_i f_i + \sum_{j \in N_i} \beta_{i,j} f_i f_j}}{\sum_{f_i \in \{0,1\}} e^{\alpha_i f_i + \sum_{j \in N_i} \beta_{i,j} f_i f_j}} = \frac{e^{\alpha_i f_i + \sum_{j \in N_i} \beta_{i,j} f_i f_j}}{1 + e^{\alpha_i f_i + \sum_{j \in N_i} \beta_{i,j} f_i f_j}} \quad (25)$$

Cuando la distribución es homogénea, tenemos $\alpha_i = \alpha$ y $\beta_{i,j} = \beta$ sin importar i ni j .

Definición 10. Diremos que un *auto-modelo* es un *auto-modelo binomial* si f_i toma valores en $\{0,1,\dots,M-1\}$ y cada f_i tiene una distribución condicional binomial con M pruebas y probabilidad de éxito q

$$P(f_i | f_{N_i}) = \binom{M-1}{f_i} q^{f_i} (1-q)^{M-1-f_i} \quad (26)$$

$$q = \frac{e^{\alpha_i + \sum_{j \in N_i} \beta_{i,j} f_j}}{1 + e^{\alpha_i + \sum_{j \in N_i} \beta_{i,j} f_j}} \quad (27)$$

La correspondiente función de energía es de la forma

$$U(f) = - \sum_{\{i\} \in C_1} \ln \binom{M-1}{f_i} - \sum_{\{i\} \in C_1} \alpha_i f_i - \sum_{\{i,j\} \in C_2} \beta_{i,j} f_i f_j \quad (28)$$

que se reduce al modelo *auto-logístico* cuando $M = 1$.

Definición 11. Diremos que un *auto-modelo* es un *auto-modelo normal*, llamado Campo Aleatorio de Markov, si el conjunto de etiquetas L es \mathfrak{R} y la distribución de probabilidad conjunta es una normal multivariante. Su función de probabilidad condicional es

$$P(f_i | f_{N_i}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{1}{2\sigma^2} \left[f_i - \mu_i - \sum_{j \in N_i} \beta_{i,j} (f_j - \mu_j) \right]^2} \quad (29)$$

que es una distribución normal con media condicional

$$E(f_i, f_{N_i}) = \mu_i - \sum_{j \in N_i} \beta_{i,j} (f_j - \mu_j) \quad (30)$$

y varianza condicional

$$\text{var}(f_i, f_{N_i}) = \sigma^2 \quad (31)$$

La probabilidad conjunta es una distribución de Gibbs

$$p(f) = \frac{\det(B)}{\sqrt{(2\pi\sigma^2)^m}} e^{\frac{1}{2\sigma^2} (f-\mu)^T B (f-\mu)} \quad (32)$$

donde f se considera un vector, μ es el vector $m \times 1$ de las medidas condicionales, y $B = [b_{i,j}]$ es la *matriz de interacción* $m \times m$ cuyos elementos de la diagonal son 1 y el resto de elementos (i, j) es $-\beta_{i,j}$, es decir $b_{i,j} = \delta_{i,j} - \beta_{i,j}$ con $\beta_{i,i} = 0$. Por lo tanto, las funciones clíque potenciales, de un solo estado y de dos estados, para el modelo *auto-normal* son

$$V_1(f_i) = (f_i - \mu_i)^2 / 2\sigma^2 \quad (33)$$

$$V_2 = (f_i, f_j) = \beta_{i,j} (f_i - \mu_i)(f_j - \mu_j) / 2\sigma^2 \quad (34)$$

respectivamente. Un campo con ruido Gaussiano independiente es un caso especial de Campo Aleatorio de Markov cuya energía de Gibbs consiste únicamente en funciones clíque potenciales de un solo estado. Como las funciones clíque potenciales de todos los órdenes superiores son cero, no hay interacción en el contexto en el ruido Gaussiano independiente. B está relacionado con la matriz de covarianza Σ ya que $B = \Sigma^{-1}$. La condición necesaria y

suficiente para que $p(f) = \frac{\det(B)}{(2\pi\sigma^2)^n} e^{-\frac{1}{2\sigma^2}(f-\mu)^T B(f-\mu)}$ sea una

verdadera función de probabilidad es que B sea simétrica y definida positiva.

Definición 12. Un modelo relacionado es el modelo *simultáneo de auto-regresión* (SAR). Este modelo, distinto del modelo *auto-normal* que está definido por m funciones de probabilidad condicional, viene determinado por un conjunto de m ecuaciones

$$f_i = \mu_i + \sum_{j \in N_i} \beta_{i,j} (f_j - \mu_j) + \varepsilon_i \quad (35)$$

donde ε_i son Gaussianas independientes, $\varepsilon_i \approx N(0, \sigma^2)$. También genera la clase de todas las distribuciones normales multivariante con función de probabilidad conjunta

$$p(f) = \frac{\det(B)}{(2\pi\sigma^2)^n} e^{-\frac{1}{2\sigma^2}(f-\mu)^T B(f-\mu)} \quad (36)$$

donde B se define como se ha comentado previamente.

5.4.2. Modelo Logístico Multinivel

El modelo *auto-logístico* se puede generalizar al modelo *logístico multinivel* (MLL)³, también llamado *proceso de Strauss* y *modelo generalizado de Ising*⁴. Hay $M (> 2)$ etiquetas discretas en el conjunto de etiquetas $L = \{1, \dots, M\}$. Una clique potencial depende del tipo c (tamaño, dimensión y orientación posible) de la clique y de la configuración local $f_c = \{f_i | i \in c\}$. Para las cliques que contienen más de un estado ($c > 1$), definimos las funciones clique potenciales MLL como

³ Elliott et al. 1984; Derin y Cole 1986; Derin y Elliott 1987, también llamado *proceso de Strauss* [Strauss 1977]

⁴ German y Geman 1984.

$$V_c(f) = \begin{cases} \zeta_c & \text{si todos los estados de } c \text{ tienen la} \\ & \text{misma etiqueta} \\ -\zeta_c & \text{en otro caso} \end{cases} \quad (37)$$

donde ζ_c es el potencial para las cliques del tipo c ; para cliques de un solo estado, dependen de la etiqueta asignada al estado

$$V_c(f) = V_c(f_i) = \alpha_I \quad \text{si } f_i = I \in L_d \quad (38)$$

donde α_I es el potencial para la etiqueta I . La figura 3 muestra los tipos de cliques y los parámetros asociados en sistemas de vecinos de segundo orden (8-vecinos).

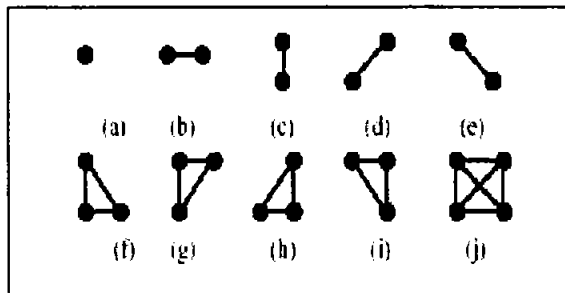


Fig. 3: Tipos de cliques y parámetros potenciales asociados en sistemas de vecinos de segundo orden (8-vecinos). Los estados son los puntos y las líneas muestran las relaciones entre vecinos

Asumiendo que un modelo MLL es de segundo orden, como en (22), si y sólo si α (para cliques de un estado) y β (para cliques de dos estados) son parámetros distintos de cero. La función clique potencial para cliques de dos estados es:

$$V_2(f_i, f_j) = \begin{cases} \beta_c & \text{si los estados de la clique } \{i, j\} = c \in C_2 \\ & \text{tienen la misma etiqueta} \\ -\beta_c & \text{en otro caso} \end{cases} \quad (39)$$

donde β_c es el parámetro β para los cliques del tipo c , y C_2 es el conjunto de cliques de dos estados. Para un sistema de 4-vecinos hay cuatro tipos de cliques de dos estados (figura 3) y cuatro

diferentes β_c . Cuando el modelo es isotrópico los cuatro toman el mismo valor. Debido a su simplicidad, el modelo es parejas MLL de (39) se ha utilizado extensamente para modelar regiones y texturas⁵. Cuando el modelo MLL es isotrópico, la probabilidad condicional puede ser expresada como sigue:

$$P(f_i = I | f_{N_i}) = \frac{e^{-\alpha_i - \beta_{\alpha_i}(I)}}{\sum_{l=1}^M e^{-\alpha_i - \beta_{\alpha_i}(l)}} \quad (40)$$

donde $n_i(I)$ es el número de estados en N_i que están etiquetados por I . Cuando hay solamente dos etiquetas, 0 y 1, se reduce a (25).

5.5. Fisión y Fusión Markoviana

5.5.1 El paso de Fisión

El primer paso en nuestra aproximación consiste en extraer una información simple de los datos originales. Efectivamente, nosotros creamos nuevos captosres los cuales representan el resultado de la estimación de un parámetro de textura dada. Tales captosres son así discriminados para una o varias clases sencillas por considerar los modos de sus histogramas. Esto puede ser visto como un preproceso pasando a la separación de los diferentes contenidos pequeños de información de los datos originales. Así, el proceso de fusión será simplificado y los parámetros asociados se estimarán más fácilmente. Las interacciones entre píxeles adyacentes (vertical y horizontal) son modeladas por una distribución Gaussiana. Otro término Gaussiano, el centrado sobre la media, es agregada por cada píxel. La asociación Hamiltoniana con este campo esta dada por:

⁵ Elliott et al. 1984; Geman y Geman 1984; Derin y Cole 1986; Derin y Elliott 1987; Murria y Buxton 1987; Lakshmanan y Derin 1989; Won y Derin 1992.

$$H(\Sigma) = \frac{U(\Sigma)}{T} = \frac{1}{T} \left(\sum_{c=\{i,j\}} (\sigma_i - \sigma_j)^2 + \lambda(\sigma_i - \mu)^2 \right) \quad (41)$$

y depende de los tres parámetros T , λ y μ . El parámetro T , se refiere a la temperatura, puede ser interpretada como una varianza condicional, mientras λ es similar a una correlación ponderada y μ es el mean local. Efectivamente, la propiedad Markoviana de probabilidad condicional local implica que:

$$P(\sigma_i | \sigma_j, j \in V_i) = N\left(\frac{\lambda\mu + 4m_i}{4 + \lambda}, \frac{T}{2(4 + \lambda)}\right) \quad (42)$$

donde, V_i es el set de las cuatro vecindades de i , m_i es el promedio de esas vecindades y $N(a,b)$ denota una distribución normal de media a y varianza b .

En trabajos previos se realizaron estos procesos, considerando la probabilidad condicional o procesos de renormalización a una imagen del polo norte; escogiendo el canal 1 y 3, la estimación de los parámetros de temperatura asociados se muestran en la figura 4. Donde las clases usadas fueron océano e hielo y relieve.

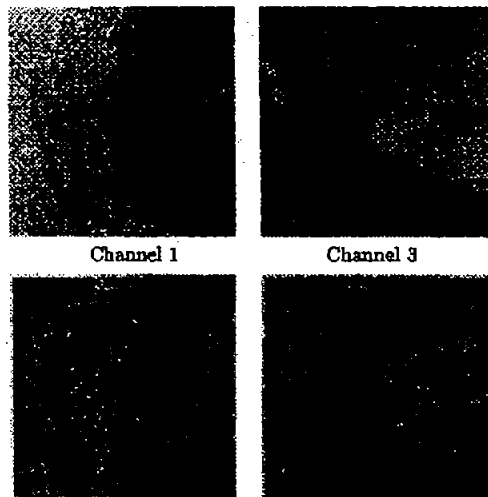


Figura 4. Captores obtenidos durante la fisión. Temperatura

5.5.2 El paso de Fusión

Para realizar el paso de fusión se usa una aproximación regularizada usando un Campo Aleatorio de Markov en un marco Bayesiano. Si Y es la imagen segmentada y la X_i los captosres diferentes. El proceso de segmentación consiste en maximizar la probabilidad condicional $P(Y|X_i, i \in \{0, \dots, n\})$ la cual, para la regla de Bayes, es proporcional a $P(X_i, i \in \{0, \dots, n\}|Y) \times P(Y)$. $P(Y)$ se refiere al modelo *a priori*. Los diferentes captosres X_i son supuestos para ser condicionalmente independientes de Y , así que la probabilidad $P(X_i, i \in \{0, \dots, n\}|Y)$ puede ser escrita como un producto $\prod_i P(X_i|Y)$. Estos términos están referidos como los datos de los términos dados.

El modelo *a priori* es compuesto de un modelo Potts generalizado de 8 conectores. La función de energía asociada con este modelo esta escrita como:

$$U(Y) = \sum_{c=\{i,j\}} \sum_{l,l'} \gamma_{l,l'} \delta_{y_l=c} \delta_{y_{l'}=c} \quad (43)$$

Los parámetros asociados son entonces definidos por la matriz de regularización $\Gamma = (\gamma_{i,j})$ donde los índices representan las diferentes clases. Note que si la matriz es igual a γ veces la matriz identidad, nosotros obtenemos el modelo Potts clásico. Los términos de la diagonal reflejan coacciones de homogeneidad.

El paso de fisión el cuál extrae discriminadamente información de cada clase siguiendo una formulación simple de los datos de los términos dados. Efectivamente, necesitamos definir la función lineal \mathcal{L} cuyos parámetros directamente pueden ser extraídos de los histogramas en vez de usar un modelo complejo probable para los datos originales, como la proyección en la probabilidad condicional de Bayes. Así definimos tal función para cada clase y cada captor. El potencial resultante $V_s(j)$ es una relación lineal entre estas funciones. El potencial resultante puede entonces ser escrito como:

$$V_{site} = \sum_{\text{captors}_i} \sum_{\text{clases}_j} \frac{\lambda_{i,j} f^{i,j}(x_s) \delta_{y_s=j}}{\sum_{\text{captors}_i} \lambda_{i,j}} \quad (44)$$

El algoritmo para esta aproximación de fisión y fusión está resumido en la Fig. 5. La Figura 6 presenta el resultado final. La fisión tiene la discriminación en cuenta entre los tipos diferentes de hielo. Además, la exactitud de los peritos conduce a bordes exactos en el paso de fusión.

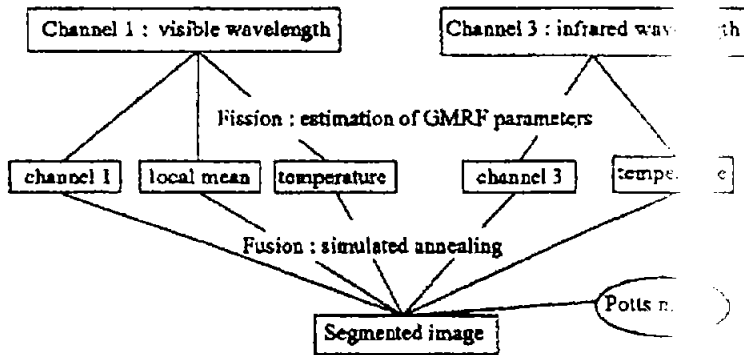


Fig. 5. Resumen del algoritmo de fisión y fusión.



Fig. 6. Resultado de la segmentación del Polo Norte

6. RESULTADOS DE SEGMENTACIÓN.

Los resultados de una investigación son importantes para su comprobación. En este apartado analizaremos algunos experimentos de imágenes de Percepción Remota, aplicándoles la segmentación de imágenes por medio de la Matriz de Coocurrencia y Fusionando diferentes texturas por medio de los Campos Aleatorios de Markov. Este proceso lo aplicaremos al derramamiento de petróleo del buque Prestige en Europa en el año 2002.

6.1 Detección de derrames petroleros

El 19 de Noviembre del 2002, zarpa de Galicia, España; un buque con 20 millones de galones (alrededor de 67000 toneladas) de petróleo, el cual se fractura por la mitad de la costa del noroeste de España, amenazando uno de los desastres ambientales peores de la historia. La

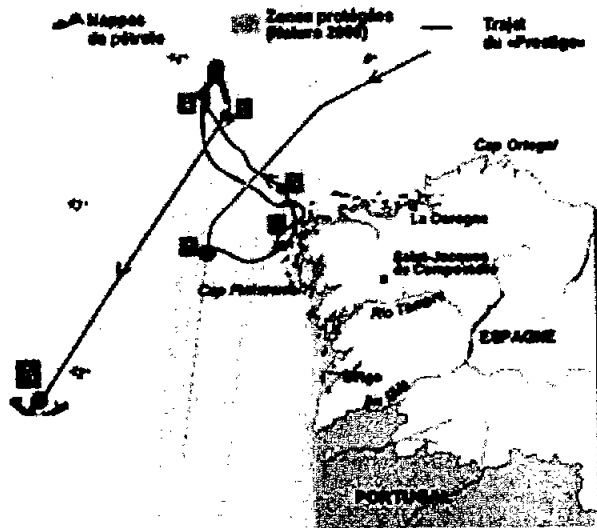


Fig. Ruta del Prestige.

sección posterior del Prestige se hundió primero, llevando consigo muchos de los tanques de petróleo con él. El buque se topó con una tormenta violenta cerca de 241 Km de la costa atlántica de España, haciendo que un tanque de petróleo se abra. El escape había derramado ya por lo menos 2 millones de galones de

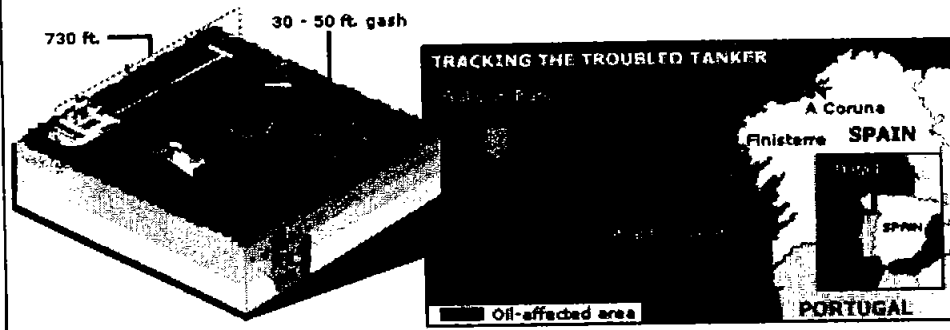
petróleo. El petrolero también tenía una grieta de 9 a 15 m en el casco debajo de la línea de flotación que hizo incapaz proceder bajo su propia energía mientras que los programas de salvaguarda intentaron un puerto para hacer reparaciones o para transferir el petróleo a otro recipiente. El derramamiento amenazó el bienestar económico y ambiental de la región, que es en gran parte dependiente en el mar para su sustento.

SUNKEN TANKER POSES MAJOR THREAT

The oil tanker *Prestige*, damaged in a storm, broke in two and sank off the northwest coast of Spain on November 19. The wreckage held more than 20 million gallons of fuel oil, which if lost would be nearly twice the size of the 1989 Exxon Valdez disaster in Alaska.

■ Nov. 13: Tanker hull ruptures, leaking 1.3 million to 2.6 million gallons of fuel oil.

■ Nov. 19: Tanker breaks in two; stern section sinks still holding more than 20 million gallons of fuel oil.



La ESA (European Space Agency) provee imágenes basadas en los satélites del derramamiento español de petróleo bajo la Comisión Internacional del Espacio y Principales Desastres, el 9 Dic en Italia.

Para apoyar las agencias de la relevación con datos del espacio, la ESA estuvo proporcionando imágenes basadas en los satélites casi diariamente desde el 17 de noviembre de su ERS (Servicios de Investigación Económica) y la nave espacial de Envisat, en la ayuda de los esfuerzos de la relevación en la estela del derramamiento del petróleo de la costa española.

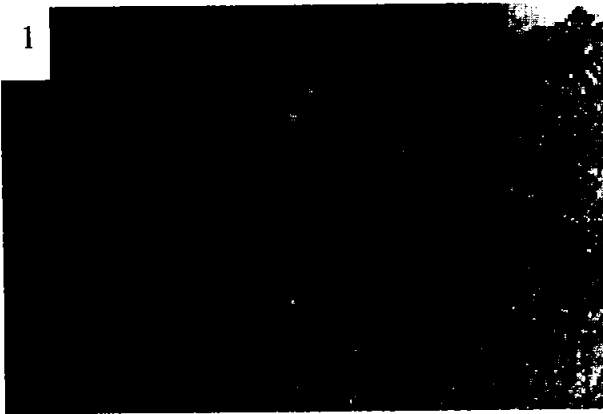
La ESA proveo regularmente imágenes SAR a las autoridades implicadas en España, Portugal y Francia. Las imágenes fueron solicitadas inicialmente por la Comisión de las

Comunidades Europeas, que activó la Comisión Internacional del Espacio y Principales Desastres, el 14 de noviembre.

La Comisión es un esfuerzo internacional para traer tecnología basada en los satélites en el servicio de las autoridades del rescate y de otras agencias de protección civiles en los casos de desastres naturales o artificiales. Según los términos del acuerdo, la ESA, junto con CNES, la Agencia Espacial Canadiense, la Organización de Investigación Espacial de la India, y la Administración Oceánica y Atmosférica Nacional de los Estados Unidos, han acordado contribuir con sus imágenes basadas en los satélites por el requerimiento de usuarios autorizados, generalmente la organización de protección civil de un país miembro de la Comisión.

Aquí se presentan algunas imágenes procesadas por el equipo durante este periodo. Todas estas imágenes se han entregado a las autoridades españolas, portuguesas y francesas.

1



1. Una adquisición amplia de la imagen del ENVISAT ASAR programado (en emergencia) para el 17 de noviembre del 2002. Los datos fueron adquiridos en Matera (Italia) y la imagen

correspondiente fue generada el 20 de noviembre en ESRIN en Italia. La imagen cubre el

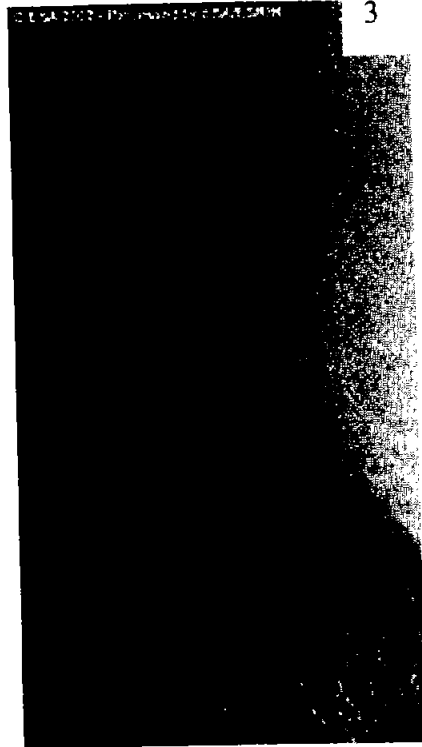
2



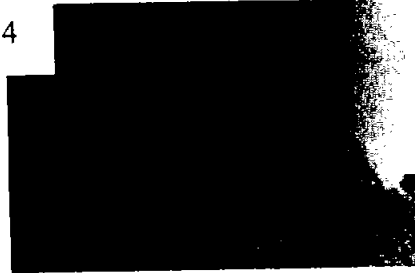
2. Ampliaciones de la demostración antedicha de la imagen, en negro, del pulido del aceite

lanzado por el petrolero. El petrolero en sí mismo es visible como punto blanco en el fondo-izquierdo del pulido principal (Fondo-izquierdo de la imagen). Las áreas negras a lo largo de la costa española cerca de la ciudad de Vigo son debido a las aguas tranquilas y no engrasadas.

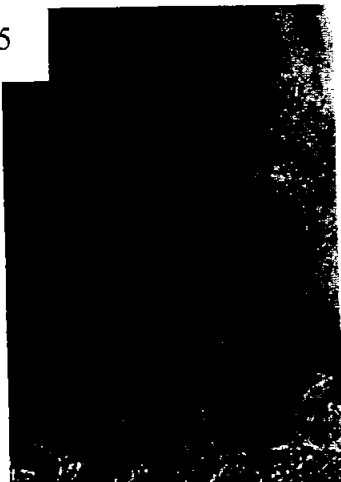
3. Adquisición de ERS SAR el 16 de diciembre (órbita 40028). Alta probabilidad de la capa de petróleo. La ciudad a lo largo de la costa (racimo de puntos brillantes) es Santander (región de Cantabria).



4. Adquisición de ENVISAT ASAR el 16 de diciembre por la noche (órbita 4156). Alta probabilidad de las capas de petróleo derramado.



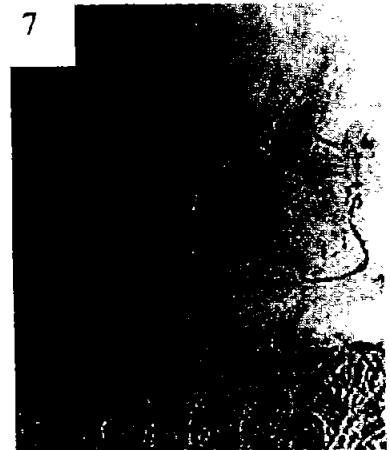
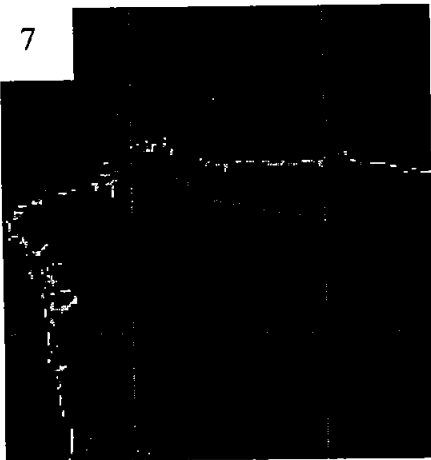
5. Adquisición de ERS SAR el 19 de diciembre (órbita 40071). Posibles capas de petróleo. La ciudad a lo largo de la costa (racimo de puntos brillantes a la izquierda) es Gijón (la región de Asturias).



6. Adquisición de ENVISAT ASAR el 19 de diciembre por la noche (órbita 4206). Posibles capas de petróleo. La imagen, cubre costas españolas y francesas.



7. Adquisición de ERS SAR el 22 de diciembre (órbita 40114). El área oscura de la derecha muestra alta probabilidad de capa de petróleo. La imagen toma las regiones excesivas de Galicia y Asturias.



6.2 Ejemplo de dos imágenes del derrame petrolero del buque PRESTIGE

Tomando la siguiente imagen como nuestra imagen base, se muestran dos ventanas para segmentarlas y obtener sus parámetros de textura y poder fusionarlas por un método estocástico y obtener una imagen clasificada en dos clases:

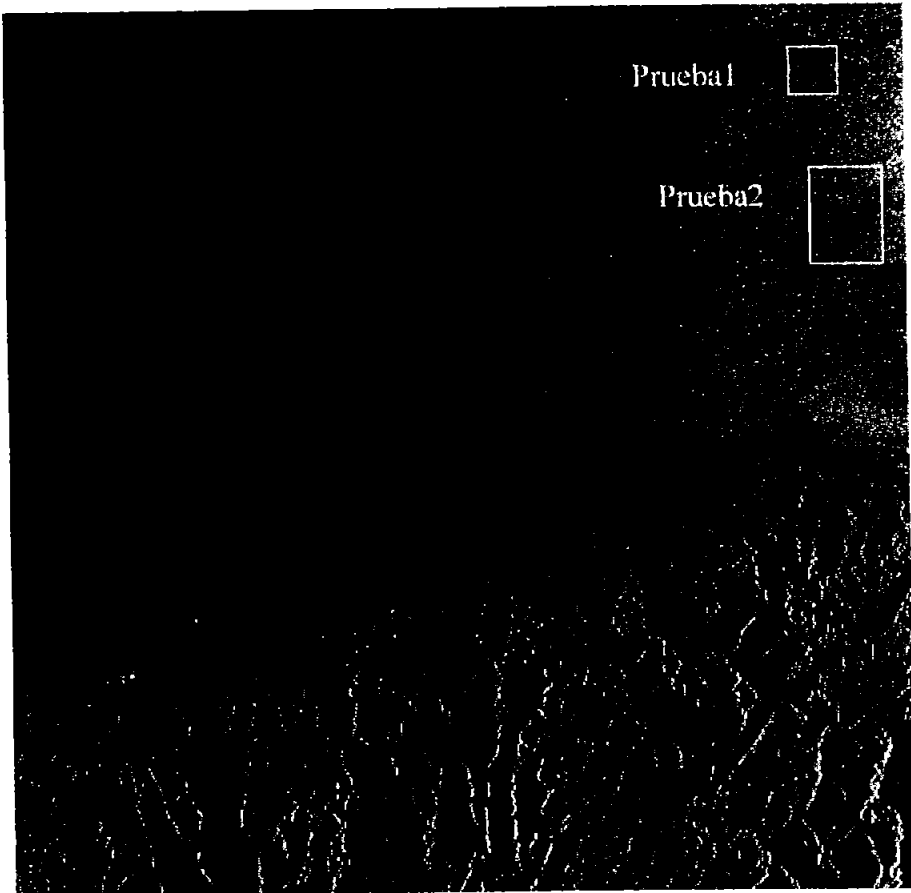


IMAGEN ORIGINAL DEL DERRAME, DONDE OBTENDREMOS SÓLO DOS MUESTRAS PARA ANALIZAR.

Analicemos la imagen **Prueba1** con una dimensión de 201 x 201 píxeles y una escala de 255 niveles de gris.

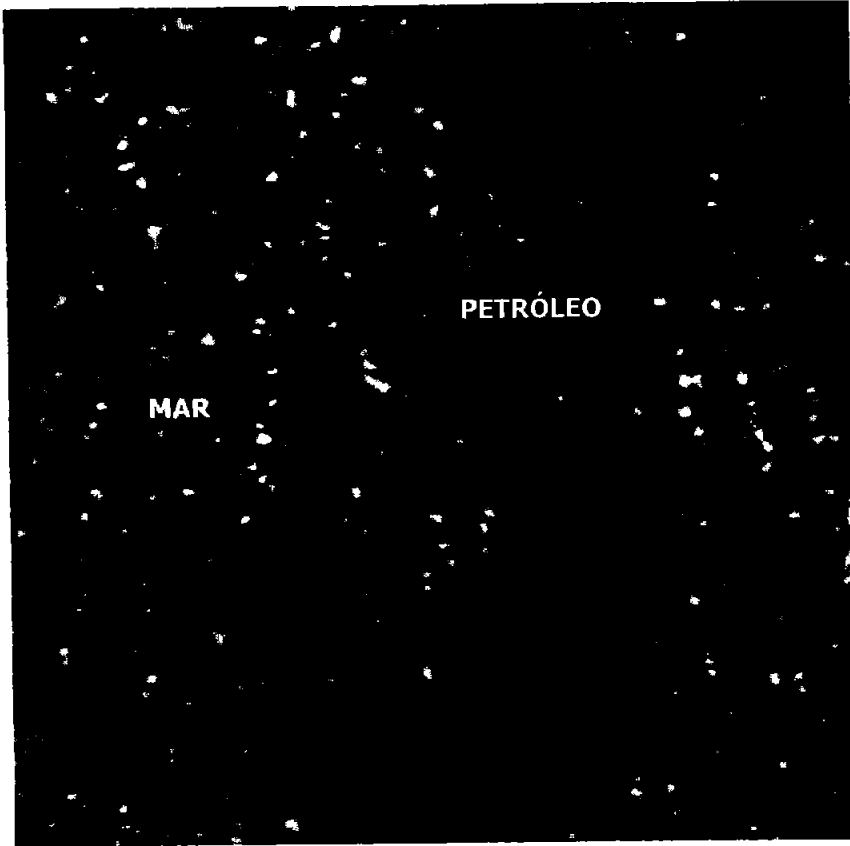
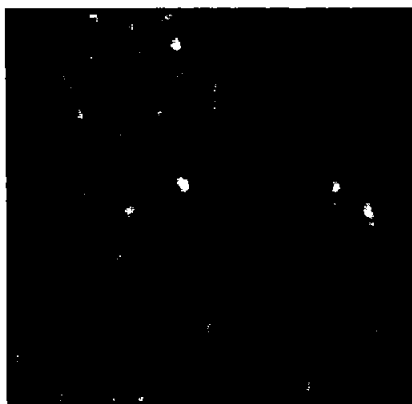
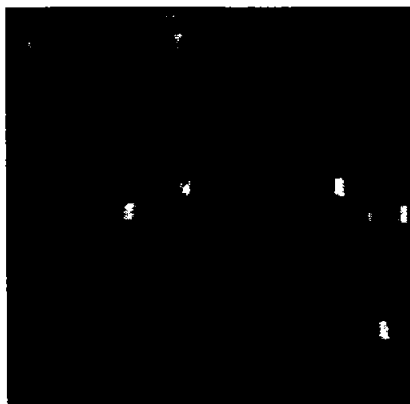


IMAGEN PRUEBA1

Ahora veremos diferentes imágenes de textura obtenidas por el algoritmo estadístico de la Matriz de Coocurrencia (GLCM).



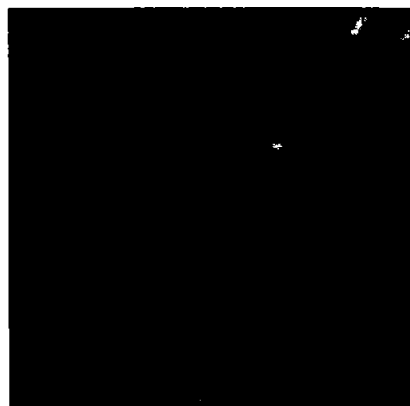
AUTOCORRELACIÓN



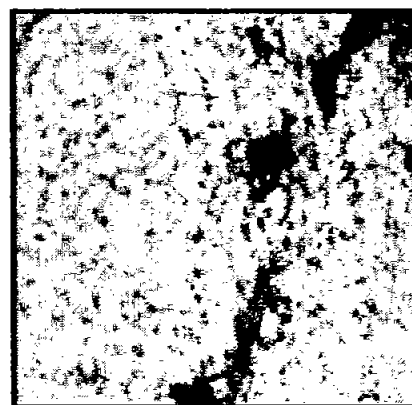
CLUSTER SHADE



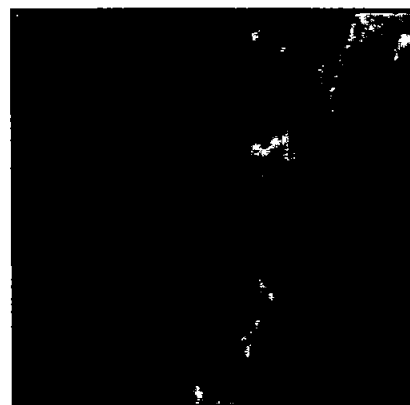
DISIMILARIDAD



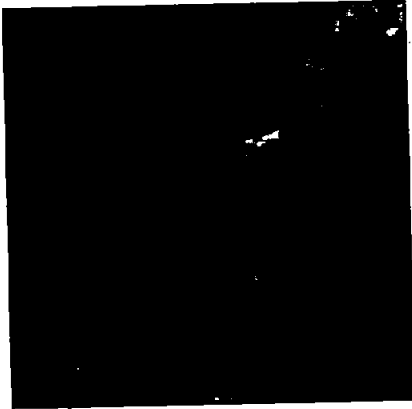
ENERGÍA



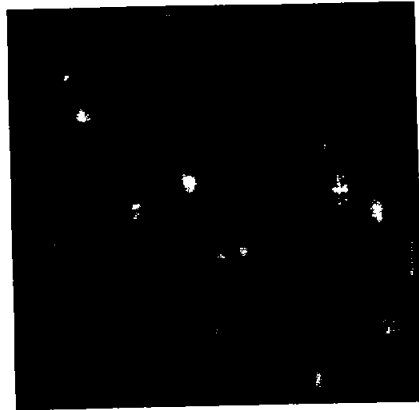
ENTROPIA



HOMOGENEIDAD O MOMENTO



MÁXIMA PROBABILIDAD

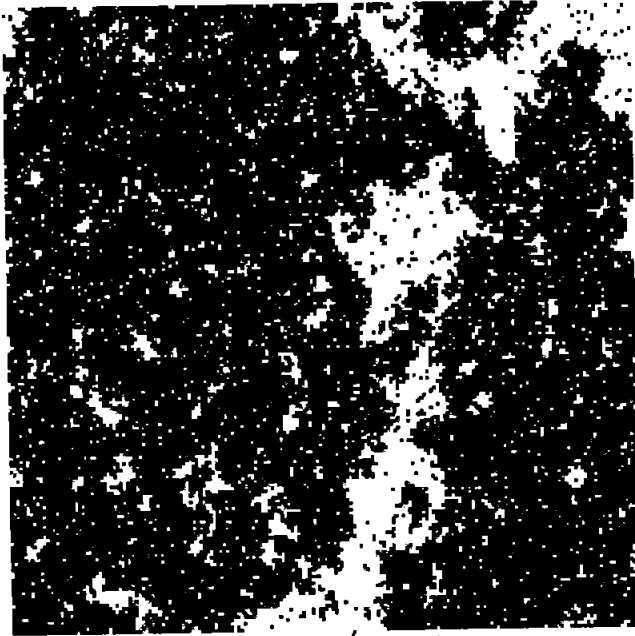


VARIANZA

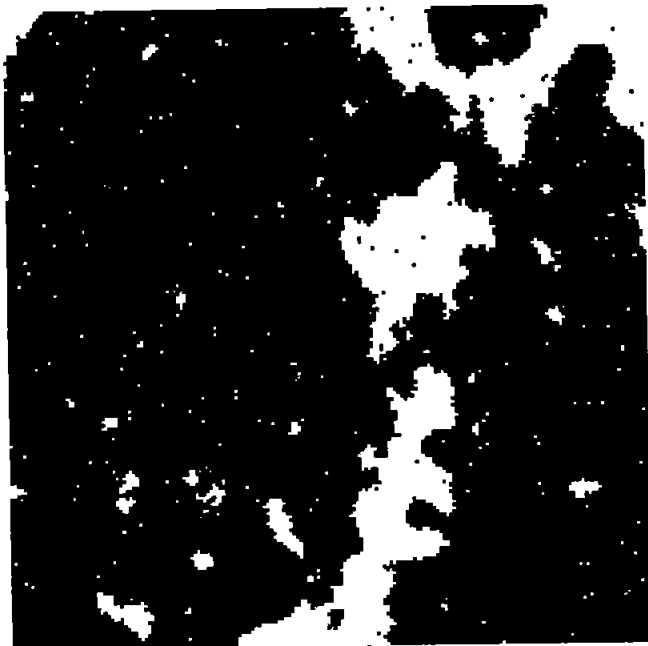
Estas son algunas imágenes de textura para la imagen de *prueba1*. De estas imágenes vamos a tomar solo algunas para fusionarlas y encontrar los efectos de los Campos de Markov para analizar la imagen.

Si tomamos las imágenes de autocorrelación, disimilaridad, entropía y homogeneidad ya que estas son las imágenes más claras y visibles, podemos fusionarlas con el algoritmo de los Campos Aleatorios de Markov.

Aplicando el análisis de Markov, para obtener una imagen de dos clases: asignando una clase para el mar y otra clase para el petróleo, obtenemos como resultado una imagen en dos tonos de grises; para distinguir la diferencia. Las imágenes obtenidas en diferentes reiteraciones, se muestran a continuación:



ITERACIÓN (20)



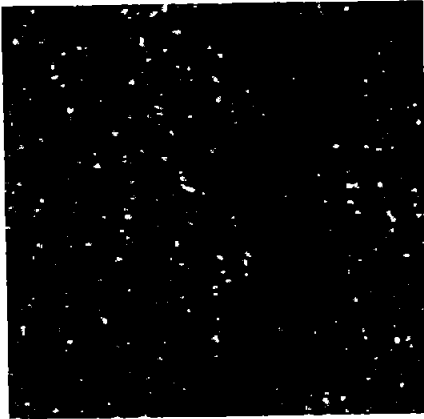
ITERACIÓN (30)



ITERACIÓN (40)

Mientras más iteraciones hagamos, la imagen se define mejor. Aquí se presento sólo hasta la iteración 40, pues considero que es una prueba efectiva para comprender el análisis.

Comparando con la imagen original, podemos observar claramente la diferencia entre la zona de mar (negro) y la zona de petróleo (blanco) en esta imagen clasificada.

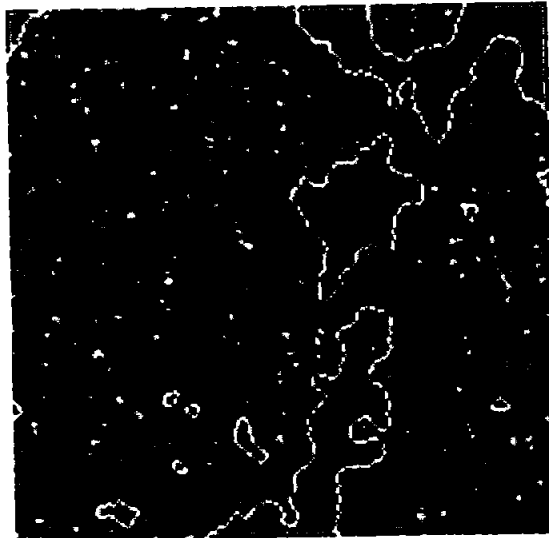


ORIGINAL



FUSIONADA

Y si sobreponemos la imagen fusionada sobre la imagen original, en forma de contorno, vemos la similitud de la imagen procesada con los elementos de la imagen original.



Realizando el mismo procedimiento para la imagen **Prueba2** con una dimensión de 251 x 201 píxeles y una escala de 255 niveles de gris.

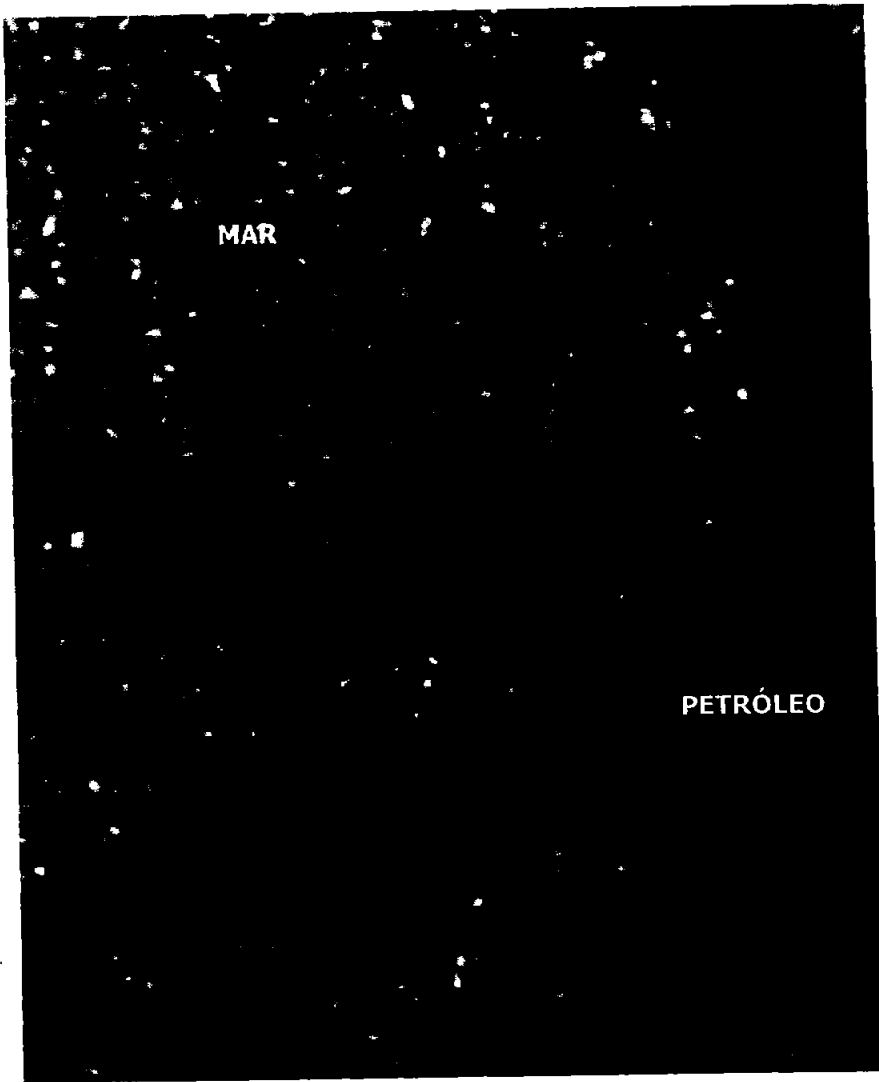
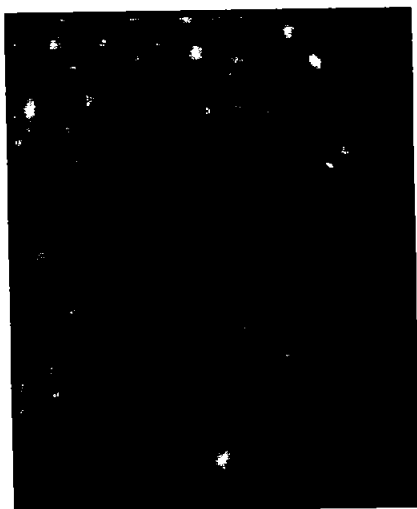
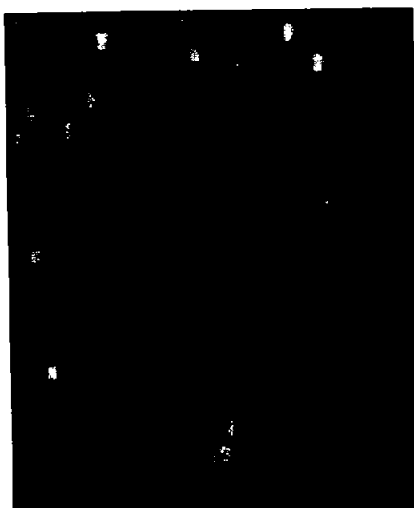


IMAGEN PRUEBA2

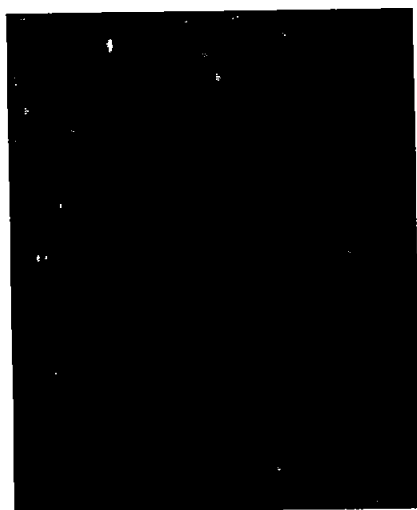
Ahora veremos diferentes imágenes de textura obtenidas por el algoritmo de la Matriz de Coocurrencia.



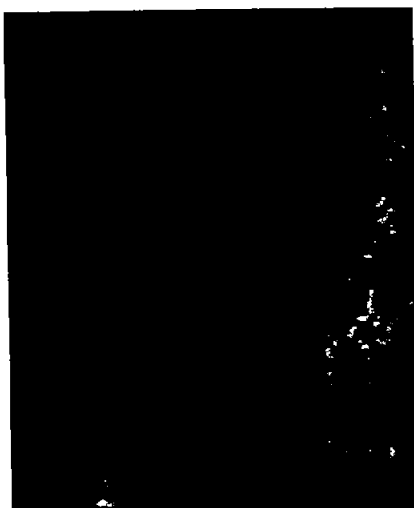
AUTOCORRELACIÓN



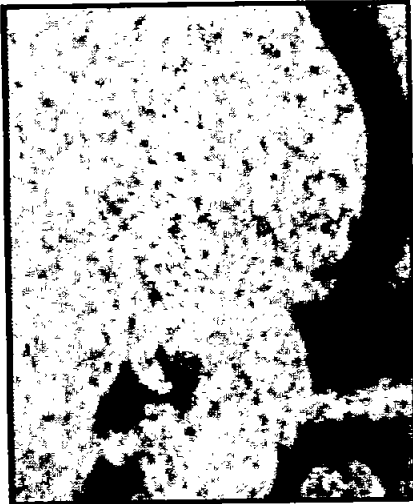
CLUSTER SHADE



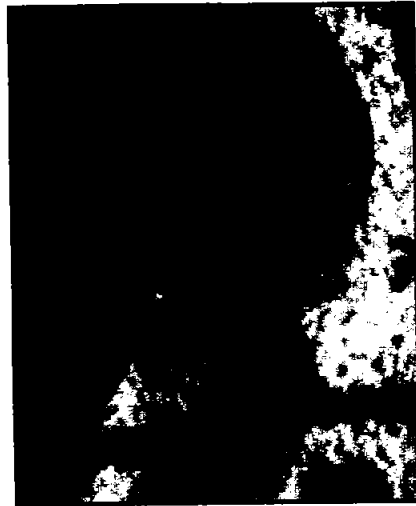
DISIMILIRARIDAD



ENERGÍA



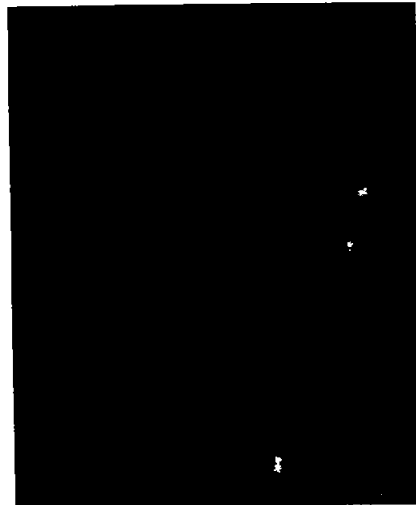
ENTROPÍA



HOMOGENEIDAD O MOMENTO

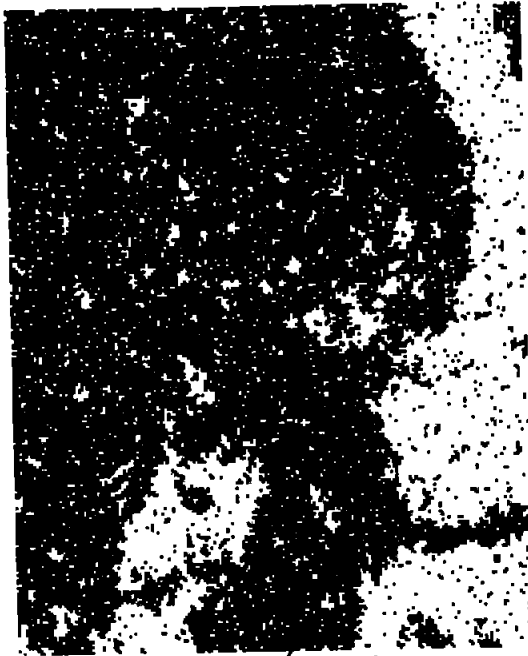


MÁXIMA PROBABILIDAD



CONTRASTE

Tomamos las imágenes de autocorrelación, disimilaridad, entropía y homogeneidad; al igual que la anterior estas son las imágenes más claras y visibles para poder encontrar la fusión.



ITERACIÓN (20)



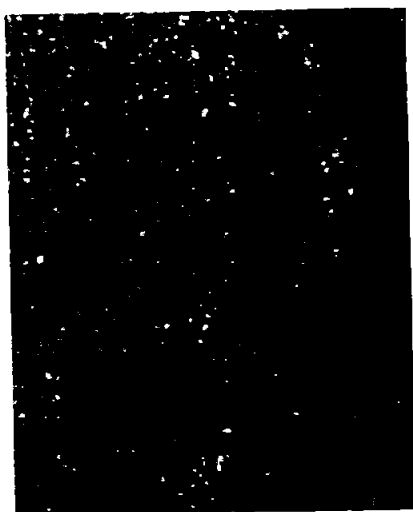
ITERACIÓN (30)



ITERACIÓN (40)

También se puede observar que hay una clara diferencia entre el mar y el petróleo; asemejándose a la original.

Comparando la imagen procesada (fusión) con la imagen original vemos:



ORIGINAL



FUSIONADA

Y si sobreponemos la imagen fusionada sobre la imagen original, en forma de contorno, vemos la similitud de la imagen procesada con los elementos de la imagen original.



7. CONCLUSIONES

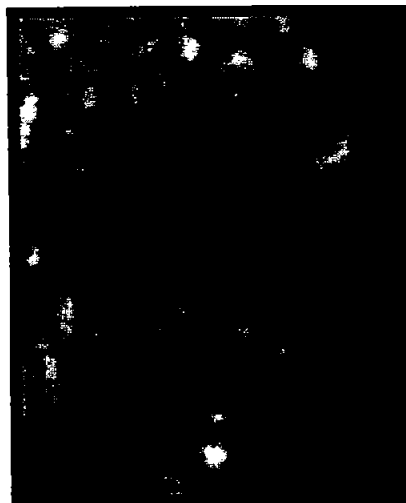
Durante la exposición de esta tesis, he hecho una breve investigación sobre los procesos de obtención de las imágenes SAR y algunos tratamientos de las mismas.

Las imágenes de Percepción Remota son muy comunes de emplear en el área del Procesamiento de Imágenes; pues por la precisión y facilidad que estas nos brindan se pueden realizar detecciones de desastres naturales y comprender las dimensiones del problema; como el ejemplo que se expuso sobre el derrame de petróleo del buque Prestige, en el año 2002.

La clasificación de la imagen original a través de un proceso estadístico como la Matriz de Coocurrencia, permite segmentar la imagen en diferentes texturas para poder filtrar objetos pequeños que pueden no dar información en la imagen. Como se explicó, la matriz puede emplear diferentes tamaños de ventanas para el píxel, donde dependiendo de esta la clasificación de la imagen es diferente; por ejemplo:



Para ventana de 2x2



Para ventana de 5 x 5

Donde podemos observar, que la imagen de la misma textura pero con diferentes tamaños de ventana, no son iguales. Y una de ellas se ve con mayor claridad que la otra dándonos la idea de que si utilizamos diferentes ventanas, la información de la imagen cambia.

Posteriormente, un análisis estocástico como los Campos Aleatorios de Markov, permiten fusionar las mejores imágenes de textura obtenidas para tener como resultado una imagen clasificada. Pues el análisis de fusión permite observar la imagen sin elementos innecesarios para comprender el problema y la situación de la imagen. Por ejemplo:



Imagen fusionada con Markov

Si la comparamos con la imagen de textura, estas manejan diferentes píxeles que no nos dan información relevante; y al analizar la imagen de fusión, estos píxeles ya no aparecen, pues se clasificó sólo en dos valores de píxel, que permite analizar la información necesaria de la imagen.

Como se mencionó, se obtuvieron las diferentes imágenes de textura con la Matriz de Coocurrencia; este método estadístico tiene la opción de manejar diferentes tamaños de ventana, para el barrido de la imagen original, como se vio en las dos ventanas

anteriores. En diferentes tamaños de ventana se ve la diferencia en la visión de la imagen.

Una vez obtenidas las diferentes texturas, elegí las que tenían mejor resolución y las procesé con el método estocástico de los Campos de Markov; el cual me permitió fusionar las texturas tomadas y obtener una imagen clasificada.

Esta imagen fue de dos clases porque así pude distinguir las diferencias de la misma; el área oscura que representa el mar y el área clara que representa el petróleo derramado. La imagen final que presenté en los resultados, fue el resultado de realizar 40 iteraciones del proceso de Markov, pues la considero como una imagen óptima para interpretar los resultados; ya que, el método original de Markov requiere de un número infinito de iteraciones para optimizar el resultado.

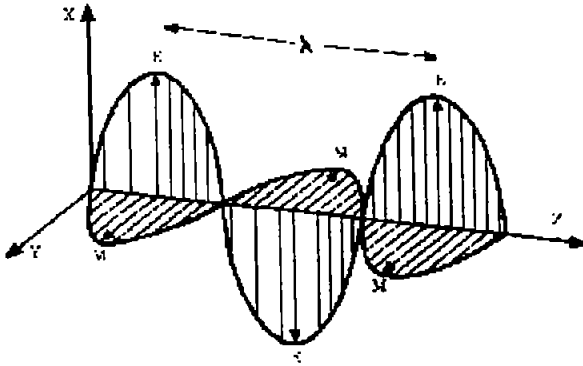
Por lo que puedo concluir que estos métodos son muy útiles para el procesamiento de imágenes SAR.

Con esta tesis, les dejo a los estudiantes un material de apoyo para el estudio de las imágenes de Percepción Remota. Y con esta investigación se puede continuar con un desarrollo referida a una "Validación con expertos", tema posterior para un análisis completo de las imágenes de Percepción Remota.

APÉNDICE A

Espectro Electromagnético

La radiación (ondas) electromagnética está constituida por diversas características físicas (intensidad, longitud de onda, frecuencia, energía, polarización, etc...). Independientemente de esas características, todas las ondas electromagnéticas son esencialmente idénticas, presentando independencia con relación a la existencia o no de un medio de propagación (propiedad importante de este proceso de transferencia de energía). Esta independencia es fácil de entender a través de la figura a continuación. El campo eléctrico y el campo magnético son perpendiculares entre sí y ambos oscilan perpendicularmente a la dirección de propagación de la onda, así el campo eléctrico genera un campo magnético y el campo magnético genera un campo eléctrico.



Donde:

E = Campo eléctrico

M = Campo magnético

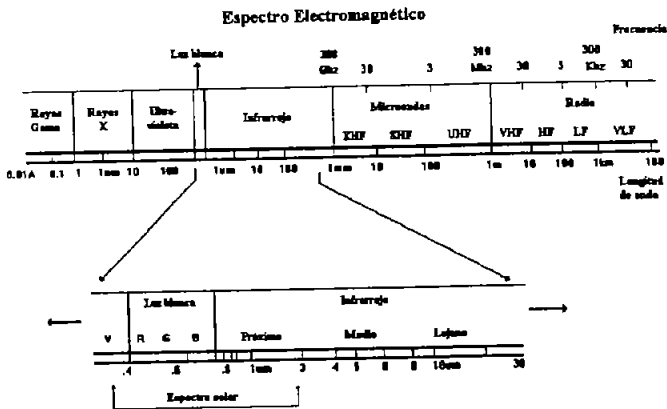
La velocidad de propagación de la onda electromagnética en el vacío corresponde a la velocidad de la luz (3×10^8 m/s). El número de ondas que pasa por un punto del espacio en un determinado tiempo, define la frecuencia (f) de la radiación. La frecuencia de onda es directamente proporcional a la velocidad de propagación de la radiación. Cuanto mayor es la velocidad de propagación de la onda, mayor es el número de ondas que pasarán por un punto en un tiempo dado (t) y mayor será su frecuencia. La velocidad de propagación (v) en un medio dado es constante.

La onda electromagnética también puede ser caracterizada por la longitud de onda (λ) que puede expresarse por la ecuación:

$$\lambda = v / f$$

La banda de longitud de onda o frecuencias en que se puede encontrar la radiación electromagnética es ilimitada.

Este espectro es subdividido en bandas, representando regiones que poseen características peculiares en términos de los procesos físicos, generadores de energía en cada banda, o de los mecanismos físicos de detección de esta energía. Dependiendo de la región del espectro, se trabaja con energía (electro-volts), longitudes de onda (micrómetro), o frecuencia (hertz). Por ejemplo: en la región de los rayos gama y cósmicos, se usa energía; en la región entre ultravioleta e infrarrojo, se usa longitud de onda; y en la región entre microondas y radio, se utiliza frecuencia. Las principales bandas del espectro electromagnético se describen a más adelante y están representadas en la siguiente figura.



Espectro Electromagnético.

Ondas de radio: bajas frecuencias y grandes longitudes de onda. Las ondas electromagnéticas en esta banda son utilizadas para la comunicación a larga distancia, ya que, además de ser poco

atenuadas por la atmósfera, son reflejadas por la ionosfera, propiciando una propagación de largo alcance.

Microondas: se sitúan en la banda de 1 mm a 30 cm o 3×10^{11} a 3×10^9 Hz. En esta banda de longitudes de onda se puede construir dispositivos capaces de producir haces de radiación electromagnética altamente concentrados, llamados radares. La poca atenuación por la atmósfera o por las nubes, hace propicio un excelente medio para uso de sensores de microondas en cualquier condición climática.

Infrarrojo: de gran importancia para la Percepción Remota. Engloba la radiación con longitudes de onda de $0,75 \mu\text{m}$ a 1,0 mm. La radiación infrarroja es fácilmente absorbida por la mayoría de las sustancias (efecto de calentamiento).

Visible: es definida como la radiación capaz de producir la sensación de visión para el ojo humano normal. Presentan una pequeña variación de longitud de onda (380 a 750 nm). Importante para la Percepción Remota, ya que las imágenes obtenidas en esta banda, generalmente presentan una excelente correlación con la experiencia visual del intérprete.

Ultravioleta: extensa banda del espectro (10 nm a 400 nm). Películas fotográficas son más sensibles a la radiación ultravioleta, que a la luz visible. Esta banda es utilizada para la detección de minerales por luminiscencia y polución marina. Uno de los grandes obstáculos para la utilización de esta región del espectro, es la fuerte atenuación atmosférica.

Rayos X: Banda de 1 \AA a 10 nm ($1 \text{ \AA} = 10^{-10} \text{ m}$). Son generados predominantemente, por la parada o frenado de electrones de alta energía. Por estar constituido por fotones de alta energía, los rayos X son altamente penetrantes, siendo una poderosa herramienta en la investigación sobre la estructura de la materia.

Rayos GAMA: son los rayos más penetrantes de las emisiones de sustancias radioactivas. No existe, en principio, límite superior para la frecuencia de las radiaciones gama, aunque se encuentre aún una banda superior de frecuencias para la radiación, conocida como rayos cósmicos.

APÉNDICE B

La tabla siguiente presenta las características de los sistemas Landsat, SPOT, ERS-1, Envisat e Ikonos.

	Landsat 4 y 5	SPOT 1 y 2	ERS-1	ENVISAT	IKONOS
Órbita	circular 98,2 grados heliosíncrona	circular 98,7 grados heliosíncrona	circular 98,5 grados heliosíncrona	circular 98 grados heliosíncrona	circular 98,1 grados sunsíncrona
Período	99 minutos	97 minutos	100,467 minutos	100 minutos	98 minutos
Altitud	705 Km	832 Km	785 Km	800 Km	680 Km
Cruce	9:45 horas	10:39 horas	10:30 horas (desc.)	-	-
Ciclo	16 días	26 días	35 días (SAR)	-	-
Órbita adyacente	172 Km	108 Km	100 Km	-	-
Órbita sucesiva	2.750 Km	2.700 Km	-	-	-

APÉNDICE C

Bandas espectrales y resolución espectral.

- ✓ Las bandas espectrales visible y del infrarrojo tienen la resolución espacial de 30m del Landsat5 (conductos 1, 2, 3, 4, 5 y 7).
- ✓ Las bandas del infrarrojo termal (conductos 6L y 6H) pasan a ser adquiridos con la resolución de 60m, contra 120m en el Landsat5.
- ✓ A la nueva banda Pancromática (conducto 8) tiene 15m de resolución espacial.

La tabla, ilustra abajo las diferencias de resolución espectral entre el sensor TM del Landsat5 y el sensor ETM+ del Landsat7. Los valores abajo están en micros (μ); y representan los límites de las longitudes de onda de sensibilidad del espectro de bandas:

Sensor	Band 1	Band 2	Band 3	Band 4	Band 5	Band 6	Band 7	Band 8
TM	0.45 0.52	0.52 0.60	0.63 0.69	0.76 0.90	1.55 1.75	10.4 12.5	2.08 2.35	
ETM+	0.45 0.52	0.53 0.61	0.63 0.69	0.78 0.90	1.55 1.75	10.4 12.5	2.09 2.35	0.52 0.90

La banda Pancromática – (Band 8)

La banda Pancromática es la novedad más grande en el Landsat7 y el sensor ETM+. A sus 15m de resolución espacial registrado con las bandas, también facilitan la generación de imágenes por el sensor ETM+ del satélite Landsat7, que trabajaran para ampliar a escalas de 1:25000. Trabajar en la banda espectral de 0.52 - 0.90 (μ m) generan una imagen de separabilidad en el punto de interés del área rural y urbana.

La banda termal – (Band 6)

El Landsat7 genera la banda 6 con bajas ganancias (Conducto 6L) y altas ganancias (Conducto 6H). Eso permite varias opciones del análisis y la aplicación, se obtiene la medida relativa de la radiación de la temperatura o el cálculo absoluto de la temperatura.

APÉNDICE D

Distribución de Gibbs.

Diremos que un conjunto de variables aleatorias F es un *Campo Aleatorio de Gibbs* en S con respecto a N si y sólo si sus configuraciones siguen una distribución de Gibbs. Una distribución de Gibbs tiene la siguiente función de densidad:

$$P(f) = \frac{1}{Z} \exp - \frac{1}{T} U(f) \quad (1)$$

donde

- $U(f)$ = función de energía
- Z = constante de normalización
- T = temperatura

La función de energía $U(f)$ viene definida por:

$$U(f) = \sum_c V_c(f) \quad (2)$$

suma de las funciones "clíque potenciales", $V_c(f)$, para todas las clíques posibles C . El valor de $V_c(f)$ depende de la configuración local de la clíque c . Obviamente, la distribución Gaussiana es un caso especial de la familia de distribución de Gibbs.

Diremos que un Campo Aleatorio de Gibbs es homogéneo si $V_c(f)$ es independiente de la posición relativa de la clíque c en S . Es considerablemente más simple especificar un distribución de Campo Aleatorio de Gibbs si es homogéneo o isotrópico que si no lo es. La homogeneidad se asume en la mayoría de los modelos de Campos Aleatorios de Markov en visión por conveniencia matemática y computacional. La isotropía es una propiedad de regiones independientes de la dirección.

$P(f)$ mide la probabilidad de la ocurrencia de una configuración determinada, o patrón f . Las configuraciones más probables son aquellas con energías más bajas. La temperatura T controla la forma de la distribución. Cuando la temperatura es alta, todas las configuraciones tienden a estar igualmente distribuidas. Con la temperatura cercana a cero, la distribución se concentra

alrededor de los mínimos globales de la energía. Dada T y $U(f)$, podemos generar la "clase de patrones" muestreando el espacio de configuraciones \mathfrak{S} de acuerdo con $P(f)$.

Para los problemas de etiquetado discretos, una función *clíque potencial* $V_c(f)$ se puede especificar por un número de parámetros. Por ejemplo, sea $f_c = (f_i, f_j, k_k)$ la configuración local es una *clíque triple* $c = (i, j, k)$, f_c toma un número finito de estados y, por lo tanto, toma un número finito de valores. Para los problemas de etiquetado continuos, f_c puede variar continuamente. En este caso, $V_c(f)$ es una función continua (posiblemente a trozos) de f_c .

A veces, puede ser conveniente expresar la energía de una distribución de Gibbs como la suma de varios términos, cada una correspondiente a *clíques* de distinto tamaño, es decir:

$$U(f) = \sum_{c \in C} V_c(f) = \sum_{\{i\} \in C_1} V_1(f_i) + \sum_{\{i,j\} \in C_2} V_2(f_i, f_j) + \dots \quad (3)$$

La función anterior implica una distribución homogénea de Gibbs porque V_1, V_2, \dots , son independientes de las localizaciones i, j, k . En distribuciones no homogéneas de Gibbs, las funciones *clíques* se deben escribir como: $\text{balada pop}_1(i, f_i), V_2(i, j, f_i, f_j), \dots$

Un caso especialmente importante es cuando sólo se consideran las *clíques* de tamaño dos como máximo. En este caso, la energía puede también ser escrita como

$$U(f) = \sum_{i \in S} V_1(f_i) + \sum_{i \in S} \sum_{j \in N_i} V_2(f_i, f_j) \quad (4)$$

Considerando el segundo sumatorio de la ecuación (4), y siendo $\{i, j\}$ y $\{j, i\}$ dos *clíques* distintas en C_2 (ya que los estados de la *clíque* están ordenados), la probabilidad condicional puede escribir como

$$P(f_i | f_{N_i}) = \frac{e^{-[V_1(f_i) + \sum_{j \in N_i} V_2(f_i, f_j)]}}{\sum_{f_i \in L} e^{-[V_1(f_i) + \sum_{j \in N_i} V_2(f_i, f_j)]}} \quad (5)$$

REFERENCIAS

Capítulo 2

<http://www.teledet.com.uy/quees.htm>

http://www.dpi.inpe.br/spring/usuario_spa/radar_in.htm#geracao_radar

http://www.dpi.inpe.br/spring/usuario_spa/sensorr.htm

Capítulo 3

http://www.envisat.esa.int/news/launch_housing.htm

<http://www.ea1uro.com/envisat.html>

<http://www.labsis.usc.es/prestige/envisat.htm>

<http://landsat7.usgs.gov/index.php>

<http://www.kodak.com/US/en/government/ias/heritage/ikonos.shtml>

<http://www.engesat.com.br/satelites/ikonos.htm>

<http://www.spaceimaging.com/aboutus/satellites/IKONOS/ikonos.html>

<http://www.spaceimaging.com/>

<http://www.spaceimaging.com/products/catalog/catalog2.pdf>

<http://www.engesat.com.br/satelites/landsat7.htm>

<http://www.engesat.com.br/satelites/envisat.htm>

<http://www.eurimage.com/envisat.html>

<http://envisat.esa.int/>

<http://www.esa.int/envisat>

<http://www.esa.int/envisat/instruments.html>

<http://www.spotimage.fr/home/news/radar/envisat/welcome.htm>

Capítulo 4

<http://www.crisp.nus.edu.sg/~liew/projects.html>

<http://dbwww.essc.psu.edu/lasdoc/user/struct.html>

<http://www.cnr.berkeley.edu/~gong/textbook/chapter7/html/sect74.htm>

http://www.space.hut.fi/~jarkko/liskurs/htyo_lm/htyo_lm.htm

Holecz, F., Meier, E., Nüesch, D. 1993. Postprocessing of relief induced radiometric distorted spaceborne SAR imagery. In: Schreier, G. (Ed.). SAR Geocoding: Data and Systems. Karlsruhe, Wichmann. Pp. 299-352.

Oliver, C. and Quegan, S. 1998. Understanding Synthetic Aperture Radar Images. Artech House.

PCI 1995. EASI/PACE Reference Manuals, on-line help. Xpace, Version 6.0.1, December 1, 1995.

PCI 1996. Using PCI Software, Volumes I and II. Version 6.0 EASI/PACE, January 1, 1996. 530 p.

Schistad Solberg, A. H. and Jain, A. K. 1997. Texture fusion and feature selection applied to SAR imagery. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 35, No. 2, pp. 475-479.

Ulaby, F. T., Kouyate, F., Brisco, B., Williams, T. H. L. 1986. Textural information in SAR images. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. GE-24, No. 2, pp. 235-245.

Ebert, E. A pattern recognition technique for distinguishing surface and cloud types in the polar regions, *J. Clim. Appl. Meteorol.*, 26, 1412-1427, 1987.

Wezka, J. S., C. R. Dyer, and A. Rosenfeld, A comparative study of textura measures for terrain classification, *IEEE Trans. Syst. Man Cybern.*, SMC-6, 269-285, 1976.

A. Baraldi and F. Parmiggiani. "An investigation of the textural characteristics associated with gray level coocurrence matrix statistical parameters." *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, vol. 33, pp. 293-304, Mar. 1995.

Capítulo 5

Arques, P., Compañ, P., Escolano, F. Molina, R. Pujol, M. and Rizo; "*Procedure of annealing for image segmentation: energy function with robust features*". VIII Symposium Nacional de reconocimiento de Formas y Análisis de Imágenes, Vol 1, Bilbao, 1999.

Besag, J. "*Statistical analysis of non-lattice data*". *The Statistician*, 1975.

Chellapa, R. "*Two-dimensional discrete Gaussian Markov random field models for image processing*". In Kanal, L. N. and Rosenfeld, A., editors, *Progress in Pattern Recognition* 2.

Derin, H. and Cole, W. S. "*Modeling and segmentation of noisy and textured images using Gibbs random fields*". *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1987.

Elliott, H. Derin, H., Crist, R., and Geman, D. "*Application of the Gibbs distribution to image segmentation*". In Proceedings of the International Conference on Acoustic, Speech and Signal Processing, San Diego, 1984.

Geman, S. and Geman, D. "*Stochastic relaxation, Gibbs distribution and the Bayesian restoration of images*". IEEE Transactions on PAMI, 1984.

Zadeh, Fuzzy sets. *IEEE trans. On Information and Control*, 1965.

M. Sigelle R. Ronfard. Relaxation of previously classified images by a Markov field technique and its relationship with statical physics. 1991.

Capítulo 6

http://earth.esa.int/ew/oil_slicks/galicia_sp_02/os_galicia_nov_02.html