

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

MODELO MARKOVIANO MULTIVENTANA DE SEGMENTACIÓN

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
INGENIERO EN COMPUTACIÓN
P R E S E N T A N:

LILIANA ELIZABETH AGUILAR NAVARRO
ISRAEL BECERRIL SIERRA



DIRECTOR DE TESIS:
DR. MIGUEL MOCTEZUMA FLORES

MÉXICO, D. F. 2005

... todo, visto desde allá arriba, es distinto, y eso es ya una diversión.

Italo Calvino.
“El barón rampante” 1998

Agradecimientos

A Dios por el regalo de estar aquí y ahora, por guiarme en este fascinante recorrido por la vida.

A mis padres Alfredo Aguilar Sayago y Dolores Navarro Godínez por el apoyo y amor que en cada momento de mi vida me han brindado, por vivir junto conmigo cada esfuerzo, cada desvelo, cada logro y cada alegría, por darme las alas que necesito para volar.

A mis hermanos Alfredo, Jeanette, Aldo, Martín y Jesús por su apoyo y cariño, por los inolvidables momentos juntos desde la infancia, por los lazos que nos unirán siempre.

A Sergio Roberto Arzamendi Pérez, por tu amor y apoyo incondicional en todo momento, por la dicha de ser felices juntos. El amor es la poesía de los sentidos..

A mis profesores, con especial cariño e infinito agradecimiento a Juan Velázquez Torres por su enseñanza, sinceridad, apoyo y consejos, por no ignorar mis errores, porque sin saberlo es un ángel que ha estado conmigo en momentos precisos.

A mis amigos por los momentos vividos juntos, por su apoyo y cariño, la amistad no sólo se comunica por los sentidos.

Al Dr. Miguel Moctezuma Flores por su apoyo y orientación en la realización de esta tesis.

A la Universidad Nacional Autónoma de México, por ayudar en mi formación profesional y humana.

A la Facultad de Ingeniería, por las experiencias vividas, por contribuir en mi superación personal.

Liliana Elizabeth Aguilar Navarro

Dedicada a:

Virginia Sierra

Eleuterio Becerril

Ricardo y Concepción

Freddy

Sergio

Crecencia

Israel Becerril Sierra

Agradecimientos:

Universidad Nacional Autónoma de México

Facultad de Ingeniería

Dr. Miguel Moctezuma Flores

Hilda, Carmen, Santiago, Sara, Ruth, Ricardo Julia

Israel Becerril Sierra

Índice

1. INTRODUCCIÓN **1**

1.1 Objetivos 1
1.2 Planteamiento del problema 1
1.3 Metodología empleada 3
1.4 Aportación de la tesis 3

2. FUNDAMENTOS DE PERCEPCIÓN REMOTA **5**

2.1 Descripción general 5
2.2 Principios y fundamentos 6
2.2.1 Plataformas de observación 7
2.2.1.1 Terrestres 7
2.2.1.2 Aéreas 8
2.2.1.3 Espaciales 8
2.2.2 Sistemas de adquisición 10
2.2.2.1 Cámaras aéreas 11
2.2.2.2 Radar 12
2.2.2.3 SLAR (Radar Aéreo de Vista Lateral) 12
2.2.2.4 SAR (Radar de Apertura Sintético) 13
2.2.2.5 Barredores electrónicos térmicos en infrarrojo 13
2.2.2.6 Ecosondas y sonares 13
2.2.2.7 Lidares (Radares de Láser) 14
2.2.3 Tipos de datos obtenidos en la Percepción Remota 14
2.2.3.1 Fotografía aérea 14
2.2.3.2 Imágenes de radar 18
2.2.3.3 Imágenes multiespectrales 18
2.2.3.4 Satélites con sensores activos 19
2.2.4 Propiedades de los sistemas de adquisición 20
2.2.5 El espectro electromagnético 23
2.2.5.1 Radiación electromagnética 25
2.2.5.2 Interacción entre la atmósfera y la radiación electromagnética 26
2.3 Aplicaciones de la Percepción Remota 28

3. SATÉLITES, CAPTORES Y APLICACIONES **32**

3.1 NOAA 32
3.1.1 Características de los satélites NOAA 32
3.1.2 Contribuciones 33
3.1.3 Sensores 33
3.1.4 NOAA 12, NOAA 14, NOAA 15, NOAA 16 y NOAA 17 36
3.2 ENVISAT 38
3.2.1 Características del satélite ENVISAT 39
3.2.2 Contribuciones del satélite ENVISAT 39
3.2.3 Sensores 40
3.3 LANDSAT 41
3.3.1 LANDSAT-1, 2 y 3 42
3.3.1.1 Sensores 42

3.3.2 LANDSAT-4, 5 Y 7 43
3.3.2.1 LANDSAT-5 43
3.3.2.2 LANDSAT-7 44
3.3.2.3 Principales diferencias entre el LANDSAT 7 y el LANDSAT 5 44
3.3.2.4 Bandas espectrales y resolución espacial 44
3.3.2.5 Niveles de corrección geométrica 45
3.4 SPOT 45
3.4.1 SPOT-1, 2 y 3 46
3.4.1.1 Sensores 46
3.4.2 SPOT-4 47
3.4.2.1 Sensores 47
3.4.2.2 Equipos auxiliares 47
3.4.3 SPOT-5 48
3.4.4 Niveles de procesamiento de SPOT-4 Y SPOT-5 48
3.5 PLEIADES 49
3.5.1 Características 50
3.5.2 Contribuciones 52
3.5.3 Simulaciones 53

4. PROBABILIDAD Y CAMPOS ALEATORIOS DE MARKOV 56

4.1 Probabilidad y variables aleatorias 56
4.1.1 Distribución gaussiana 56
4.1.2 Teorema del Límite Central 59
4.2 Procesos estocásticos 60
4.2.1 Campos de Markov 62
4.2.2 Vecindades 65
4.2.3 Cliques 67
4.2.4 Propiedades de Markov 69
4.2.5 Teorema de Bayes y aproximación máximo *a posteriori* 71
4.3 Modelos de Markov 72
4.3.1 Modelo de Ising 72
4.3.2 Modelo de Potts 73
4.4 Optimización 75
4.4.1 Recocido Simulado 75
4.4.2 Esquemas de decremento de temperatura 77
4.5 Modelo gaussiano de energía 78

5. ESQUEMA MULTIVENTANA DE SEGMENTACIÓN 79

5.1 Aproximación por campos aleatorios de Markov 79
5.2 Funciones de energía condicional 83
5.3 Función de energía *a priori* 85
5.4 Esquema Multiventana de Segmentación 87

6. RESULTADOS 94

6.1 Fotografía aérea de alta resolución 94
6.2 Aplicación a la detección de derrames petroleros del buque "Prestige" 105
6.3 Comparación de funcionalidad 116

7. CONCLUSIONES 122

BIBLIOGRAFÍA 125

1

INTRODUCCIÓN

Desde épocas muy remotas, volar ha sido uno de los sueños más anhelados por la humanidad y uno de los principales objetivos ha sido la búsqueda de una nueva visión de los paisajes terrestres. El afán de ampliar la limitada perspectiva de la visión humana es evidente desde los inicios de la aeronáutica y desde ese momento el ritmo de la innovación tecnológica ha sido vertiginoso, lo que nos ha permitido enriquecer notablemente nuestro conocimiento sobre el planeta y sus habitantes.

Esa observación a distancia de la superficie terrestre constituye el marco de estudio de la percepción remota, que no sólo engloba los procesos que permiten obtener una imagen desde el aire o el espacio, sino también su posterior tratamiento, en el contexto de una determinada aplicación.

La percepción remota permite adquirir imágenes de la superficie terrestre a través de diversos instrumentos y sensores instalados en plataformas terrestres, aéreas o bien, plataformas espaciales gracias al desarrollo tecnológico del satélite que permite originar una enorme y diversa cantidad de información de las escenas.

Las imágenes obtenidas pueden almacenarse, procesarse mediante avanzadas técnicas computacionales y en última instancia interpretarse. A éstas imágenes se les aplican algoritmos y métodos para analizar la información que proporcionan y distinguir sus características de homogeneidad, contornos, contraste, sombras, textura, etc.

La segmentación es uno de estos métodos, que nos permite dividir una imagen digital en algunas zonas de interés relacionadas a objetos presentes en la escena y tiene aplicaciones muy importantes en el desarrollo de áreas urbanas, en la agricultura, geología, hidrología y climatología.

1.1 Objetivos

Los objetivos de esta tesis son: investigar sobre análisis y técnicas de representación multiventana, definir un esquema estocástico cooperativo, incorporando datos provenientes de diversas ventanas de análisis y aplicar el esquema en la segmentación de fotografía aérea de alta resolución y en la detección de derrames petroleros.

1.2 Planteamiento del problema

El estudio de las imágenes de percepción remota tiene aplicaciones en muchas áreas de investigación en las que se pretende obtener la información necesaria para una interpretación y una futura toma de decisiones.

Los instrumentos utilizados en las plataformas aéreas y satelitales presentan toda una gama de posibilidades para la adquisición de datos y ofrecen facilidades para el análisis de la escena como cobertura global y periódica, visión panorámica, homogeneidad en la toma de datos, información sobre regiones en distintas bandas del espectro electromagnético y agilidad en el tratamiento digital.

El estudio y evaluación de fenómenos que evolucionan a corto plazo como incendios forestales, inundaciones, etc., y a largo plazo como las erosiones, deforestaciones y crecimiento urbano, constituyen problemas que no se han resuelto en su totalidad por las aproximaciones tradicionales de planeación y modelado urbano.

La fotografía aérea de alta resolución es necesaria para poder definir algoritmos más funcionales y robustos a los reportados en la literatura, para procesos de segmentación y detección de elementos de zonas urbanas. Por ello, se pretende el estudio de un esquema multiventana de segmentación aplicado a una región del valle de México, ciudad en la que existen dificultades crecientes por la falta de información de las estructuras urbanas así como de la evolución de éstas.

Por otra parte, las imágenes adquiridas por los satélites proporcionan varias ventajas frente a la fotografía aérea, como detectar grandes espacios proporcionando una visión amplia de los hechos geográficos y logrando una mejor resolución. Además los sensores óptico-electrónicos facilitan imágenes sobre áreas no accesibles con la fotografía convencional: infrarrojo medio y térmico, micro-ondas. Estas bandas del espectro proporcionan una valiosa información para estudios medio ambientales, registrando problemas imperceptibles al ojo humano.

Uno de los instrumentos más utilizados en percepción remota es el Radar de Apertura Sintética (SAR) que transmite pulsos de energía microondas y, es por ello considerado un sistema sensor remoto activo. El SAR tiene su propia fuente de "iluminación", permitiendo la adquisición de los datos bajo condiciones climatológicas de nubosidad y sin importar si es de día o de noche, su desventaja radica en la presencia de ruido speckle, propios de sistemas láser, radar y ultrasonido, que utilizan fuentes de iluminación coherente.

Las imágenes SAR se caracterizan por la variedad de texturas presentes en la escena. El estudio de las imágenes SAR con algoritmos de segmentación es indispensable para la discriminación de las diferentes clases que se encuentran presentes en la imagen.

El esquema de segmentación planteado también es aplicado a una imagen SAR del derrame del buque petrolero "Prestige" en la que se pretende identificar dos clases: *{petróleo, nopetróleo}.*

En el procesamiento de imágenes, diversas limitantes se imponen al emplear datos de escenas monoculares adquiridas mediante instrumentos pancromáticos. El rango espectral y la resolución espacial, típicamente de entre 10 y 20 m en el tamaño del pixel, condicionan la calidad de los resultados.

Los programas de adquisición de imágenes de percepción remota muestran una tendencia en el incremento de la resolución tanto espectral como espacial. La serie de satélites Spot concluirá próximamente para dar lugar a un sistema diferente e innovador, capaz de proporcionar datos de alta calidad y resolución mejorada. 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.

Es en este contexto que en el presente tema de tesis se pretende el estudio de técnicas estocásticas para la segmentación de imágenes de percepción remota.

La información pancromática proporciona información que describe muy parcialmente a los elementos de una escena de percepción remota. Una mejor descripción puede conseguirse a partir de un análisis multiventana en donde la información de cada ventana pueda conjuntamente aportar mejores datos descriptivos.

El algoritmo a desarrollar tendrá aplicación en imágenes de fotografía aérea de alta resolución, adquirida en zonas urbanas del Distrito Federal. Una segunda aplicación será en la detección del derrame petrolero del buque "Prestige", empleando para ello imágenes SAR de los satélites ERS-2 o ENVISAT.

Diversos estudios deberán emprenderse a fin de determinar los mejores parámetros que aporten el mejor resultado a cada tipo de escena. La definición de un modelo de energía será también objeto de la presente tesis.

1.3 Metodología Empleada

Para aplicar el modelo markoviano de segmentación, se eligieron tres imágenes de diferentes zonas del sur de la Ciudad de México que presentan regiones urbanas y no urbanas, para que mediante los algoritmos propuestos se realizará la segmentación en 5 clases de tonos de gris.

En el caso de las imágenes SAR, se eligieron dos zonas que presentan alta probabilidad de derrame de petróleo, y en este caso segmentar en dos clases: *{petróleo, nopetróleo}*.

Las imágenes se procesaron en formato crudo (raw) y en 256 niveles de gris, con un tamaño de 512 x 512 pixels.

Los pasos a seguir para segmentar cada imagen, fueron: seleccionar ventanas de la imagen original dependiendo del número de clases a segmentar, 5 en el caso de las imágenes de fotografía aérea y 2 en las imágenes de derrame de petróleo, después se determinaron los valores más adecuados en la distancia de las vecindades, temperatura, parámetros de correlación entre pixels, etc.

La segmentación se basa en Campos Aleatorios de Markov y está formulada dentro del campo de trabajo Bayesiano. La solución óptima de un problema se define como el estimador de probabilidad máxima a posteriori (MAP), el mejor que se puede obtener a partir de observaciones aleatorias. La mayoría de los problemas de visión pueden ser considerados como uno de etiquetado usando restricciones, debido al conocimiento *a priori* y a las observaciones.

En este caso, la solución óptima es definida por el etiquetado MAP y se calcula minimizando la energía *a posteriori*. La probabilidad *a posteriori* se define usando la regla de Bayes, a partir de un modelo *a priori* y un modelo de probabilidad. El modelo de probabilidad está relacionado con cómo son observados los datos y es un problema dependiente del dominio. El modelo *a priori* depende de cómo se expresan ciertas restricciones *a priori.*

Así pues, la segmentación se planteó como un problema de etiquetado bayesiano en el que la solución óptima se define como la configuración de etiquetas MAP. Se usó la función de energía de Gibbs para caracterizar la distribución *a priori* de las configuraciones del etiquetado.
Se caracterizó la función de energía conjunta y se definió la función de energía *a posteriori*, para finalmente aplicar el algoritmo de Recocido Simulado que minimiza la función de energía *a posteriori* de la distribución de Gibbs y obtener así la configuración óptima de etiquetas MAP.

Para el cálculo de la función de energía *a priori* se utilizó el modelo de Potts en el caso de las imágenes de fotografía aérea y el modelo de Ising para las imágenes de derrame de petróleo.
Se aplicó el algoritmo para obtener resultados usando una vecindad y dos vecindades en cada imagen y poder hacer una comparación de funcionalidad.

Con el fin de validar el buen desempeño en la segmentación de imágenes del modelo markoviano multiventana de segmentación propuesto en este trabajo, los resultados se compararon con un método estándar de segmentación, que fue el método de K-medias que se presenta en el capítulo de resultados.

1.4 Aportación de la tesis

Los resultados generales de esta tesis, se basan en los objetivos planteados para la investigación y análisis del método de segmentación propuesto, las aportaciones de la tesis son:

- Investigación sobre técnicas de procesamiento de imágenes de fotografía aérea de alta resolución e imágenes SAR.
- Estudio sobre segmentación basada en Campos Aleatorios de Markov.
- Definición de un esquema multiventana.

- Definición de un modelo de energía.
- Definición de un esquema cooperativo de segmentación, vía un algoritmo estocástico.
- Investigación y aplicación del algoritmo propuesto para la segmentación multiclases de fotografía aérea.
- Investigación y aplicación del algoritmo propuesto en imágenes SAR para la detección del derrame de petróleo del buque “Prestige”.

2

FUNDAMENTOS DE PERCEPCIÓN REMOTA

2.1 Descripción general

Los aviones modernos, los satélites y algunos otros dispositivos desarrollados en las últimas décadas han logrado expandir las percepciones del hombre más allá de los límites de los sentidos humanos, sin embargo, la percepción remota tuvo sus orígenes desde hace unos 600 millones de años, cuando una forma inferior de vida animal diferenció algunas de sus células volviéndolas fotosensibles, dicho rudimento fotosensible evolucionó durante millones de años convirtiéndose en un poderoso sensor, el ojo humano. Su imitador mecánico fue la cámara fotográfica que hizo su aparición hace algo más de un siglo y que fue mejorada durante la década de 1930 para ser aplicada a la fotografía aérea. No fue sino hasta la Primera Guerra Mundial que la fotografía aérea fue adquirida y utilizada en gran escala de una manera sistemática y ya para la Segunda Guerra Mundial, la adquisición de fotografías para inteligencia militar en viajes de reconocimiento, fue la aplicación primaria.
Por la misma época varias áreas de la investigación científica fueron también iniciadas, y éstas constituyen el fundamento de la percepción remota moderna y de sus técnicas.

La percepción remota desde plataformas aéreas, a través de films fotográficos sigue constituyendo una muy valiosa fuente de información, sin embargo a partir de 1960 debió comenzar a compartir su rango de aplicaciones con los sensores electrónicos, cada vez más numerosos y sofisticados, montados sobre plataformas suborbitales y satelitales.

La percepción remota puede definirse como la técnica de adquisición de datos de la superficie terrestre, desde sensores instalados en plataformas espaciales a determinada distancia, y su posterior análisis mediante técnicas de interpretación y procesamiento digital de imágenes.

La posibilidad de adquirir información a distancia se basa en la interacción de la radiación electromagnética que existe entre el sensor y la tierra siendo la fuente de radiación bien proveniente del sol en cuyo caso se habla de teledetección pasiva o del propio sensor en la que se habla de teledetección activa.

En la teledetección pasiva los objetos terrestres iluminados por la radiación solar, reflejan ésta luego de introducir en ella modificaciones provocadas 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. En la figura 2.1 se muestra el mecanismo antes descrito.



Figura 2.1 Ejemplo de teledetección pasiva [1].

En la teledetección activa los objetos terrestres son iluminados con una fuente de radiación instalada en el sensor del propio satélite. La iluminación va a inducir al objeto a emitir radiación o causar que refleje la radiación producida por el sensor. Los radares y sonares que se basan en ésta técnica, utilizan sensores activos que son utilizados frecuentemente cuando la radiación natural en una banda particular del espectro no es suficiente para iluminar adecuadamente al objetivo.

2.2 Principios y fundamentos

Para cualquier proceso de percepción remota es necesario que existan los siguientes aspectos:

- Una fuente de iluminación o energía, el sol en el caso de los sensores pasivos y un recurso propio a bordo del satélite en el caso de los sensores activos.
- La influencia de la atmósfera, que modifica la respuesta que recibe el sensor del satélite.
- La escena, que se refiere a la superficie de la tierra que será el objeto observado.
- El sensor remoto, que explora secuencialmente la superficie terrestre, adquiriendo a intervalos regulares la radiación que proviene de los objetos situados en ella.
- El flujo energético, que permite poner a los dos anteriores en relación. Este flujo procede del objeto por reflexión de la luz solar, por emisión propia o también podría tratarse de energía emitida por el propio sensor y reflejada por el objeto.
- La plataforma de observación, que es simplemente un dispositivo o vehículo desde el cual un sensor opera para medir la radiación emitida.
- Un sistema de procesamiento digital de la imagen obtenida, compuesto por el dispositivo para procesar cualitativa o cuantitativamente los datos proporcionados por el sensor remoto acerca de la escena.
- Aplicación a un estudio determinado.

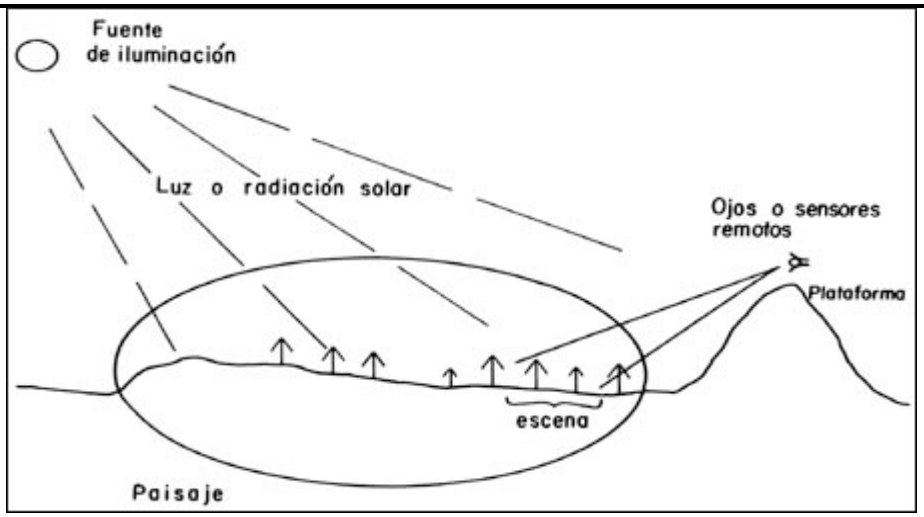


Figura 2.2 Representación de los elementos básicos de la percepción remota [3].

En el proceso de la percepción remota se genera una gran cantidad de datos, los que, analizados adecuadamente por medio de criterios muy bien definidos, proporcionan valiosa información acerca de los recursos naturales terrestres y sientan las bases para su estudio racional.

Con el desarrollo moderno de la computación electrónica digital se han generado nuevos sistemas de procesamiento digital que permiten incorporar nuevos métodos y dispositivos de captura de datos a distancia, lo que ha hecho que la percepción remota extienda su campo de acción a fenómenos muy diversos, ya no sólo en el mundo macroscópico sino también en el microscópico.

2.2.1 Plataformas de observación

Históricamente fueron la placa o el film fotográfico sobre plataformas aéreas los sensores remotos por excelencia y hasta 1946 la percepción remota se efectuaba fundamentalmente desde aviones o globos.

Existe una diversidad de plataformas orbitales de observación actualmente, pero podemos decir que el desarrollo que se inició en la década de 1960 se ha vuelto vertiginoso. Dependiendo de la distancia entre el sensor y el objetivo, se pueden identificar tres grandes tipos de sistemas de teledetección: terrestres, aéreos y espaciales.

2.2.1.1 Terrestres

En este caso la plataforma es un trípode, una torre de observación, etc., sobre la cual se instala el sensor. Se logran datos muy precisos, pero su costo es muy alto.

Este sistema es muy limitado en cuanto al campo de visión instantánea, verticalidad y tipo de sensor utilizado. Por ello, se emplea normalmente para obtener muestras de control y datos de terreno en pequeñas zonas, con el fin de calibrar o determinar patrones de interpretación.

Barcos

Barcos, boyas, submarinos y otros sumergibles han estado en uso como plataformas de percepción remota por cincuenta años, fundamentalmente en conjunto con ecosondas y sonares. La mayoría de los barcos pesqueros modernos están equipados con ecosondas que utilizan cartas de papel o tubos de rayos catódicos como unidades de despliegue. Ahora, sin embargo, el sonar con sistema de audio se está volviendo popular y es un método rápido y efectivo de transmitir información.

2.2.1.2 Aéreas

En estos casos las plataformas utilizadas pueden ser helicópteros, avionetas y aviones. Su característica más importante es su alta resolución espacial, sin embargo, tienen una resolución temporal muy variable y un alto costo por hectárea.

Cuando se utiliza una plataforma estable como los aviones, sensores analógicos con alta precisión geométrica y además se toma información de un mismo objeto desde dos puntos de vista, se pueden realizar mediciones precisas de coordenadas X, Y, Z con los datos obtenidos.

Para un mismo sensor, la resolución espacial se puede variar modificando la altura de vuelo o cambiando la distancia focal de la cámara. Esto lleva implícito un cambio en el tamaño de la foto o imagen tomada.

Globos

Globos flotantes o anclados han sido utilizados de manera limitada para la fotografía aérea de cuerpos de agua tales como bahías y lagos para seguir o trazar la circulación del agua, la sedimentación, etc.
Los globos son de uso limitado para la percepción remota de superficies vastas del océano debido a su inestabilidad y su baja velocidad.

Aviones

Los aviones han sido utilizados extensivamente como plataformas de percepción remota para el mapeo de tierras y costas, estudios oceanográficos y para la detección de cardúmenes de peces. Este es uno de los métodos más eficientes de percepción remota de la superficie de la tierra a grandes escalas. Los aviones tienen la ventaja de optimizar la adquisición de datos al proveerle al operador acceso a la instrumentación de percepción remota y al permitir un amplio rango de parámetros de adquisición. Una misión de percepción remota puede realizarse sobre un área particular en un momento específico (permitido por las condiciones del tiempo) y puede ser repetido bajo condiciones controladas. Una altitud adecuada puede ser seleccionada para optimizar la resolución y el área de cobertura. Los aviones pueden ser equipados con equipo fotográfico blanco y negro, color o color infrarrojo (CIR), barredores multiespectrales o sensores activos tales como el radar.

Las principales desventajas de la percepción remota desde un avión, son la inestabilidad de la plataforma, la cobertura geográfica limitada (debido a la relativamente baja altitud del avión), el alto costo y la dependencia de las condiciones ambientales. Este método, por lo tanto, es utilizado principalmente para misiones críticas en tiempo. Cuando la misión requiere imágenes repetitivas de la misma área, es preferible elegir el acceso a los datos a través de satélites debido a su bajo costo.

2.2.1.3 Espaciales

Las plataformas que se utilizan en estos sistemas son naves espaciales, estaciones orbitales o satélites autónomos que giran alrededor de la Tierra, estos últimos son los más utilizados. Poseen la ventaja del bajo costo por hectárea revelada de sus datos.

Normalmente, las naves espaciales y estaciones orbitales tripuladas se han utilizado para hacer pruebas de nuevos sensores o para adquirir datos con sensores foto-ópticos.

Satélites

Con el uso de satélites como plataformas de percepción remota, ha sido posible superar algunas de las dificultades enfrentadas en la percepción remota con aviones. Los satélites pueden monitorear el total de la superficie de la tierra sobre bases periódicas, cubriendo una sección suficientemente grande en cada revolución. Los satélites diseñados para percepción remota sobre bases operacionales son, en la mayoría de los casos, no tripulados.

Parámetros Orbitales

La órbita teórica de un satélite es una elipse. En el caso de satélites ambientales, sin embargo, esta elipse es generalmente considerada como un círculo teniendo a la tierra como su centro. Las órbitas de los satélites se describen a continuación:

- ***Orbita ecuatorial o geoestacionaria***

En este caso la órbita se encuentra dentro del plano del ecuador. Cuando el satélite "fluctúa" en el plano ecuatorial es llamado un satélite geoestacionario.

- ***Orbita geosincrónica***

Las órbitas geosincrónicas tienen altitudes de hasta 3600 Km. y se usan para satélites meteorológicos y de comunicaciones que necesitan estar situados sobre un punto de la superficie de la Tierra. Los satélites en dicha órbita van al paso de la rotación de la Tierra.

- ***Orbita polar o heliosincrónica***

La orbita se encuentra dentro del plano de los ejes de la tierra.

- ***Orbita polar cercano***

La orbita polar cercano se encuentra oblicua respecto a los ejes de la tierra.

- ***Orbita heliosincrónica***

Esta es una órbita mucho más baja que la órbita geosincrónica, de alrededor de 900 Km. La inclinación de la órbita relativa al ecuador es cercana a los 90°, esto significa que un punto particular de la tierra es visto regularmente a la misma hora, lo cual es útil para análisis comparativos de datos multitemporales.

Tipos de satélites

Satélites de órbita geoestacionaria o de órbita ecuatorial

Los satélites geoestacionarios se encuentran en una posición fija con respecto al eje de rotación terrestre, generalmente se sitúan a gran altitud aproximadamente a 36,000 Km. No pueden tomar imágenes de la tierra en latitudes mayores a 80° y son generalmente capaces de tomar imágenes cada 30 minutos. Poseen una velocidad angular igual a la de la rotación del planeta por lo que permanentemente "miran" una de las dos caras del mismo.

El área visible grande y la repetitividad de la adquisición de datos, han hecho este tipo de satélites muy populares para estudios meteorológicos y oceanográficos.

Satélites geosincrónicos

Los satélites en estas órbitas se mueven en la misma dirección de la rotación de la tierra y sus velocidades son ajustadas para mantener la posición de los satélites sobre un punto designado sobre la superficie de la tierra.

Las principales ventajas del satélite geosincrónico son:

- La más frecuente observación posible de la región iluminada de la tierra desde un sistema orbital.
- La posibilidad de barrer el mismo punto de la tierra repetidamente.
- La cobertura más grande de área posible desde un sistema orbital.
- El uso efectivo de telecomunicaciones.

Las principales desventajas de un satélite geosincrónico son:

- Las dificultades económicas y tecnológicas de poner el sistema en una órbita tan alta y el obtener una adecuada resolución espacial.
- La poca cobertura polar.

Satélites de órbita polar

Estos satélites vuelan a una altura de unos 700 - 800 Km., o menos y van siguiendo un recorrido que no es estrictamente polar sino que se encuentra levemente inclinado de 7.5º – 8.5º con respecto al eje de rotación de la tierra.
Son los más utilizados para el monitoreo y recuperación de recursos naturales, aplicaciones agrícolas, forestales y geológicas, en oceanografía y meteorología.

Satélites heliosincrónicos

La sincronía existente entre la velocidad de rotación de la tierra y la velocidad con la que el satélite recorre su órbita, hacen que el rango horario de toma de cada imagen sea siempre el mismo, independientemente de la latitud o de la estación del año. Esto se denomina *heliosincronía* (sincronía con el sol).

Las principales ventajas de los satélites heliosincrónicos son:

- La factibilidad económica y tecnológica de poner un sistema de órbita baja y de obtener rendimiento adecuado de los sensores llevados a bordo.
- La posibilidad de darle servicio al sistema orbital con sistemas espaciales tripulados.

Las principales desventajas de los satélites heliosincrónicos son:

- La baja repetitividad de su cobertura. El mismo sitio puede ser fotografiado frecuentemente, cada 1 a 3 días.
- La pérdida de oportunidades de obtener imágenes debido a la cobertura de nubes y su pequeña área de cobertura.

2.2.2 Sistemas de adquisición

Los instrumentos instalados a bordo de aviones o satélites capaces de obtener información terrestre desde el espacio, se denominan sensores remotos. Estos operan en una amplia región espectral que comienza en el rango visible del espectro electromagnético con longitudes de onda entre 0.4-0.7 µm al infrarrojo cercano (0.7-1.1 µm), medio (1.1-3 µm) y lejano o térmico (3-15 µm) (0.7-15 µm) incluyendo el rango de las microondas (0.1 –100 cm).

Un sensor es un dispositivo que detecta radiación electromagnética emitida o reflejada y la convierte en un valor físico que puede ser grabado y procesado. Los sistemas de sensores pueden ser divididos en dos categorías principales:

- Sistemas globales de adquisición: cámaras fotográficas o de televisión que graban una escena completa instantáneamente.

- Sistemas de adquisición secuencial: radiómetros, radares, lidares y sonares, que adquieren información por línea de la escena.
  Esta segunda categoría es generalmente dividida en:

  a) Sensores pasivos, que graban la radiación electromagnética reflejada o emitida de fuentes naturales.

b) Sensores activos, que iluminan un objeto con su propia fuente de radiación y graban el "eco".

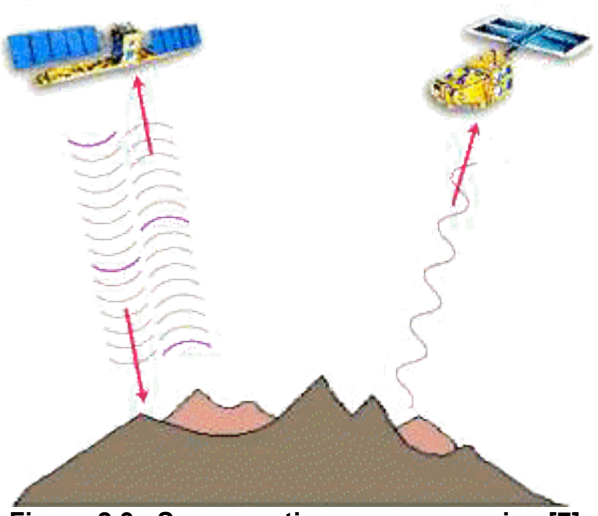


Figura 2.3 Sensor activo y sensor pasivo [7].

2.2.2.1 Cámaras aéreas

Las cámaras han estado en uso por mucho tiempo y una gran cantidad de conocimiento se ha acumulado respecto a técnicas de grabación de imágenes, interpretación de imágenes y extracción de datos. Las cámaras son menos caras e incómodas que otros sensores y los materiales fotográficos correspondientes están disponibles por todo el mundo. Adicionalmente, la fotografía todavía produce una resolución superior en comparación con sensores electrónicos.

Una de las principales desventajas en el uso de cámaras aéreas es la restricción impuesta por condiciones adversas del tiempo. También, la fotografía es únicamente operativa dentro de una estrecha banda de la radiación electromagnética (0.38 a 1.3 μm).

La calidad de una fotografía dependerá de varios factores interrelacionados: longitud focal, ángulo de observación, escala, contraste, resolución y velocidad de la película.

Longitud focal (f)

La distancia entre el centro del lente y el foco es llamada longitud focal y determina el tamaño de la cámara y la escala de la fotografía.

Angulo de observación (d)

El ángulo de observación de un lente es el ángulo entre los rayos que van a las esquinas opuestas de la película. El ángulo de observación también es referido como ángulo de vista, ángulo de campo o poder de cobertura.

Escala (s)

La escala (s) es igual a la longitud focal (f) dividida por la altura de la cámara que está sobre el sitio o el campo. Esta última es determinada al sustraer la altura del terreno sobre el nivel del mar (h) de la altura del avión (cámara) sobre el nivel del mar (H). Por lo tanto, la escala (s) es estimada de la forma siguiente:

$$s = \frac{f}{H - h}$$

Contraste

El contraste es una medida de la relación entre los niveles de brillantez más bajos y más altos de la fotografía. El contraste de una imagen fotográfica puede ser referido cualitativamente como "alto" o "bajo", o en términos de su cociente de contraste.

Resolución

La calidad de una fotografía aérea es en parte descrita en términos de su resolución o de su poder de resolución. Este puede ser definido como la habilidad de un sistema óptico o fotográfico para reproducir detalles finos, expresados en términos de un mayor número de líneas o ciclos por milímetro, los cuales pueden ser separados visualmente en una imagen o grabados sobre material fotográfico.

Velocidad de la película

La velocidad de la película está directamente relacionada a la sensibilidad de la película respecto a la luz. Puede ser definida como inversamente proporcional a la exposición requerida para producir alguna respuesta deseada.

2.2.2.2 Radar

Los sensores remotos que actúan en la zona espectral de las microondas se basan en el principio del radar, y reciben el nombre de sensores activos debido a que el sensor provee su propia fuente de energía que emite hacia la superficie en estudio y recibe la señal de retorno, a diferencia de los sensores pasivos que reciben la señal de una fuente de luz o energía externa reflejada por la superficie de los cuerpos.

El sistema radar transmite pulsos de energía microondas que son capaces de penetrar regiones con vegetación, regiones muy áridas o con nubosidades, luego recibe y ordena las señales reflejadas sobre una imagen que puede ser evaluada. Estas características lo hacen diferente a la mayoría del resto de los sistemas de sensores remotos, permite operar de noche y nos permite deducir información sobre la naturaleza de los objetos que no hubiese sido posible obtener utilizando otros métodos convencionales.

Un sistema radar consiste en:

- Un transmisor, que genera un pulso de radio y luz de gran potencia con longitudes de onda entre 1 y 100 cm.
- El sensor activo, que envía pulsos a la antena y retorna el eco al receptor.
- Una antena, la cuál envía el pulso transmitido a la zona de estudio y recoge lo secos devueltos.
- Un receptor el cual convierte el eco devuelto a código digital numérico.
- Un grabador de datos, el cuál almacena la imagen dato para ser procesada y visualizada.

2.2.2.3 SLAR (Radar Aéreo de Vista Lateral)

Los primeros sensores de radar usaban una antena que se fijaba longitudinalmente en el avión, ejecutando un barrido lateral; a estos sistemas se les denomina SLAR, radar de apertura real de visión lateral.

Para una dada longitud de onda, el ancho del haz puede ser controlado por dos medios diferentes:

- Por la longitud física de la antena.
- Sintetizando la longitud de la antena.

A los sistemas que corresponden al primer caso se los denomina sistemas de apertura real (SLAR 2) siendo de diseño simple y de fácil obtención de los datos; pero, debido a problemas de resolución, su operación se ve restringida a distancias cortas, a baja altitud y al uso de longitudes de onda corta; estas

restricciones limitan el área de cobertura y generan mayor atenuación y dispersión atmosférica. Estas eficiencias han sido superadas en los radares de alta resolución transportados en satélites o aviones con el uso de otro método: los sistemas de radar de apertura sintético.

2.2.2.4 SAR (Radar de Apertura Sintético)

La técnica radar, conocida como Radar de Apertura Sintético (SAR), es un tipo de sistema de radar modificado para producir imágenes en vez de gráficos de rangos y direcciones. Al igual que las técnicas radar más comunes, las imágenes radar también transmiten pulsos de energía microondas y, es por ello considerado un sistema de sensor remoto activo.

Hay dos características principales que se destacan en estos sistemas:

- Las microondas están en capacidad de penetrar la atmósfera bajo variadas condiciones meteorológicas (nubes, humo, lluvia, niebla, etc.); esta capacidad sumada al hecho que se puede obtener información de día y de noche lo convierte en un sistema todo tiempo.

- Para la interpretación de las imágenes de radar, se debe tener en cuenta que las propiedades de reflexión o de emisión en el rango espectral de las microondas no tienen el mismo comportamiento espectral sobre los objetos terrestres que en las regiones espectrales del visible e infrarrojo.

Estas características lo hacen diferente a la mayoría del resto de los sistemas de sensores remotos y permite operar de noche o bajo condiciones de nubosidad densa.

2.2.2.5 Barredores electrónicos térmicos en infrarrojo

Los barredores aéreos electro-ópticos, en general, pueden cubrir el espectro electromagnético usando sensores semiconductores electrónicos, desde el UV hasta el rango infrarrojo térmico del espectro, pasando por el visible y el infrarrojo cercano.

La distorsión lateral de la línea de vuelo es corregida razonablemente en el sistema de barrido. A lo largo de la línea de vuelo, sin embargo, los rápidos cambios de altitud sobre el terreno producen muchas distorsiones durante la formación de una escena proveniente de muchas líneas de barrido. Estas distorsiones dan lugar a imágenes que son difíciles de interpretar y cuya ubicación también es difícil de identificar, especialmente en montañas o terrenos de bosques. No obstante estas deficiencias, el barrido electrónico desde una aeronave continúa siendo un método muy valioso para obtener imágenes térmicas en infrarrojo, con una razonable resolución espacial y térmica.

Las imágenes producidas por un barredor electrónico presentan distorsiones inherentes en la escena final de la imagen reconstituida, debido a su técnica de registrar un barrido vertical sobre la cinta o película.

2.2.2.6 Ecosondas y sonares

Los ecosondas y los sonares están basados en el principio de dirigir las ondas acústicas hacia un objetivo y recibir el eco reflejado. La ecosonda transmite un rayo vertical y fijo de sonido mientras que el rayo del sonar puede ser orientado. Los principales componentes de una ecosonda y un sonar son: el transmisor, el transductor, el recibidor y la unidad de despliegue.

La función del transmisor es producir energía en forma de pulsos de oscilaciones eléctricas. En el transductor, esta energía eléctrica es convertida a energía de sonido en el agua y, contrariamente, las

ondas de sonido de los ecos que regresan son convertidas de nuevo a energía eléctrica. El recibidor amplifica las oscilaciones eléctricas débiles producidas en el transductor por el eco, de tal forma que pueden ser grabadas en papel o transmitidas como una señal que puede ser escuchada.

2.2.2.7 Lidares (Radares de Láser)

Un lidar es un sensor activo que emite y recibe luz en las longitudes de onda visible e infrarroja cercana. El lidar utiliza rayos láser para generar pulsos de luz cortos y de alto poder. En la medida que el pulso pasa a través de la atmósfera, la luz difusa que regresa es detectada por un sistema óptico y es electrónicamente analizada para proporcionar una medición de la intensidad de la luz reflejada por los elementos que constituyen el objetivo, en función de la distancia desde el sensor.

2.2.3 Tipos de datos obtenidos en la Percepción Remota

Los tipos de datos que se pueden obtener gracias a la percepción remota son adquiridos por sensores remotos a bordo de plataformas terrestres, aéreas o espaciales, que son transmitidos a tierra por telemetría en forma de señales electromagnéticas, fotografías aéreas y satelitales, imágenes multiespectrales e imágenes SAR, cintas magnéticas o por cualquier otro medio.

A continuación se describen las características principales de los tipos de datos que se obtienen en la percepción remota.

2.2.3.1 Fotografía aérea

Una fotografía aérea es una imagen de un terreno captada desde una nave aérea equipada con cámaras fotográficas especiales para este fin. La fotografía aérea “congela” en el tiempo las características del terreno fotografiado, proporcionando evidencias de las condiciones particulares de esa área, por esto, las fotografías aéreas son particularmente útiles en estudios que buscan los cambios sufridos por una porción de tierra y tienen aplicaciones en muchas áreas del estudio de terrenos.

El principio de las fotografías aéreas es la percepción fotográfica, esto significa que la energía reflejada por la superficie terrestre pasa a través de la lente de la cámara y altera con una intensidad variable, la película sensible al espectro electromagnético instalada en la cámara. Por ser impresas en papel fotográfico, la mayoría de las aerofotos tienen inicialmente un formato analógico, pero su conversión digital, es un proceso que puede hacerse utilizando software especializado de rastreo de imágenes o usando un scanner.

Las fotografías aéreas presentan un alto grado de distorsión radial, es decir, la topografía es distorsionada y hasta que no se hagan las correcciones para esa distorsión, las medidas que se tomen de la fotografía, no serán confiables.

Las principales fuentes de error de las fotografías aéreas son:

- Distorsión radial.
- Inclinaciones de la cámara (o del avión).

Las fotografías aéreas se toman en forma consecutiva a lo largo de líneas paralelas de vuelo previamente definidas, con superposición de vuelos y fotografías, para obtener posteriormente una visión estereoscópica o tridimensional del área fotografiada.

De todos los sensores, la fotografía aérea ofrece la interpretación más exacta de lo que ve el ojo humano, en términos de respuesta a la longitud de onda, resolución, perspectiva, visión estereoscópica y valores tonales y de color.

Características de las fotografías aéreas

Tono ó color. Se refiere al brillo relativo o color de los elementos en una fotografía, este es el más básico de los elementos a interpretar, porque sin diferencias de tonalidad, ninguno de los otros elementos se puede reconocer.

Tamaño. El tamaño de un objeto debe ser considerado en el contexto de su escala en la fotografía. Las escalas más útiles para fotografías aéreas van desde 1:5,000 hasta 1:120,000. La necesidad de información de tipo reconocimiento, sobre extensas áreas, limita el uso de las fotografías a escalas de 1:40,000 o menos.

Forma. Se refiere al contorno general del objeto. Figuras geométricas regulares usualmente indican presencia y uso humano. Algunos objetos pueden ser identificados por las formas básicas de su estructura, por ejemplo, un estadio de fútbol, grandes vías o el Pentágono.

Textura. La impresión de lisura o rugosidad de los elementos en una imagen es causada por la frecuencia de los cambios de tono en una fotografía. Esto ocurre cuando hay grupos de elementos muy pequeños para ser identificados individualmente. Pastos, cemento, y agua, aparecen como lisos en las fotografías; las copas de los árboles, en los bosques pueden aparecer rugosas.

Patrón de llenado. Los patrones de comportamiento espacial, formados por los objetos en las fotos, pueden ser diagnosticados. Por ejemplo, si se considera la diferencia entre un área de árboles no cultivados y el espacio formado por las filas de un cultivo de pinos.

Sombra. Las sombras le ayudan a los intérpretes a determinar la altura de los objetos en las fotografías aéreas, pero también obscurecen los objetos que se encuentren en ellas.

Lugar. Se refiere a la ubicación geográfica o topográfica. Esta característica de las fotografías es especialmente importante en la identificación de tipos de vegetación y formaciones del terreno.

Asociación. Algunos objetos siempre se encuentran en asociación con otros objetos. El hecho de que un objeto se observe, indica que su o sus objetos asociados deben estar presentes. Por ejemplo, una planta nuclear, nunca estará en inmediaciones de un área residencial.

CLASIFICACIÓN DE LAS FOTOGRAFÍAS AÉREAS

- **Según la inclinación del eje óptico:**

Verticales. Son aquellas en las que el eje óptico de la cámara es normal o perpendicular a un plano horizontal de referencia situado a la altura del terreno fotografiado.

Oblicuas. El eje de la cámara no es perpendicular al plano horizontal en el momento de la toma. Estas fotografías también se denominan panorámicas; las deformaciones de los objetos son grandes debido al efecto de perspectiva. El área fotografiada es de forma trapezoidal.

- **Según la emulsión de las películas a diferentes longitudes de onda:**

Las fotografías aéreas pueden ser obtenidas con películas blanco y negro, las menos costosas, o a color convencional o color IR. El tipo de película que deberá usarse depende de su aplicabilidad al terreno particular que se está estudiando, y del costo de la película. La velocidad de la película también es factor

importante, pues las películas a color de baja velocidad no pueden ser utilizadas en terrenos demasiados oscuros tales como áreas con densa vegetación ubicua o rocas predominantemente oscuras.

Películas en blanco y negro

Los dos tipos generales de películas en blanco y negro utilizados con mayor frecuencia, son las películas pancromáticas y las IR sensibles.

Películas pancromáticas. Son materiales negativos que presentan aproximadamente el mismo rango de sensibilidad a la luz que el ojo humano, son consideradas como la norma para la fotografía aérea. Es el medio más económico para la cartografía aérea y la foto-interpretación, pero puede no ser la alternativa lógica para una determinada área de estudio.

Película en blanco y negro IR sensible. Es una mejor opción para penetrar la neblina o una exuberante vegetación, en áreas tropicales húmedas. Proporciona mucho mejor contraste para aguas superficiales, humedad y vegetación, que la película normal y como resultado, puede ser una herramienta efectiva en la planificación regional y en las evaluaciones de peligros naturales en áreas tropicales húmedas. Existe, sin embargo, una disminución de detalle en áreas en sombra debido al filtrado de la luz dispersa más fría (extremo azul).

Películas a color

La película a color se usa de varias formas para la evaluación de los peligros naturales, es una película negativa de la cual se producen fotos a color y transparencias positivas, incluyendo diapositivas a color. Hasta cierto punto, las películas negativas pueden ser copiadas en papel para resaltar ciertos colores y facilitar su manejo. Sin embargo, éstas no poseen la nitidez y el rango dinámico de color de las transparencias positivas, las cuales son significativamente mejores para propósitos de interpretación.

Existen dos tipos espectrales principales de película a color: la película a color natural o convencional, que cubre el espectro visible, y la película a color IR (desde el verde hasta el IR cercano).

Película a color natural o convencional. Se encuentra disponible como película en negativo y transparencias positivas.

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 (figura 2.4) podemos ver el tipo de detalles que se ven al volar sobre la superficie terrestre a 2500 m de altura.



Figura 2.4 Campos cercanos al Río Negro [9].

Película a color IR (Radiación Infrarroja). Está disponible sólo como una transparencia positiva. Su respuesta es superior a la de las películas a color natural por varias razones.

- El filtro amarillo requerido para su uso apropiado elimina la luz azul que se dispersa por la atmósfera. Al eliminar gran parte de tal dispersión, mejora enormemente el contraste.

- Las diferencias de reflectancia entre los tipos de vegetación, suelos y rocas son comúnmente mayores en el componente fotográfico IR de esta película.

- La absorción del infrarrojo por el agua y gran parte de las longitudes de onda roja, permiten una definición más clara de depósitos de agua y de áreas con contenido de humedad.

- La disminución de luz dispersa en áreas en sombra realza detalles de relieve, mejorando así la interpretación de la geomorfología. En vista de estos atributos, se prefiere la película a color IR si es que se desea fotografía aérea a color en climas tropicales húmedos.

Para otros tipos de problemas es necesario recurrir a películas que "ven colores" en donde el ojo humano no ve nada, entonces nos referimos a la película sensible a la radiación infrarroja. El figura 2.5 corresponde a la imagen anterior pero usando un film sensible al infrarrojo cercano. Esta foto es en falso color ya que no podemos hablar de color en el infrarrojo. Lo que se hizo fue asignar en la película el color rojo a la radiación infrarroja cercana reflejada por la superficie en estudio.

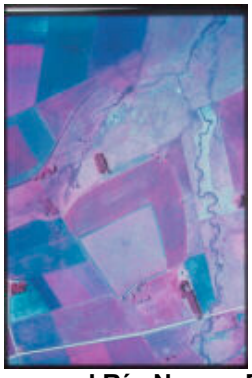


Figura 2.5 Campos cercanos al Río Negro. Falso Color Infrarrojo [9].

Otra característica importante es que esta película 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 grisácea. Si comparamos ambas fotos vemos la eliminación de este efecto en la fotografía infrarroja. En la imagen 2.6 es posible ver y analizar detalles como las heterogeneidades en las áreas cultivadas que se presentan en la fotografía infrarroja, en comparación con su correspondiente versión en color real.

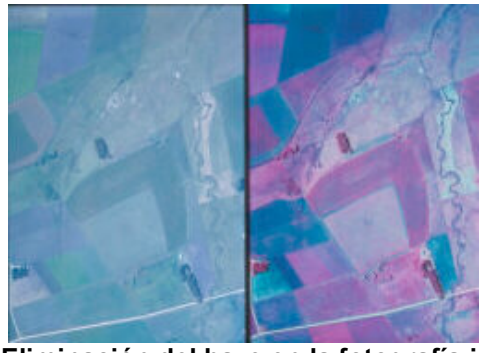


Figura 2.6 Eliminación del haze en la fotografía infrarroja [9].

Fotografía Térmica

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 el ejemplo anterior. En esta película queda registrado un rango de radiación infrarroja que da información acerca de la naturaleza química de los objetos fotografiados. Algunos de los trabajos posibles a realizar con esta técnica son:

- Agricultura de precisión
- Clasificación de cultivos.
- Detección y seguimiento de enfermedades.
- Stress fisiológicos de los cultivos.
- Cálculo de áreas forestadas y análisis de estado sanitario.
- Índice de defoliación de cultivos por plagas.

Ventajas de la fotografía aérea:

- 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.

- Posee 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.

2.2.3.2 Imágenes de radar

Los satélites de radar registran datos en cualquier momento, tanto en el día como en la noche y en cualquier condición atmosférica, debido a que emiten su propia fuente de energía y no tienen que requerir de la energía solar.
Las imágenes de radar, así como la fotografía, presentan variaciones de tono, textura, forma y patrones que corresponden a diferencias en rasgos y estructuras en la superficie. Las variaciones de tono que presentan las imágenes de radar, son el resultado de la interacción de la señal del radar con el terreno y la vegetación.

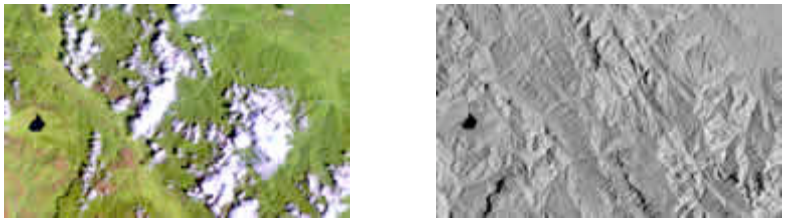


Figura 2.7 Ventaja de la imagen de radar frente a la óptica en zonas con cobertura nubosa [10].

2.2.3.3 Imágenes multiespectrales

Una imagen multiespectral se compone de varias imágenes de la misma zona que se han grabado simultáneamente. Cada imagen muestra el reflejo de la luz del sol en la superficie en diferentes longitudes de onda, denominadas canales.

Las imágenes multiespectrales son cada vez más utilizadas no sólo en la teledetección, sino también en los demás ámbitos del proceso de imagen, porque además de la información básica de luminancia, contienen información del comportamiento de la escena en función del espectro electromagnético. Esto permite la segmentación en función del color y por tanto permite detectar y aislar elementos que pasarían desapercibidos en una imagen pancromática, como cursos de agua en una imagen de satélite o defectos de una pieza inspeccionada por un sistema de visión artificial.

Un ejemplo de imagen multiespectral es la imagen en color RGB, formada por tres componentes con bandas centradas en las frecuencias de los colores rojo, verde y azul respectivamente. La figura 2.8 muestra una imagen multiespectral que es una observación realizada simultáneamente en cuatro bandas espectrales por SPOT-4.

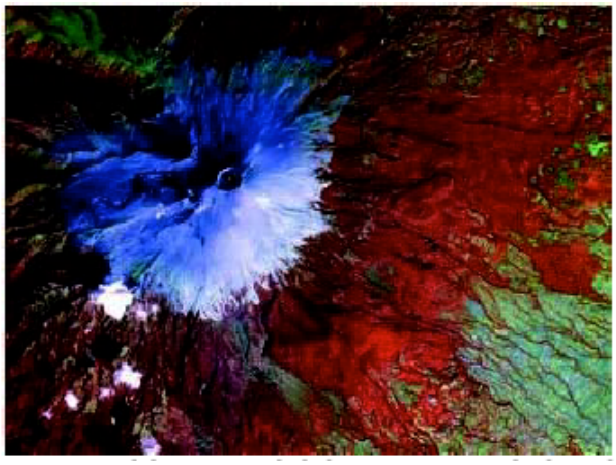


Figura 2.8 Imagen multiespectral del Popocatepetl obtenida por SPOT-4, 20 de diciembre del 2000 [12].

Una condición necesaria para trabajar con una imagen multiespectral es que sus componentes estén perfectamente alineadas. En caso contrario, al procesar la imagen aparecerán características inexistentes que falsearán el resultado. Normalmente, el error de alineación será de inferior magnitud que el tamaño de los elementos de la imagen, con lo que ésta se podrá procesar sin problemas. En algunos casos podría ser conveniente la aplicación de un filtro paso-bajas.

2.2.3.4 Satélites con sensores activos

La percepción remota desde satélites ha adquirido importancia creciente desde el exitoso lanzamiento del satélite Landsat 1 en 1972. A partir de esa fecha se han desarrollado y usado con éxito muchos satélites con capacidad de percepción remota.
El barredor electrónico multiespectral Landsat (MSS), proporcionó las primeras imágenes prácticas desde el espacio en cuatro bandas del espectro.

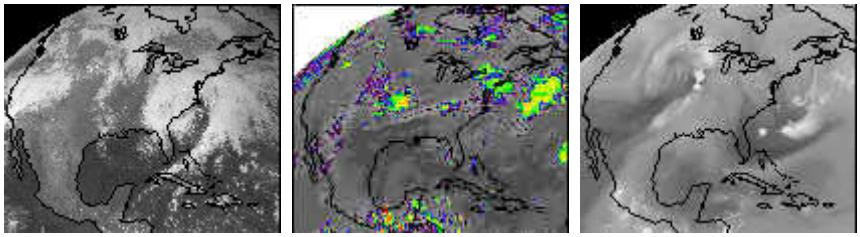
La amplia cobertura aérea de los sensores Landsat y de los otros que le han seguido, conjuntamente con la capacidad de procesar digitalmente los datos de sensores, ha hecho que los datos derivados del satélite sean útiles para planificadores regionales y para otros interesados en evaluaciones de peligros naturales. Las vistas sinópticas de los terrenos propuestos para el desarrollo, pueden ser convertidas en imágenes en un instante.

Las imágenes de satélite pueden proporcionar continuidad en las condiciones de visión de extensas áreas, que no son posibles en los mosaicos de fotografías aéreas.

Los sensores transportados por satélite son mecanismos potenciales para la evaluación de los peligros naturales. Cada sensor tiene sus ventajas y limitaciones en la cobertura de áreas de interés y en su capacidad de resolución para definir ciertos tipos de peligros.

Algunos sensores son experimentales, proporcionan cobertura de aérea limitada y carecen de continuidad temporal. Sin embargo, cuando se dispone de cobertura para un área de estudio, los datos de esos sensores deben ser utilizados en conjunto con datos existentes derivados del Landsat o SPOT.

Idealmente, sería deseable utilizar un método de "múltiples etapas" en evaluaciones de recursos y peligros naturales. Esto implicaría el uso de fotografías aéreas y verificaciones en tierra, para lograr un conocimiento más detallado en lugares representativos o de demostración. Este conocimiento puede ser extrapolado sobre áreas más extensas utilizando datos derivados de Landsat u otros tipos de satélite.



1 km Visible Infrarrojo Vapor de Agua

Figura 2.9 Imágenes del satélite meteorológico GOES-8 Este para Norteamérica [13].

2.2.4 Propiedades de los sistemas de adquisición

La utilización efectiva de los datos que obtenemos a través de la percepción remota depende de la habilidad para interpretar, correcta y consistentemente, las fotografías, imágenes, gráficos o estadísticas que registramos.

Para obtener el mejor uso de los datos se requiere normalmente de personal con experiencia que deberá tener conocimientos básicos de las técnicas de percepción remota y capacidad tanto para evaluar la validez de una interpretación como para utilizar la información que se derive de ello.

Los factores que determinan la utilidad de los datos de percepción remota en las evaluaciones de peligros naturales son escala, resolución y contraste tonal o de color. Otros factores incluyen área de cobertura, frecuencia, costo y disponibilidad de datos.

Escala

La escala a la que se puede ampliar una fotografía o una imagen, determina en qué fase del estudio de planificación para el desarrollo debe de ser utilizada esta información. Las presentaciones a escala de 1:500,000 o menores, son útiles cuando no se necesita mucho detalle. Las imágenes a escalas de 1:250,000 o mayores se requieren donde si es importante el detalle.

Resolución

Es la capacidad de distinguir objetos que están muy cerca unos de otros en una imagen o fotografía y es determinada por el tamaño y número de elementos básicos de la imagen, o sea, los pixels que conforman la imagen. Cuanto más pequeño es el tamaño del pixel, mayor será la resolución. En la fotografía, la resolución está limitada principalmente por el tamaño del grano de la película.

En ambos casos, imágenes y fotografías, la posibilidad de poder distinguir entre rasgos adyacentes, es muy importante en el proceso de identificación. La ampliación de fotografías o imágenes no puede mejorar la resolución sino sólo el espacio de trabajo para la interpretación.

Resolución espectral

Es la cantidad de bandas del espectro en las que el sensor es capaz de obtener información. Esto se logra con sensores independientes para cada banda o con filtros que dejan pasar solo la información de bandas predeterminadas.
Los satélites pueden clasificarse como monoespectrales para el caso de los radares que presentan sólo una banda, multiespectrales, de dos a varias bandas e hiperespectrales capaces obtener información simultánea de cientos de bandas.

Resolución espacial

Es una medida del objeto más pequeño que puede ser resuelto por el sensor, o el área en la superficie que recoge cada pixel y depende de la altura a la que se encuentra el satélite, su velocidad y el número de detectores que tiene el sensor.

Resolución radiométrica

Es la sensibilidad del sensor para cuantificar la información que recibe. También se le identifica con la cantidad de tonos de grises que el sensor es capaz de captar. La mayoría de los sensores tienen una resolución radiométrica de 256 niveles de grises u 8 bits (2^8 = 256). Es decir que la respuesta será cuantificada entre 0 (negro: ausencia de respuesta o de energía recibida) a 255 (blanco: máxima respuesta o energía recibida).

Resolución temporal

Se refiere a cada cuanto tiempo recoge el sensor una imagen de un área particular. Esta en función de las características orbitales de la plataforma (altura, velocidad e inclinación) y del diseño del sensor (ángulo de observación y ángulo de cobertura).

Contraste de imágenes

El contraste entre rasgos, en una imagen o fotografía, es una función de la habilidad del sensor para captar el contenido tonal o espectral de la escena. Las diferentes bandas espectrales de los sistemas de percepción remota pueden exhibir contrastes fuertes o débiles según la región del espectro electromagnético cubierta y la superficie observada.

Cuando una imagen no proporciona el detalle, la resolución o contraste requerido, es posible que se requiera un segundo sensor de tipo completamente diferente al primero, o de una combinación de sensores.

Marco del tiempo

Las ocurrencias temporales de eventos naturales también afectarán la utilidad de los datos de percepción remota. Los eventos que son estacionales, predecibles o altamente correlacionados con otros eventos, probablemente se beneficiarán más de las imágenes que aquellos otros que ocurren aleatoriamente, tales como los terremotos o tsunamis.

Imágenes y mapas de percepción remota

Las imágenes de percepción remota deben ser consideradas como datos disponibles para asistir al planificador en la evaluación de información de recursos naturales y de peligros naturales, a todo lo largo del desarrollo de un estudio de planificación. El significado y el valor de los datos de percepción remota es realizado mediante interpretación experta, junto con la cartografía convencional y los datos obtenidos en superficie. Los mapas son especialmente útiles para interpretar los datos de percepción remota.

Entre los mapas, los topográficos son la principal ayuda para esclarecer muchas de las ambigüedades que se presentan en las imágenes de percepción remota para el reconocimiento del terreno. Los mapas geológicos concitan la atención hacia formaciones que conducen a ciertos tipos de peligros. Este

conocimiento puede ayudar a la localización y búsqueda sistemática de estos peligros. Los mapas de suelos pueden servir para un propósito similar aunque en menor grado. Finalmente, los mapas de vegetación y de uso de tierras pueden proporcionar información sobre el contenido de humedad, formaciones geológicas subyacentes y tipo de suelos presentes.

Formatos de productos

Existen diferentes maneras de presentar los datos de sensores remotos. Los datos fotográficos generalmente son usados en formato de película positiva o como impresión fotográfica. Los datos en película e impresiones fotográficas pueden ser analizados y convertidos a datos digitales para su registro en cinta compatible con la computadora CCT, (Computer Compatible Tape). La principal ventaja de los datos digitales es que pueden ser cuantificados y manipulados usando técnicas de procesamiento de imágenes. Las imágenes de satélite u otras grabadas en CCT pueden ser presentadas en un formato de película positiva o fotografiada directamente de la pantalla del monitor.

Los datos provenientes de los sensores pueden ser almacenados en formatos analógicos o digitales.

Formato analógico

En un sistema analógico las variaciones en la intensidad de los insumos originales de las señales, son presentadas por variaciones continuas en algún otro medio tal como el voltaje o la densidad de la película. Para la interpretación humana, sin embargo, un desplegado analógico tal como una fotografía o una imagen de televisión es más útil.

Formato digital

Los datos grabados digitalmente se dividen en rangos discretos a diferencia de los datos analógicos y pueden ser procesados fácilmente por computadoras y pueden copiarse repetidamente sin afectarse negativamente los originales o datos copiados. Con equipo apropiado es posible convertir datos de un formato al otro.

Temporalidad de la información

El término tiempo real es utilizado para describir datos que están disponibles para ser desplegados o ser analizados al mismo tiempo y a la misma tasa a la que son adquiridos. Comúnmente, existe un retraso entre el tiempo en el que el sensor “observa” la superficie y el tiempo en el que los datos están disponibles para su uso.

Si ese retraso es pequeño, por ejemplo de algunas horas, los datos son llamados *datos cercanos a tiempo real*. Cuando los datos han sido colectados con considerable anticipación a su análisis, estos son referidos como *datos históricos o datos de archivo*.

Fotogrametría

La fotogrametría es el arte, la ciencia y la tecnología de obtener información fidedigna y precisa de objetos físicos y su entorno por medio de procesos de registro, medida e interpretación de imágenes y modelos fotográficos. Normalmente se utilizan fotografías tomadas por una cámara especial situada en un avión o en un satélite.

Las distorsiones de las fotografías se corrigen utilizando un aparato denominado restituidor fotogramétrico. Este proyector crea una imagen tridimensional al combinar fotografías superpuestas del mismo terreno tomadas desde ángulos diferentes. Los límites, las carreteras y otros elementos se trazan a partir de esta imagen para obtener una base sobre la cual se realizará el mapa. La palabra fotogrametría se deriva de las palabras griegas photos que significa “luz”, gramma significa "dibujo" y metron que significa "medida" es decir, medición gráfica por medio de luces.

Ventajas de la fotogrametría

- Presentaciones completas.
- Registro instantáneo.
- Materiales económicos y de fácil manipulación.
- Posibilidad de tratar objetos en movimiento.
- No se perturba el objeto.
- Grandes rendimientos.

Aplicaciones

Asociadas a las dos grandes ramas de la fotogrametría (la terrestre y la aérea) se encuentran una gran diversidad de aplicaciones:

- Cartografía a diferentes escalas.
- Ortofotografía.
- Aplicaciones arquitectónicas.
- Documentación de obras públicas y monumentos.
- Arqueología.
- Control de deformaciones.
- Mediciones industriales.
- Mediciones policiales.

2.2.5 El espectro electromagnético

La radiación electromagnética es una combinación de campos eléctricos y magnéticos oscilantes y perpendiculares entre sí que se propagan a través del espacio en forma de ondas electromagnéticas. A diferencia de otros tipos de onda, como el sonido, que necesitan un medio material para propagarse, la radiación electromagnética se puede propagar en el vacío.

La energía electromagnética se transmite de un lugar a otro siguiendo un modelo armónico y continuo, a la velocidad de la luz.

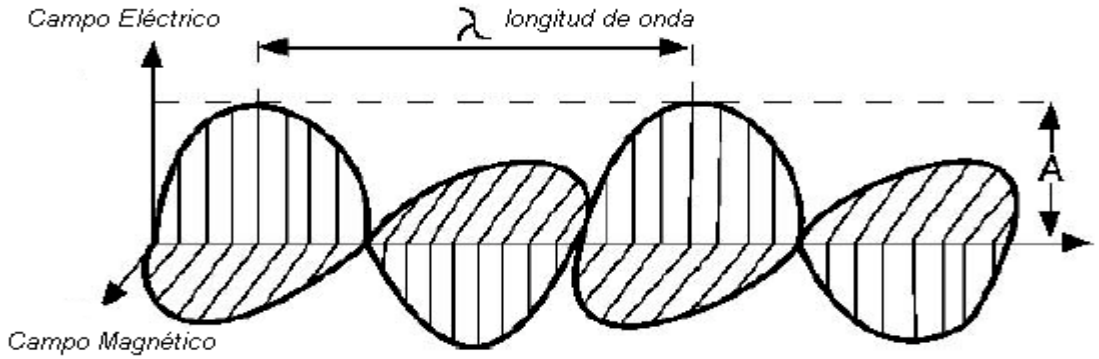


Figura 2.10 Onda electromagnética [8].

Independientemente de su frecuencia y longitud de onda, todas las ondas electromagnéticas se desplazan en el vacío a una velocidad c = 299.792 km/s. Las longitudes de onda van desde billonésimas de metro hasta muchos kilómetros. La longitud de onda (λ) y la frecuencia (f) de las ondas electromagnéticas, relacionadas mediante la expresión $c = \lambda \cdot f$, son importantes para determinar su energía, su visibilidad, su poder de penetración y otras características.

Podemos definir totalmente cualquier tipo de energía dando su longitud de onda o frecuencia. El espectro electromagnético es la sucesión continua de esos valores de frecuencia, aunque conceptualmente se divide en bandas, en las que la radiación electromagnética manifiesta un comportamiento similar.

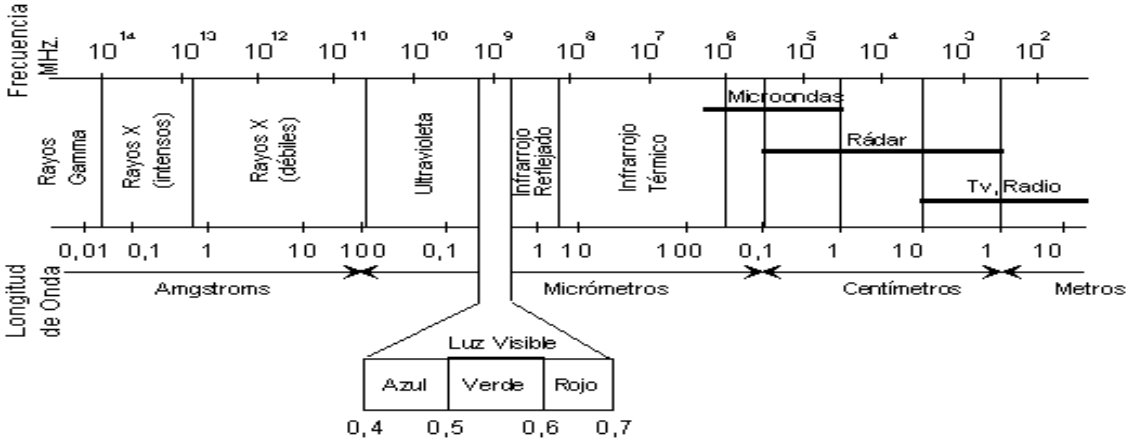


Figura 2.11 Espectro electromagnético [8].

Principales bandas del espectro electromagnético

Para la teledetección solo algunas de estas bandas son utilizadas para obtener información de la superficie de la tierra o de la atmósfera dada la tecnología actual. Las principales bandas del espectro electromagnético son:

Radiación gamma

Es un tipo de radiación electromagnética producida generalmente por elementos radiactivos con longitudes de onda inferiores a 10^{-11} m. Dada su alta energía pueden causar grave daño al núcleo de las células, por lo que son usados para esterilizar equipos médicos y alimentos.
Los rayos gamma producidos en el espacio no llegan a la superficie de la Tierra, pues son absorbidos en la alta atmósfera. Para observar el universo en estas frecuencias, es necesario utilizar globos de gran altitud u observatorios espaciales.

Rayos X

Los rayos X son radiaciones electromagnéticas cuya longitud de onda va desde unos 10 nm hasta 0,001 nm. Cuanto menor es la longitud de onda de los rayos X, mayores son su energía y poder de penetración.
Es un tipo de radiación invisible, capaz de atravesar cuerpos opacos, de ionizar átomos arrancando electrones de su corteza y de impresionar las películas fotográficas.

Radiación Ultravioleta (UV)

La radiación ultravioleta, cuyas longitudes de onda van aproximadamente desde los 400 nm hasta los 15 nm, es emitida por el Sol. Las 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.

Espectro visible

Es la única radiación electromagnética perceptible por el ojo humano. Coincide con la longitud de onda donde es máxima la radiación solar. Los colores del espectro se ordenan como en el arco iris, formando el llamado espectro visible. Podemos localizar los distintos colores en las longitudes:
Azul: 0.4 - 0.5 mm Verde: 0.5 - 0.6 mm Rojo: 0.6 - 0.7 mm

Infrarrojo

La radiación infrarroja es fácilmente absorbida por la mayoría de las substancias.

Infrarrojo próximo (0.7 - 1.3 mm)

Banda importante para diferenciar las masas vegetales y concentraciones de humedad.

Infrarrojo medio (1.3 - 8 mm)

En esta región se entremezclan los procesos de reflexión de luz solar y de emisión de la superficie terrestre, por lo que hay muchas dificultades.

Infrarrojo lejano o térmico (8 - 14 mm)

Es la región del espectro en la que emiten energía todos los cuerpos de la superficie terrestre.

Microondas

El periodo de una señal de microondas esta en el rango de 3 ns a 3 ps, y la correspondiente longitud de onda en el rango de 1 m a 1 mm. Tiene la propiedad de ser transparente a la cubierta nubosa, pero también de llevar asociada muy poca energía. Por eso, si se quiere usar esta banda tendrá que ser haciendo teledetección activa.

Radio

Tienen una longitud de onda mayor a 100 cm. 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. Estas ondas pueden propagarse tanto a través del aire como en el espacio vacío y no requieren un medio de transporte.

2.2.5.1 Radiación electromagnética

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

La radiación solar, emitida hacia la Tierra, llega y cubre una mitad del planeta constantemente, esta radiación esta distribuida continuamente en una banda que va de los rayos X hasta la región de microondas, aunque concentrado en el intervalo de 0.35 μm – 2.5 μm. A la distancia que se encuentra la Tierra del Sol, el planeta recibe un flujo constante de energía de alrededor de 1,38 kilovatios por metro cuadrado en la capa superior de la atmósfera.

Cuando la luz solar ilumina a los objetos de la superficie terrestre una porción de la energía es absorbida, otra parte es transmitida hacia sectores inferiores y otra parte es reflejada.

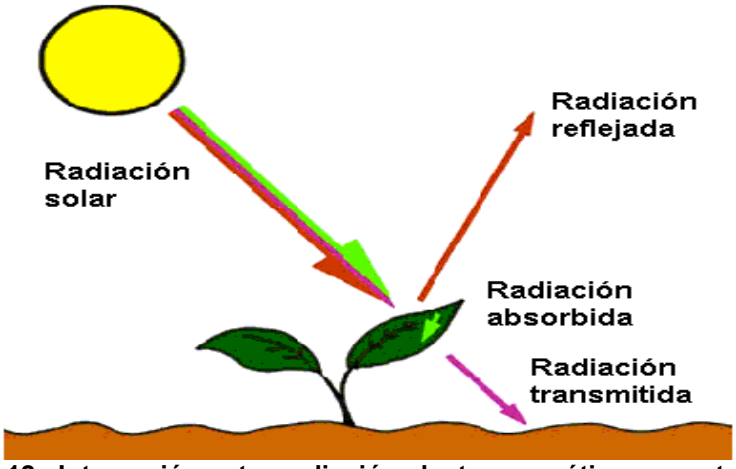


Figura 2.12 Interacción entre radiación electromagnética y vegetación [5].

La energía que llega a los cuerpos, incide en la superficie y puede sufrir tres procesos: ser reflejada (R), absorbida (A) o transmitida (T), por lo tanto la energía incidente (I) será la sumatoria de todos los anteriores procesos.

$$I = R + A + T$$

La energía reflejada y el calor que los cuerpos emiten, es la energía que los sensores de los satélites reciben, después de interactuar nuevamente con la atmósfera.

Las propiedades físicas y químicas de los objetos de la superficie de la Tierra afectan la cantidad y características de la energía que es reflejada, transmitida o absorbida, en comparación con el total que incide en dichos objetos. En general, los objetos de la superficie terrestre actúan como filtros que selectivamente reflejan, absorben o transmiten energía dependiendo de su longitud de onda.

2.2.5.2 Interacción entre la atmósfera y la radiación electromagnética

La atmósfera no es un cuerpo transparente en ella se encuentran pequeñas partículas en suspensión que interactúan con la radiación incidente. La energía al chocar con estas partículas puede ser dispersada, absorbida o emitida dependiendo de la longitud de onda. Las porciones del espectro electromagnético donde la radiación no es absorbida y llega a la superficie de la Tierra se denominan ventanas atmosféricas, éstas son de gran importancia para diseñar los sensores de los satélites y para captar energía dentro de estas longitudes de onda.

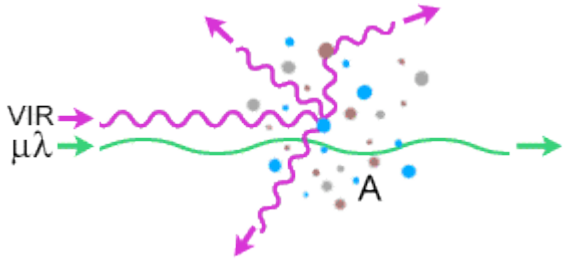


Figura 2.13 Interacción entre atmósfera y radiación electromagnética [2].

También la atmósfera emite parte de la energía absorbida en forma de calor y este tipo de energía es registrada principalmente por los sensores diseñados para generar información de las energías electromagnéticas del infrarrojo térmico.

En el trayecto seguido por la atmósfera, la radiación electromagnética sufre tres fenómenos principales:

- Absorción
- Dispersión
- Emisión

Sus efectos se manifiestan en un emborronamiento de la imagen, se reduce el contraste y la cantidad total de radiación que llega al sensor.

Absorción

Proceso por el cual las moléculas y partículas de la atmósfera absorben la energía radiante y la transforman en energía interna que posteriormente será emitida en el infrarrojo térmico. La atmósfera reduce así la observación espacial a ciertas bandas concretas del espectro, llamadas ventanas atmosféricas.

Dispersión

Este fenómeno se traduce en un pequeño desvío del camino recto de propagación. Es causado por la interacción entre la radiación y los gases y partículas atmosféricas Se describen tres tipos de dispersión:

- **Dispersión Rayleigh**
  Se produce cuando afecta a longitudes de onda menores que el tamaño de la partícula, es decir a las longitudes de onda más cortas. Es la de mayor influencia en teledetección y es la causante del color azul del cielo.

- **Dispersión Mie**
  Se produce cuando afecta a longitudes de onda de tamaño similar al tamaño de la partícula. También depende de la longitud de onda.

- **Dispersión no selectiva**
  Producida por las partículas de mayor tamaño. Afecta por igual a todas las longitudes de onda. Por eso las nubes y nieblas se ven de color blanco, ya que dispersan por igual toda la luz visible.

Emisión

Desde el punto de vista corpuscular, la radiación electromagnética es la emisión de y cualquier cuerpo con temperatura mayor que -273 ºK, emite su propia radiación. Los sensores de satélites miden la energía radiante proveniente de las distintas fuentes emisoras que ha sufrido una serie de procesos en el sistema tierra-atmósfera. Las principales fuentes de emisión son la superficie de la tierra las nubes, la propia atmósfera y las zonas acuosas (mares, océanos, lagos, ríos, etc.).

Tipos de superficies

Especular

Es aquella superficie ideal en la que se cumple perfectamente la ley de la reflexión (ángulo incidente igual ángulo reflejado).

Lambertiana

Es aquella superficie, también ideal, que refleja la radiación incidente de manera uniforme en todas las direcciones.

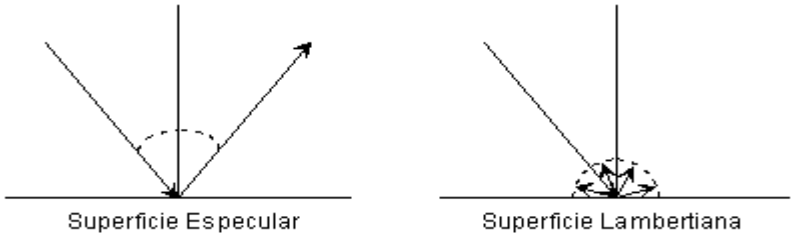


Figura 2.14 Tipos de superficies [8].

En realidad todas las superficies son una mezcla de las dos, además es función de la longitud de onda. Si ésta es pequeña, las rugosidades tienden a difundir mucho más la energía incidente que si son longitudes de onda mayores, con comportamiento más especular.

Factores importantes

Para una misma superficie, el flujo de energía recibido por el sensor no sólo depende de la reflectividad, sino también de otros factores:

- *Angulo de iluminación solar*, depende de la fecha del año y la hora de medición.
- *Relieve*, distintas pendientes.
- *Influencia de la atmósfera*, dispersión y absorción.

- *Variaciones medioambientales de la superficie*, asociación con otras cubiertas, homogeneidad.

La conclusión que se obtiene de la presencia perturbadora de estos factores es que en torno a un comportamiento tipo, que se denomina firma espectral, cada cubierta presenta una cierta variabilidad espectral debida a los factores ya comentados, que dificulta su discriminación de otras superficies.

2.3 Aplicaciones de la Percepción Remota

La percepción remota se ha aplicado con bastante éxito y sobre todo, con la certeza de que será una tecnología importantísima a corto plazo, en áreas y aplicaciones como:

AGRICULTURA

Dentro de las primeras aplicaciones de la percepción remota se encuentra precisamente la agricultura, tanto por la relativa facilidad con la que una clasificación espectral puede separar un cultivo dado, como por lo que representa en la alimentación de una comunidad nacional. Con imágenes de satélite se han obtenido precisiones de hasta 90% en la identificación de un cultivo específico.

La mayoría de los plantíos son de temporal, lo que significa que una buena parte del desarrollo del cultivo se encuentra bajo la sombra de las nubes formadas en la época de lluvias; estas nubes, impiden el registro de imágenes multiespectrales de los cultivos bajo estudio, ya que la luz solar es reflejada en su mayor parte por dichas nubes y la luz que proviene de los cultivos es absorbida y dispersada casi en su totalidad por ellas, de tal manera que la información que llega al sensor remoto se refiere prácticamente a la cobertura nubosa.
En recientes estudios se han empleando sensores remotos con señales de radar, puesto que este tipo de señales penetra la cobertura nubosa casi sin distorsión, lo que permite captar los cultivos que se encuentran bajo las nubes.

Los estudios que se han hecho hasta ahora indican que, en la mayoría de los casos, las imágenes de satélite no son por sí mismas suficientes para proporcionar datos que permitan una estimación confiable de rendimientos agrícolas para la mayoría de los cultivos, sino que es necesaria la combinación de datos que se obtienen de los satélites, principalmente de radar y de aquellos satélites llamados del medio ambiente y de recursos naturales.

GEOHIDROLOGÍA

El uso de los satélites de percepción remota en relación con el problema geohidrológico ha crecido continuamente desde 1970, al principio este uso se basó en operación de satélites polares de baja órbita, llamados de "recursos naturales", después los satélites llamados del "medio ambiente", con órbitas ecuatoriales y geoestacionarias vinieron a complementar los datos para las aplicaciones en recursos acuíferos.

Los satélites de “recursos naturales” han contribuido a la geohidrología por medio de observaciones de varios aspectos del clima global, como son las clases de nubes y los patrones de movimiento de las mismas, la formación y desarrollo de huracanes, los patrones de movimiento de los vientos atmosféricos, los efectos de sequías prolongadas, inundaciones, humedad de la vegetación y depósitos de nieve y de hielo en invierno, con el objeto de cuantificar el flujo de agua cuando ocurre el deshielo en verano.

Los satélites del “medio ambiente” han contribuido enormemente a la evaluación de las condiciones del terreno para la prospección de los recursos naturales en general, ya que las imágenes que se obtienen cubren buena parte del espectro de la luz visible y parte del infrarrojo térmico, con lo que se pueden establecer tanto los tipos de rocas, los valles, las montañas y las mesetas, así como observar los lineamientos, los patrones de textura de drenaje y las anomalías en la vegetación.

En los últimos años se han sumado a los satélites arriba mencionados varios más que trabajan con señales de radar. La medida de la respuesta espectral en la región del radar permite establecer la distribución espacial de las litologías, los patrones de textura del terreno, las áreas de drenaje, las pendientes de las geoformas y la distribución espacial de la humedad superficial del suelo.

Los satélites del medio ambiente, los de recursos naturales y los de radar, proporcionan los datos suficientes como para elaborar modelos del comportamiento atmosférico y con ello establecer los mecanismos de evolución del clima terrestre

GEOTERMIA

Para satisfacer las necesidades de agua y energía para usos domésticos, municipales, agropecuarios e industriales de una gran población se requiere del aprovechamiento máximo de los recursos hidrológicos subterráneos principalmente y de la exploración y explotación de fuentes "limpias" de energía como lo es la geotermia. Desde el punto de vista de la percepción remota, consta básicamente de tres etapas: prospección, cuantificación y predicción.

La prospección se refiere a la identificación y delimitación de las fuentes geotérmicas, labor que ha sido realizada con apoyo de campo y fotografías aéreas.
La cuantificación de un campo de este tipo es una tarea difícil, ya que se requiere conocer, entre otros parámetros, la temperatura y la presión del agua del manto geotérmico, que son datos de campo, y la energía liberada por el campo geotérmico, la cual puede establecerse por medio de imágenes de satélite con bandas en el infrarrojo térmico.
La predicción se refiere al comportamiento esperado del campo geotérmico durante el proceso de explotación.

El empleo correcto de técnicas geofísicas de campo, en conjunto con la utilización combinada de imágenes de satélite, permiten calcular en forma confiable el potencial de un campo geotérmico y predecir su comportamiento para diversas posibilidades de explotación.
La percepción remota puede no sólo apoyar la selección de campos de alto rendimiento, sino intervenir en la clasificación de aquellos campos susceptibles de ser utilizados en otras áreas de la prospección de los recursos naturales de México, como es el caso de la agricultura.

GEOLOGÍA

El trabajo de investigación geológica demanda la obtención de datos de satélites de recursos naturales y del radar, por lo que la complejidad computacional puede convertirse en una gran tarea. Existen dos áreas de investigación geológica, la primera que concierne a fenómenos estáticos, como lo es la distribución, carácter y estructura de cuerpos rocosos, geoformas, litologías y fallas estructurales, y la segunda que tiene que ver con fenómenos dinámicos, como el vulcanismo, las modificaciones en la plataforma continental y la sismología.

Fenómenos estáticos. Las observaciones desde el espacio de fenómenos estáticos tienen dos aplicaciones prácticas de consecuencias inmediatas: una mejoría en la cartografía geológica y la obtención de recursos más eficientes para la exploración en campo. Estas aplicaciones traen consecuencias directas en el diseño y desarrollo de proyectos tales como líneas de ferrocarril, carreteras, presas y, en general, de plantas industriales.
Las aplicaciones de la percepción remota en la geología se dirigen a dos grandes recursos, la minería y el petróleo.

Fenómenos dinámicos. La segunda gran área de aplicaciones geológicas está relacionada con fenómenos dinámicos, en donde las imágenes de satélite son utilizadas para poder evaluar los cambios ocurridos en el curso de una intensa corriente de agua después de una avalancha, determinar los cambios que ocurren en las regiones costeras después de haber sido azotadas por un huracán; o bien, a

través de satélites del medio ambiente, seguir la evolución y cuantificar la nube de desechos gaseosos emitidos por acción volcánica.

CARTOGRAFÍA

Las imágenes multiespectrales producto de los satélites tienen varias características que han demostrado ser adecuadas para la elaboración de mapas cartográficos. Las características de las imágenes de la superficie terrestre que las hacen adecuadas para este tipo de trabajo son las siguientes:

a) Uniformidad de vista sobre una gran área.
b) Ángulo de vista casi vertical.
c) Fidelidad geométrica y radiométrica.
d) Buena definición de rasgos naturales del terreno.
e) Capacidad para obtener un producto final en un tiempo cercano al de la toma.
f) Forma digital de los datos.

Todas estas características garantizan una buena reproducción de mapas cartográficos y una capacidad de comparación de mapa a mapa en el transcurso del tiempo, ya que la forma digital de los datos permite su manipulación matemática por computadora.
Como complemento a los mapas que se pueden obtener por medio de los satélites Landsat y SPOT, se encuentran aquellos generados por radar en zonas con alta concentración nubosa, donde sólo los sistemas activos que operan con señales de radar pueden captar y obtener una descripción de la escena cubierta por nubes.

OCEANOGRAFÍA Y RECURSOS MARINOS

Por medio de la detección de la radiación proveniente del mar y de la captura sinóptica de la temperatura superficial sobre grandes áreas del océano y sobre extensas franjas de aguas costeras y de la plataforma continental, los satélites meteorológicos y actualmente los Landsat 4 y 5 han proporcionado información o han confirmado teorías acerca de la distribución de las masas de agua, de los patrones de circulación mundial de las aguas, de la estructura de las corrientes costeras y de zonas de convergencia y divergencia de masas de agua donde existen cambios notables en la temperatura o gradientes de temperatura muy pronunciados.

Toda esta información es de gran utilidad en la determinación de concentraciones de peces, en la navegación de buques, en la determinación de los patrones de circulación de los vientos, y en la creación y movimientos de masas nubosas a nivel planetario, con consecuencias importantes para entender el comportamiento climático mundial.

En la actualidad, las imágenes de los Landsat 4 y 5 se usan cada vez con mayor frecuencia en el análisis de áreas costeras, especialmente en desembocaduras de ríos, en aguas bajas, en esteros y lagunas costeras, en donde el color y la temperatura difieren notablemente de las aguas locales, por lo que las peculiaridades de dichas aguas pueden ser rápidamente identificadas y delimitadas. Además se pueden determinar los canales de navegación y observar el cambio en la distribución de profundidades de las aguas costeras

PREVENCIÓN Y EVALUACIÓN DE DESASTRES

Las imágenes de satélite tienen suficiente valor como para establecer indicadores de prevención y evaluación de cierto tipo de desastres que ocurren en nuestro planeta. Una de las áreas más promisorias de aplicación en este sentido es la que se refiere a las inundaciones y avenidas repentinas y de gran magnitud, que son, los desastres más frecuentes, y de mayor intensidad en cuanto a daños materiales y costo en vidas.

Las imágenes producto de la percepción remota hacen posible la demarcación de áreas inundadas y, en combinación con mapas de uso del suelo, se identifican entonces la topografía y el tipo de tierras inundadas y la estimación de las consecuencias socioeconómicas sobre todo con respecto a la agricultura y a la ganadería.

Las imágenes de los Landsat 4 y 5 son particularmente útiles para la identificación y evaluación directa de incendios forestales y de la vegetación en general. Esta banda también es empleada para establecer las condiciones de cultivos y zonas forestales dañadas como consecuencia de la humedad y agua, las áreas infectadas por plagas o regiones devastadas por fenómenos tales como erupciones volcánicas, tormentas o talas ilegales.

SILVICULTURA

Entre los principales aspectos relacionados con la percepción remota de cobertura vegetal y con aquellos que se refieren al estudio de los bosques, se encuentran las que se relacionan con:

- La detección de zonas deterioradas por plagas, incendios o tala inmoderada.
- El cambio en el tiempo y en el espacio del vigor de los árboles, tanto en lo que se refiere al área foliar como a la biomasa.
- La ubicación y delimitación de las áreas boscosas.
- La identificación de las especies con relación al tipo de suelo, altura sobre el nivel del mar, condiciones climatológicas y localización geográfica.

Estos cuatro aspectos de la silvicultura desde el punto de vista de la percepción remota, constituyen la base para establecer una metodología capaz de proporcionar censos de bosques con regularidad y oportunidad. Todo esto con fines de control y explotación racional por especie de árbol, de supervisión de zonas dañadas por desastres naturales o por acciones ilegales como la tala inmoderada, además de que permite definir las políticas de conservación y reforestación.

IDENTIFICACIÓN DE HIELO MARINO

El notable incremento del tránsito de barcos de investigación, mercantes y de exploración, en combinación con las labores de exploración del petróleo en aguas árticas y subárticas, ha incrementado la necesidad de información oportuna referente a las condiciones de la cobertura del hielo marino. El conocimiento de estas condiciones de cobertura, se obtiene a través de la percepción remota satelital, es la única manera práctica de obtener mapas cartográficos de las condiciones del hielo sobre una base regional y repetitiva. De acuerdo a lo anterior, se utilizan satélites LANDSAT y satélites de radar para obtener imágenes que permitan observar el comportamiento del hielo marino en regiones polares.

En cuanto a la cobertura nubosa y de neblina, comunes en las latitudes extremas, se pueden obtener respuestas similares a las del hielo, no obstante, siguiendo algunos criterios simples de forma y textura, es posible diferenciar al hielo marino; estos criterios son los siguientes:

- La brillantez del hielo es generalmente más uniforme que la de las nubes.
- Las sombras de éstas pueden ser reconocidas en la imagen LANDSAT.
- Las nubes tienen márgenes desvanecidos, mientras que los fragmentos de hielo e icebergs presentan contactos muy precisos con el agua.
- Los patrones y texturas de distribución espacial de los hielos difieren de aquellos de las nubes.

Por otra parte, las principales ventajas de la evaluación del hielo marino por medio de imágenes de radar, son la posibilidad de adquirir imágenes en condiciones de oscuridad o cuando también prevalecen condiciones de nubosidad o neblina, ya que estos objetos son transparentes a las señales de radar.

3

SATÉLITES, CAPTORES Y APLICACIONES

3.1 NOAA

Iniciales de National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), estas siglas se les dio a una serie de satélites para fines meteorológicos lanzados desde los EE.UU. para reforzar la vigilancia de las condiciones del tiempo realizada por los satélites Nimbus.

Los satélites NOAA se mueven en órbitas casi polares a 1,500 Km. de altura, realizando una vuelta completa alrededor de la Tierra en un promedio de 115 minutos.

Los primeros satélites específicamente meteorológicos fueron los TIROS (Television Infra-Red Observation Satellite), al inicio de los años 60, que permitieron una visión global de los sistemas nubosos. Actualmente existen dos grandes grupos de satélites meteorológicos, los de órbita polar y los geoestacionarios.

Los satélites meteorológicos pueden clasificarse en dos grandes grupos, de órbita polar o heliosincrónica (se sincronizan con el Sol) que como su nombre lo indica orbitan la Tierra de polo a polo y lo constituyen principalmente la serie TIROS de la agencia NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) de origen norteamericano y los METEOR de origen ruso.
El segundo grupo se compone de los satélites Geoestacionarios o Geosincrónicos (se sincronizan con el movimiento de rotación de la Tierra), que orbitan a mayor altura y se encuentran sobre o muy cercanos a la línea del Ecuador.

3.1.1 Características de los satélites NOAA

- Orbita polar o heliosincrónica, es decir que orbitan de polo a polo, con frecuencia establecida o sincronizada.
- Orbitan a una altura entre 800 y 900 kilómetros.
- Orbitan quietos (sin rotar sobre un eje) y poseen un radiómetro (sensor) llamado AVHRR que barre línea por línea la superficie de la tierra a medida que el satélite avanza.
- Pasan dos veces al día por el mismo punto.
- Al ser de órbita baja permiten altas resoluciones.
- Operan en dos modos, uno de baja resolución APT (Automatic Picture Transmition) y otro de alta HRPT (High Resolution Picture Transmition).
- Los TIROS trabajan en cinco bandas, dos en visible y tres en IR (infrarrojo).
- Tienen un tiempo de operatividad de aproximadamente dos años.

3.1.2 Contribuciones

La utilidad de los satélites meteorológicos es la de poder visualizar el conjunto Tierra- Atmósfera, y extraer la máxima información posible a través de distintas técnicas y procesos para obtener los productos cuyo objetivo se basa en el análisis cualitativo y cuantitativo de las imágenes obtenidas. Las imágenes de los satélites meteorológicos se utilizan principalmente para la visualización de nubes, clasificación, observación del vapor de agua existente en la alta y media atmósfera, temperaturas de la superficie de tierra y temperatura superficial del mar.

Los satélites TIROS-NOAA tienen como objetivo medir la temperatura y humedad de la atmósfera, la temperatura de la superficie terrestre, la temperatura en la superficie del océano identificando la nieve y el hielo, estudiar la distribución de las nubes, y las características de las partículas atómicas emitidas por el Sol, midiendo la densidad del flujo de protones, electrones y otras partículas procedentes del planeta.

3.1.3 Sensores

Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR/3)
AVHRR es un radiómetro que permite una alta resolución.
Este instrumento explora una línea de 3000 Km. de ancho. (1.1 kilómetros a la vertical del satélite).

Número de canal.	Longitud de onda (μm).	Uso típico.
1	0.58 - 0.68	Día: nubes
2	0.725 - 1.00	Día: tierra y agua
3ª	1.58 - 1.64	Día: nieve y hielo
3B	3.55 - 3.93	Nubes, temperatura superficial del mar
4	10.30 - 11.30	Nubes, temperatura superficial del mar
5	11.50 - 12.50	Temperatura superficial del mar

Tabla 3.1 Datos del sensor AVHRR/3

Advanced Microwave Sounding Unit-A (AMSU-A)
ASUMU-A es un radiómetro pasivo de microondas usado para perfilar temperatura atmosférica y la humedad de la superficie terrestre a 45 Km. Todas las órbitas que comienzan en el día (UTC de 00:00:00 - de 23:59:59) se almacenan en un archivo diario de HDF-EOS. Hay 15 canales, así como latitud, longitud y tiempo respectivamente. Toda esta información se comprime y se almacena.

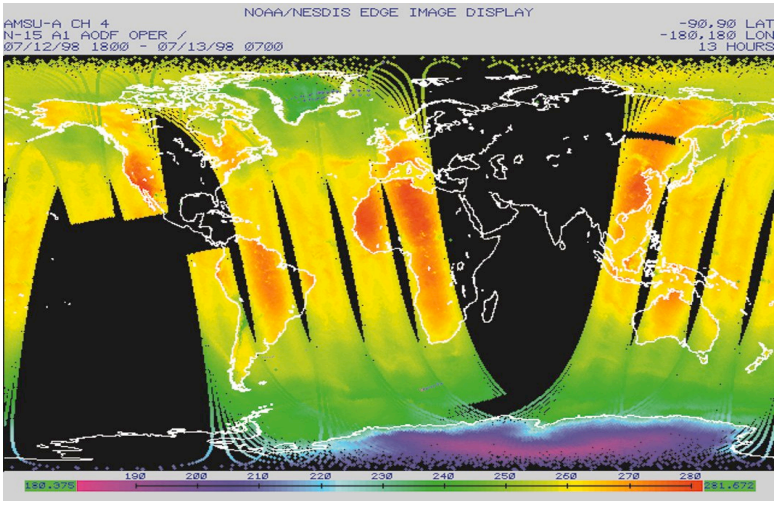


Figura 3.1 Sensor AMSU-A [28].

Advanced Microwave Sounding Unit-B (AMSU-B)
El propósito del instrumento de AMSU-B es recibir y medir la radiación de un número de diversas capas de la atmósfera para obtener datos globales sobre perfiles de la humedad. Trabaja conjuntamente con los instrumentos de AMSU-A para proporcionar un total de 20 canales de microondas para sonar atmosférico. En la frecuencia de las microondas usadas, las nubes son casi transparentes, mientras que la lluvia y la nieve son emisores fuertes, de tal forma que el sensor también se utiliza para crear mapas en donde se muestre la precipitación.

AMSU-B lleva los canales 16 a 20. Los canales más altos: 18. 19 y 20, atraviesan la raya de absorción fuertemente opaca del vapor de agua en 183 GHz y proporcionan datos en el nivel de humedad de la atmósfera. Los canales 16 y 17, en 89 GHz y 150 GHz respectivamente, permiten una penetración más profunda a través de la atmósfera a la superficie de la tierra. Debido a la alta variabilidad del agua atmosférica, AMSU-B tendrá una resolución más alta que el de AMSU-A, con un campo visual circular que tiene un diámetro cerca de 16 kilómetros en el nadir. Noventa de éstos se mide en cada exploración.

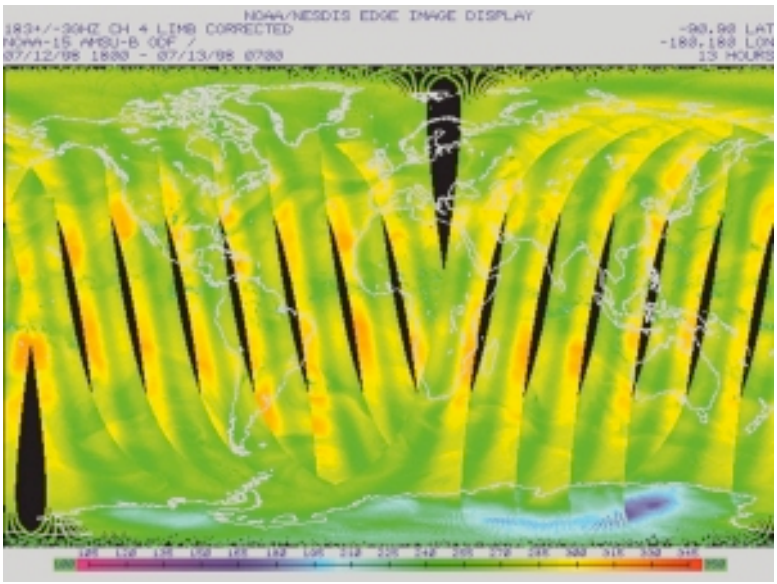


Figura 3.2 Sensor AMSU –B. Datos preliminares de AMSU-B channel-4, los datos de AMSU-B son combinados con otros datos para derivar una gama de productos atmosféricos, tales como campos globales de la humedad y del vapor de agua [28].

High Resolution Infrared Radiation Sounder (HIRS/3)
HIRS es un elemento fundamental en los satélites de tipo TIROS Operational Vertical Sounding (TOVS). Mide radiaciones de la escena en 20 bandas espectrales para permitir el cálculo del perfil de temperatura vertical en condiciones nube-libres, de la superficie hasta cerca de 40 Km. HIRS/3 e HIRS/4 son similares en funcionamiento y respuesta espectral, con la diferencia del campo visual de tierra eficaz (FOV).

Los datos multiespectrales a partir de un canal visible (0.69 µm), de siete canales de la onda corta (3.7 a el 4.6 µm) y de doce canales de la onda larga (6.7 a el 15 µm) se obtienen de un telescopio y de una rueda del filtro que rota y que contiene varios filtros individuales. El campo visual que resulta es cerca de 20 por 19 Km. en el nadir en la superficie de la tierra.

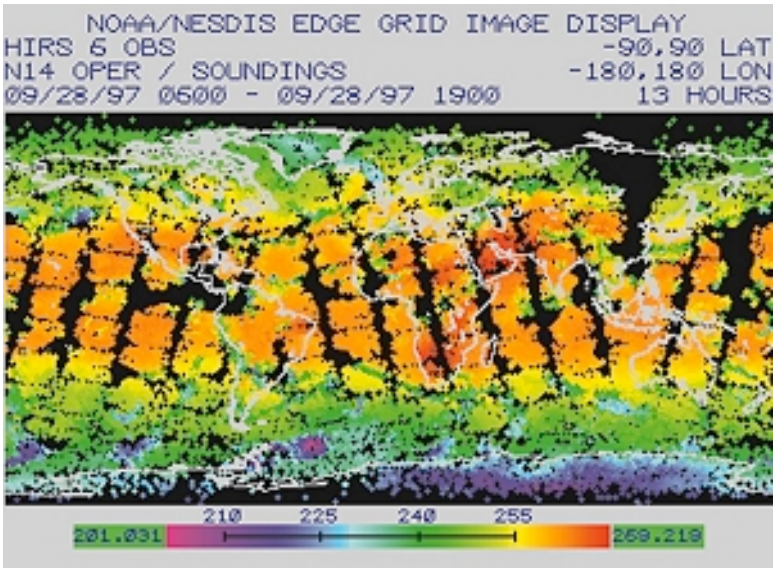


Figura 3.3 Sensor HIRS/3. Los datos atmosféricos globales de la temperatura de HIRS canal 6 en el satélite de NOAA 14 [28].

Space Environment Monitor (SEM/2)
Este sensor es un espectrómetro de varios canales que detecta el flujo de partículas cargadas en la altitud basada en los satélites, y contribuye así al conocimiento del ambiente solar terrestre. Las unidades SEM-1 han estado en órbita en la serie de TIROS-N desde 1978. SEM-2 es un nuevo diseño que se localiza en el NOAA-K, L y M de los satélites de los E.E.U.U. y también en el Metop-1, 2 y 3 satélites del sistema polar de EUMETSAT (EPS). Las emisiones solares de la partícula viajan a la tierra en la forma del viento solar, que consiste en las corrientes de las partículas cargadas que se mueven en los centenares de kilómetros por segundo.

Es una fuente de partículas para las correas atrapadas de la radiación de la tierra. Además del viento solar, ocurren las épocas de flujos intensos de electrones, de protones y de partículas alfa con energía superior a 1.000 MV. Como consecuencia de la corriente solar y las ocurrencias de las emisiones de partículas del sol puede haber grandes cambios a la entrada de la magnetosfera, de la ionosfera y de la altitud. Algo de esta energía se deposita en la ionosfera para producir la aurora visible alrededor de ambos polos magnéticos.

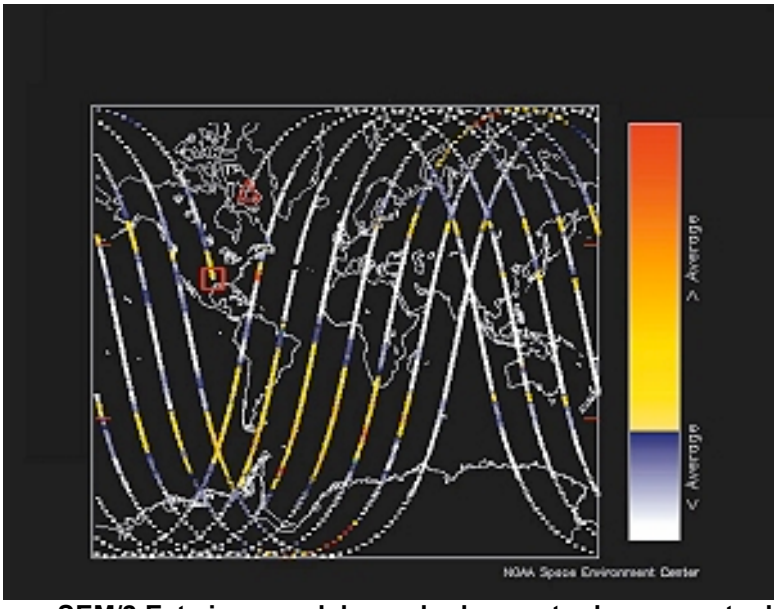


Figura 3.4 Sensor SEM/2 Esta imagen del mundo demuestra la respuesta de uno de los 19 detectores de SEM a través de un día reciente comparado con las respuestas hechas un promedio del detector el último año [28].

3.1.4 NOAA 12, NOAA 14, NOAA 15, NOAA16 y NOAA 17

Estos satélites norteamericanos NOAA son del tipo polar de baja altura. Por la altura y la elección de la inclinación de la órbita hace que esta sea heliosincrónica, es decir, que el plano de la órbita se sincronice con el sol. El satélite entonces pasará diariamente siempre por los mismos lugares de la tierra a la misma hora.

Los satélites registran imágenes en 5 diferentes bandas espectrales, en el rango de luz visible a infrarrojo. Esta información se transmite a tierra en dos formatos diferentes: HRPT y APT. El primer formato (HRPT) es digital, se transmite en 1690 MHz y requiere un equipo un poco más sofisticado. APT fue diseñado para ser recibido con medios reducidos, pero tiene la desventaja de transmitir solamente 2 de las 5 bandas espectrales, y con un cuarto de la resolución. La frecuencia es en la banda de 137 MHz.

NOAA 12

Descripción	Valor	Unidad
Satélite	NOAA-12	
Lanzamiento	1991/05/14	
Nombre antes del lanzamiento.	NOAA – D	
Nombre Actual	NOAA – 12	
NASA ID	21263	
Altura aproximada	830	Km.
Inclinación Órbita	98.7	Grados
Período Orbital	105	Minutos
Frecuencias	137.50 (APT) 137.62 (APT) 1698 (HRPT) 1707 (HRPT)	MHz.

Tabla 3.2 Datos del Satélite NOAA 12

NOAA 14

Descripción	Valor	Unidad
Satélite	NOAA-14	
Lanzamiento	1994/12/30	
Nombre antes del lanzamiento.	NOAA – J	
Nombre Actual	NOAA – 14	
NASA ID	23455	
Altura aproximada	870	Km.
Inclinación Órbita	98.86	Grados
Período Orbital	102	Minutos
Frecuencias APT	OFF	MHz.
	137.50	
	137.62	
Frecuencias HRPT	1698	MHz
	1707	

Tabla 3.3 Datos del Satélite NOAA 14

NOAA 15

Descripción	Valor	Unidad
Satélite	NOAA-15	
Lanzamiento	1998/05/13	
Nombre antes del lanzamiento.	NOAA – K	
Nombre Actual	NOAA – 15	
NASA ID	25338	
Altura aproximada	870	Km.
Inclinación Órbita	98.86	Grados
Período Orbital	102	Minutos
Frecuencias APT	137.50	MHz.
	137.62	
Frecuencias HRPT	1698	MHz
	1702.5	
	1707	

Tabla 3.4 Datos del Satélite NOAA 15

NOAA 16

Descripción	Valor	Unidad
Satélite	NOAA-16	
Lanzamiento	2000/09/21	
Nombre antes del lanzamiento.	NOAA – L	
Nombre Actual	NOAA – 16	
NASA ID	26536	
Altura aproximada	870	Km.
Inclinación Órbita	98.86	Grados
Período Orbital	102	Minutos
Frecuencias APT	OFF	MHz.
	137.50	
	137.62	
Frecuencias HRPT	1698	MHz
	1707	

Tabla 3.5 Datos del Satélite NOAA 16

NOAA 17

Descripción	Valor	Unidad
Satélite	NOAA-17	
Lanzamiento	2002/06/24	
Nombre antes del lanzamiento.	NOAA – M	
Nombre Actual	NOAA – 17	
NASA ID	27453	
Altura aproximada	870	Km.
Inclinación Órbita	98.78	Grados
Período Orbital	102	Minutos
Frecuencias APT	137.50 137.62	MHz.
Frecuencias HRPT	1698 1707	MHz

Tabla 3.6 Datos del Satélite NOAA 17

3.2 ENVISAT

En marzo del año 2002, la Agencia Espacial Europea (ESA), millones de personas y científicos que habitan el continente, fueron testigos del lanzamiento del satélite ENVISAT. Un satélite de órbita polar de observación territorial que provee medidas de la atmósfera, océano, tierra y nieve durante un periodo de 5 años.

ENVISAT ha tomado tanta importancia debido a que la información que éste provee es de gran utilidad para la investigación científica. Se trata de un satélite que desde los primeros momentos de uso ha proporcionado información precisa que ayuda a observar la evolución ambiental, así como los cambios de clima, y como consecuencia de todo lo anterior, ENVISAT ha permitido que se desarrollen aplicaciones comerciales y operacionales.

La Agencia Espacial Europea (ESA) ha resumido la importancia que el satélite ENVISAT tiene para los habitantes europeos diciendo que *"ENVISAT es un símbolo en la cultura científica".*

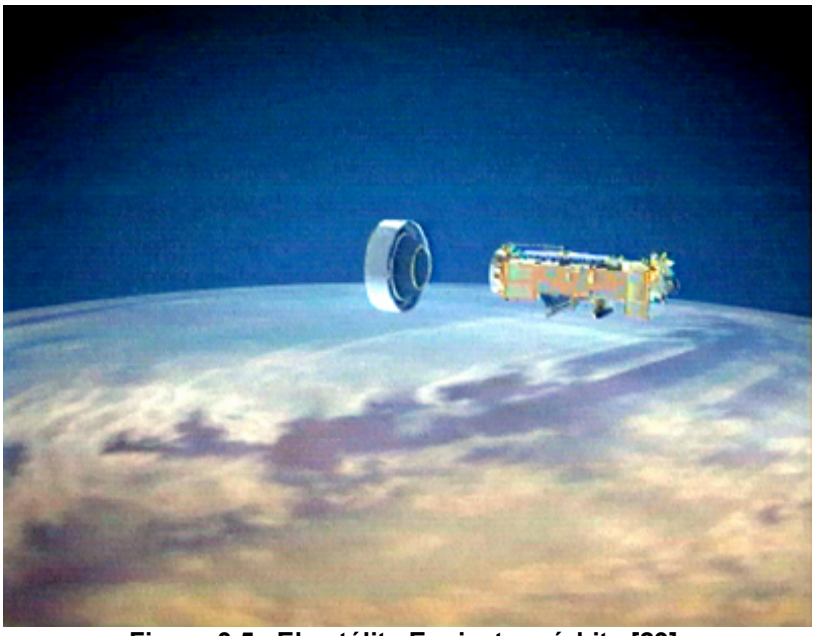


Figura 3.5 El satélite Envisat en órbita [29].

3.2.1 Características del satélite ENVISAT

- Tiene un peso de 8,200 Kg. consta de un Radar de Apertura Sintética el cual puede medir milímetros y puede observar movimientos de tierra de tan sólo 1 mm al año, información vital para protección civil, geólogos e ingenieros civiles.
- Su panel solar genera 6.6 KW. de electricidad por un período de 5 años en órbita.
- Realiza una orbita alrededor de la tierra cada 100 minutos a una latitud de 800 Km. Con una cobertura repetida cada 35 días, aunque puede obtenerse una cobertura general en períodos de tan sólo 3 días.
- Sus instrumentos trabajan con longitudes de onda desde 0.2 µm hasta 10 cm.
- Los datos que va a recoger durante su vida útil serán capaces de llenar los discos duros de un millón de computadoras.
- La velocidad de transmisión de sus datos a sus centrales receptoras en tierra son 2000 veces más rápidas que un módem común y corriente.
- A bordo del satélite se almacenarán 160 GBits.

3.2.2 Contribuciones del satélite ENVISAT

Comprensión del calentamiento global
A partir de mapas globales y tridimensionales de los gases del efecto invernadero en la atmósfera, toma minuciosas imágenes de la temperatura global de la superficie del mar y mapas de la distribución de fitoplancton. Además posibilita el control de pequeños cambios en el nivel del mar, hielos polares y corrientes oceánicas.

Control de la capa de ozono
Ayuda a comprender de qué modo la capa de ozono se repara por si misma y cuánto tiempo necesita para hacerlo. Además ofrece un mapa tridimensional de los niveles de ozono y de las reacciones químicas de la atmósfera que le afectan directamente.

Investigación sobre el niño
Detecta los signos de alarma previos a un episodio de El Niño, gracias a que es capaz de trazar el perfil de la superficie marina con una exactitud mayor a 5 cm. ya que mide su temperatura con 0.3 ºC de precisión.

El bosque en el microscopio
Aporta datos cada tres días de la cobertura de bosques, permitiendo distinguir entre zonas forestales y tierra agrícola. Además detecta focos calientes originados por incendios y la evolución de gases y aerosoles, única prueba de la quema de biomasa a gran escala.

El mar
Permite conocer la forma en que esta aumentando el nivel del mar. Es capaz de realizar mapas cartográficos de los océanos del mundo a escala local y de realizar mapas del nivel del mar así como de las capas de hielo en los polos que combinado con sus medidas de temperatura proporciona imágenes detalladas de los océanos.
Vigilando la corriente del Golfo, obtiene datos de la variación de temperatura y velocidad, las cuales son indispensables para la metereología y el clima.

Seguimiento de la polución
Detecta el óxido de nitrógeno producido por la quema de combustible; el dióxido de sulfuro que contribuye a la lluvia ácida, el monóxido que daña la capa de ozono, y los aerosoles los cuales forman una capa delgada sobre la estratosfera. Con estos datos ENVISAT detecta las fuentes de polución y su extensión, e investiga si se siguen los estándares y protocolos medio-ambientales.

Reacción ante desastres naturales
Su rapidez, su capacidad de trabajar 24 horas atravesando nubes y el mal tiempo posibilita respuestas rápidas ante desastres naturales. Contribuye a la creación de la "Carta Del Espacio y Desastres Mayores", que permite el acceso a imágenes y mapas desde cualquier parte del mundo.

3.2.3 Sensores

Advanced Synthetic Aperture Radar (ASAR)
Vigila la superficie del planeta generando imágenes de amplia o reducida cobertura geográfica: relieve terrestre, hielos y olas.

Medium Resolution Imaging Specrometer Instrument (MERIS)
Toma imágenes de la superficie del planeta y de las nubes capturando la luz de las zonas visible e infrarroja del espectro electromagnético. Es capaz de conocer el color exacto de la superficie oceánica y zonas costeras, refleja la actividad biológica, observa las nubes, detecta el vapor de agua invisible de la atmósfera e identifica las distintas etapas de crecimiento de las plantas.

Radar Altimeter 2 & MicroWave Radiometer (RA-2 Y MWR)
Miden con una exactitud de 4.5 cm la distancia desde el satélite hasta la superficie del planeta. Su combinación con otros datos permite trazar el perfil de la superficie del mar o hielo, condiciones de las olas y velocidad del viento en el océano.

Global Ozone Monitoring by Occultation of Stars (GOMOS)
Sigue las estrellas y mide sus espectros electromagnéticos, es capaz de producir tantos datos como una red de 360 estaciones de tierra separadas.

Michelson Interferometer for Passive Atmospheric Sounding (MIPAS)
Observa la atmósfera en el rango infrarrojo medio y es capaz de rastrear agentes contaminadores industriales y gases de efecto invernadero.

Advanced Along Track Scanning Radiometer (AATSR)
Explora la superficie del océano en varias frecuencias infrarrojas y visibles para medir exactamente su temperatura, la de la superficie del mar la precisa a una exactitud de 0.3ºC

Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellite & Laser Retroreflector (DORIS Y EL LLR)
Miden su posición orbital con una exactitud de 4.5 cm y su velocidad orbital con una exactitud de 0.4 mm/s. Producen mapas de la superficie del océano, el campo gravitacional del manto submarino y de la topografía terrestre.

SCanning Imaging Absorption SpectroMeter for Atmospheric CHartographY SCIAMACHY
Vigila la atmósfera en un rango de longitud de onda muy ancho, que permite producir cantidades totales y perfiles de gases.

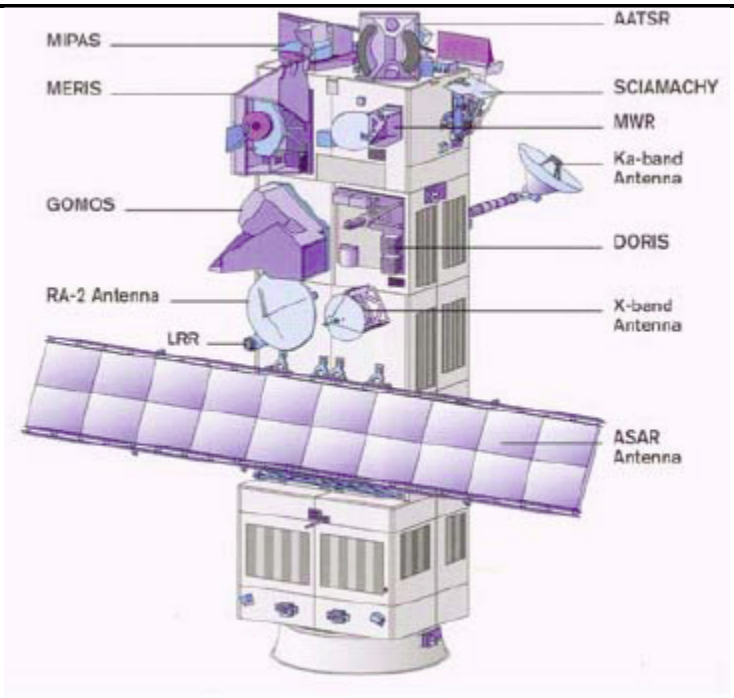


Figura 3.6 Ubicación de los sensores ENVISAT [30].

La siguiente tabla muestra un resumen técnico de los sensores del satélite ENVISAT.

Instrumento	Ciclo	Resolución Geométrica	Longitud de Onda	Rango de Frecuencia
ASAR	Continuo Imagen- 30 min	Imagen: 30X30 m Ancho de barrido: 150 X150 Km Global: 1X1 km	Banda C	5.3331 GHz
GOMOS	Continuo	17 Km vertical	UV, Visible IR cercano	250-952 nm
LLR			Visible	532-694 nm
MERIS	Solo de día (43 min)	Completo: 250 X 250 m Reducido: 1 X 1 Km	Visible IR Cercano	390-1,040 nm
MIPAS	Continuo	3 Km vertical	IR medio	4.2-14.6 µm
MWR	Continuo	20 km	Banda K y Ka	23.8 GHz 36.5 GHz
RA-2	Continuo		S-,Banda Ku	3.2 GHz
AATSR	Continuo	1X1 Km.	Visible IR cercano IR medio	13.57 GHz
DORIS	Continuo	Orbita: 10m radial 25 m otras	Banda S	0.55;0.67;0.865;1.6; 3.7;10.85;12 µm
SCIAMACHY	Continuo	3 Km vertical	UV, visible, IR cercano	240-2,380 nm

Tabla 3.7 Características principales de los sensores de ENVISAT

3.3 LANDSAT

El programa LANDSAT, fue desarrollado por la NASA y originalmente fue denominado Earth Resources Technology Satellite (ERTS). El primer satélite que la NASA lanzó como parte de este programa fue el 23

de julio de 1972 y llevó por nombre ERTS-1, pero el 14 de enero de 1975 se le cambio el nombre por el de LANDSAT-1. A continuación se muestra una tabla de los satélites LANDSAT que se han lanzado:

Satélite	Lanzamiento	Fin Operación
ERTS-1	23 de julio de1972	05 de enero de 1978
LANDSAT-2	22 de enero de 1975	27 de julio de 1983
LANDSAT-3	05 de marzo de 1978	07 de septiembre de 1983
LANDSAT-4	16 de julio de 1982	Finales de 1983
LANDSAT-5	01 de marzo de 1984	En operación
LANDSAT-6	05 de octubre de 1993	Falló la operación
LANDSAT-7	15 de abril de 1993	En operación

Tabla 3.8 Periodo de vida de los satélites LANDSAT

3.3.1 LANDSAT-1, 2 y 3

Los satélites de la primera generación (LANDSAT-1, 2 y 3), fueron construidos a partir de una modificación del satélite meteorológico NIMBUS. Tenían una órbita circular, casi polar, sincronizada con el sol, a una altura aproximada de 920 Km. Durante su período de operación, los satélites realizaban una órbita completa alrededor de la Tierra cada 103 minutos y 27 segundos, cubriendo 14 bandas de la superficie terrestre por día. La configuración de estos tres satélites fue concebida de modo que cada 18 días ellos pasaban sobre la misma región de la superficie de la Tierra.

3.3.1.1 Sensores

Los satélites de la primera generación fueron equipados con un Vidicón (return beam vidicon system) y con un scanner multiespectral (MSS).

Sistema Return Beam Vidicon (RBV)
Fue el primer sistema sensor para obtener imágenes a bordo de LANDSAT. Era un sistema que observaba toda la escena registrada en forma instantánea, estaba constituido por cámaras de televisión y operaba en una banda comprendida entre el visible y el infrarrojo próximo del espectro electromagnético. La escena terrestre registrada por la cámara representaba un área de 185 Km. La resolución espacial de este sistema en los LANDSAT-1 y LANDSAT-2 era de 80x80 m, con tres bandas espectrales y en el LANDSAT-3 era de 40x40 m, con una banda espectral.

Satélite	Cámaras	Banda espectral (um)	Aplicaciones
LANDSAT-1 LANDSAT-2	1	0.475 - 0.575 (verde)	Diferenciaba entre el suelo y la vegetación
	2	0.580 – 0.680 (rojo)	Realiza mapas de vegetación
	3	0.580 – 0.680 (rojo)	Delineaba cuerpos de agua.
LANDSAT-3	1	0.505 – 0.750 (pancromático)	Realizaba mapas de áreas urbanas, de la vegetación y de la agricultura

Tabla 3.9 Principales características del sensor RBV

MSS (Multispectral Scanner Subsystem)
Era un equipo de barredura óptico- electrónico, que operaba en cuatro bandas del espectro electromagnético, dos en el visible (canales 4 y 5) y dos en el infrarrojo próximo (canales 6 y 7). La escena terrestre observada por este sensor representaba un área de 185 Km y la resolución espacial era

de 80x80 m. En el LANDSAT-3 fue agregado un canal en la banda del infrarrojo termal (10, 4-12, 6 µm), cuya resolución era de 240 m, que captaba la radiación emitida por los objetos terrestres.

La tabla siguiente muestra las cuatro bandas espectrales y sus características.

Bandas* Del MSS	λ en µm	Color	APLICACIÓN
1	0.5 – 0.6	Verde	Uso del suelo, vegetación, áreas urbanas, calidad del agua
2	0.6 – 0.7	Rojo	Diferenciación de especies vegetales, agricultura, calidad de agua, áreas urbanas
3	0.7 – 0.8	IR próximo	Delineamiento cuerpos de agua, mapas geológicos y geomorfológicos, áreas húmedas
4	0.8 – 1.1	IR próximo	Delineamiento de cuerpos de agua, realización de mapas geológicos y geomorfológicos, áreas húmedas, fuegos

Tabla 3.10 Bandas espectrales del scanner multiespectral

3.3.2 LANDSAT-4, 5 Y 7

La segunda generación de LANDSAT está formada por LANDSAT-4, LANDSAT-5 y LANDSAT-7. Los dos primeros satélites constan de 2 sensores: el MSS (multispectral scanner subsystem) y el TE (Thematic mapper), LANDSAT-7 tiene un sensor llamado ETM+ (Enhanced Thematic Mapper Plus). De estos satélites actualmente funcionan LANDSAT-5 y LANDSAT-7

3.3.2.1 LANDSAT-5

El satélite LANDSAT-5 tiene una órbita, sincrónica con el sol, una altura de 705 Km y un período de 98.9 minutos, lo que indica que da 14 vueltas diarias alrededor de la Tierra. Su órbita es polar y por lo tanto pasa por una determinada longitud siempre a las 9:45 a.m.

El satélite y el sensor

- LANDSAT-5 pesa 2,200 Kg y tiene una longitud de 4 m. Su sensor Thematic Mapper (TM) opera en siete bandas espectrales diferentes. Estas bandas fueron elegidas especialmente para vigilar la vegetación a excepción de la banda 7 que se agregó para aplicaciones geológicas.
- **Banda 1** (0.45 a 0.52 µm -azul-). Diseñada para penetrar en cuerpos de agua, es útil para realizar mapas de costas, para diferenciar entre suelo y vegetación y para clasificar distintos cubrimientos boscosos. También es útil para diferenciar los tipos de rocas presentes en la superficie terrestre.
- **Banda 2** (0.52 a 0.60 µm -verde-). Fue diseñada para evaluar el vigor de la vegetación sana, midiendo su pico de reflectancia verde. También es útil para diferenciar los tipos de rocas.
- **Banda 3** (0.63 a 0.69 µm -rojo-). Es una banda de absorción de clorofila, muy útil para la clasificación de la cubierta vegetal. También sirve en la diferenciación de las distintas rocas.
- **Banda 4** (0.76 a 0.90 µm -infrarrojo cercano-). Sirve para determinar el contenido de biomasa, para delimitar cuerpos de agua y para clasificar las rocas.
- **Banda 5** (1.55 a 1.75 µm - infrarrojo medio -). Indica el contenido de humedad de la vegetación y del suelo. También sirve para discriminar entre nieve y nubes.
- **Banda 6** (10.40 a 12.50 µm - infrarrojo termal -). El infrarrojo termal es útil en el análisis del stress de la vegetación y en la determinación de la humedad del suelo.
- **Banda 7** (2.08 a 2.35 µm - infrarrojo medio -). Sirve para la discriminación de rocas. Mide la cantidad de hidróxilos (OH) y la absorción de agua.

Estas siete bandas pueden combinarse en tres o más, produciendo una gama de imágenes de color compuesto que incrementan notablemente sus aplicaciones, especialmente en el campo de los recursos naturales.

El Sensor Thematic Mapper (TM) tiene gran sensibilidad radiométrica y muy buena resolución espacial, ya que el tamaño del píxel en todas las bandas excepto la 6, es de 30 m. Esto permite la clasificación de zonas tan pequeñas como 2.5 o 3 hectáreas. La banda 6 tiene un píxel de 120 m en el terreno.

3.3.2.2 LANDSAT-7

LANDSAT-7 es el satélite operacional más reciente del programa LANDSAT. Este satélite tiene un peso de 1,969 Kg. perigeo de 701 Km., apogeo de 703 Km. e inclinación de 98.2º. Su operación es administrada por la NASA y la producción y comercialización de imágenes depende de la USGS (United Sates Geological Survey).

LANDSAT-7 tiene un sensor llamado ETM+ (Enhanced Thematic Mapper Plus), cuyas imágenes están compuestas por 8 bandas espectrales que pueden ser combinadas de distintas formas para obtener variadas composiciones de color u opciones de procesamiento. Entre las principales mejoras técnicas respecto de su antecesor, el satélite LANDSAT-5, se destaca la adición de una banda espectral (Banda Pancromática) con resolución de 15 m. También cuenta con una mayor resolución espacial de la banda térmica para 60 y con mejoras en las características geométricas y radiométricas.

LANDSAT-7 puede adquirir imágenes en un área que se extiende desde los 81 grados de latitud norte hasta los 81 grados de latitud sur y, obviamente, en todas las longitudes del globo terrestre. Una órbita de LANDSAT-7 es realizada en aproximadamente 99 minutos, permitiendo al satélite dar 14 vueltas a la Tierra por día, y cubrir la totalidad del planeta en 16 días. La órbita es descendente, o sea de norte a sur, el satélite cruza la línea del Ecuador entre las 10:00 y 10:15 (hora local) en cada pasaje. El LANDSAT-7 siempre pasa a la misma hora por un determinado lugar.

El período de revolución del LANDSAT-7 es igual que el del LANDSAT-5 (16 días), y una imagen cubre la misma área (185x185 Km. por escena). La conservación de estos parámetros técnicos permite una perfecta integración entre el procesamiento de las imágenes del LANDSAT-7 con datos históricos del LANDSAT-5 existentes desde 1984. Esto es muy útil cuando es necesario utilizar los dos tipos de datos de un mismo lugar en forma simultánea, por ejemplo, para un estudio multitemporal.

3.3.2.3 Principales diferencias entre el LANDSAT 7 y el LANDSAT 5

- Adición al LANDSAT-7 de una banda Pancromática con resolución espacial de 15 m.
- Al LANDSAT-7 se le hizo un perfeccionamiento del sistema de calibración radiométrica de los sensores, lo que garantiza una precisión radiométrica absoluta de 5%.
- Al LANDSAT-7 se le hizo un perfeccionamiento de la geometría de captura, lo que brinda una mayor precisión en imágenes corregidas a partir de los datos de efemérides de satélite.

3.3.2.4 Bandas espectrales y resolución espacial

- Las bandas del espectro visible y del infrarrojo mantienen la resolución espacial de 30 m de LANDSAT-5 (canales 1, 2, 3, 4, 5 y 7).
- Las bandas del infrarrojo térmico pasan a ser adquiridas con resolución de 60 m, contra 120 m de LANDSAT-5.
- La nueva banda Pancromática del LANDSAT-7 tiene 15 m de resolución espacial.

El siguiente cuadro comparativo ilustra las diferencias de resolución espectral entre el sensor TM de LANDSAT-5 y el sensor ETM+ de LANDSAT-7. Los valores, expresados en µm, representan los límites de longitudes de onda a los que es sensible cada banda espectral.

Sensor	Banda 1	Banda 2	Banda 3	Banda 4	Banda 5	Banda 6	Banda 7	Banda 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

Tabla 3.11 Cuadro comparativo de la resolución espectral entre los sensores TM y ETM+

La banda Pancromática (Banda 8)
La banda Pancromática es la mayor novedad del sensor ETM+ en el satélite LANDSAT-7. Su resolución espacial de 15 m permite que las imágenes generadas a través de este sensor puedan ampliarse hasta una escala de 1:25 000.

3.3.2.5 Niveles de corrección geométrica

En las imágenes de todos los satélites, las correcciones sistemáticas son algoritmos de rectificación de la imagen cruda aplicados automáticamente en la estación de recepción, usando parámetros espaciales contenidos en los archivos descriptores de imagen (datos de posicionamiento y efemérides del satélite), que consiguen minimizar las variaciones espaciales internas presentes en la imagen en su estado bruto, correcciones del ángulo de curvatura terrestre, variaciones de velocidad, altura y actitud del satélite, desplazamientos orbitales, etc. En las imágenes de LANDSAT-5 y LANDSAT-7 están disponibles los siguientes niveles de corrección geométrica:

- **Nivel 4.** Es un nivel de corrección básico donde la imagen es radiométrica y geométricamente corregida de forma sistemática.
- **Nivel 5.** Consiste en una imagen con correcciones sistemáticas que se georreferencian utilizando las efemérides del satélite. Los algoritmos de corrección modelan la posición del satélite y la geometría del sensor a través de datos que una computadora abordo graba sobre la captura.
- **Nivel 6**. Este nivel de procesamiento exige la intervención de un operador. La imagen obtenida en el nivel 5 es ajustada con puntos de control cartográficos o con puntos de control medidos con la tecnología GPS, obteniéndose así una imagen rectificada a una determinada proyección cartográfica.
- **Ortoimagen.** Este nivel de procesamiento exige la intervención de un operador sobre una imagen corregida con puntos de control utilizando un Modelo Digital de Elevaciones (DEM) para corregir todas las distorsiones. El producto final consiste en una ortoimagen georreferenciada a la proyección cartográfica deseada.

3.4 SPOT

El primer satélite SPOT fue lanzado en 1986 y desde entonces han sido lanzados 4 satélites exitosamente. Los satélites SPOT constan de 2 sensores de resolución media, 2 sensores especiales de diseño y capacidad estéreo. Todas las misiones SPOT tienen orbitas repetitivas circulares y polares que proveen una cobertura total de la tierra. Dichas órbitas están en fase: cada 26 días los satélites SPOT vuelan sobre los mismos puntos de la tierra.

Las funciones de los satélites SPOT son: estudiar el uso de la tierra, para investigar los recursos renovables (agricultura y bosques), realizar una exploración mineral y petrolífera y trazar mapas.

3.4.1 SPOT-1, 2 y 3

En la siguiente tabla se describen algunos datos de estos satélites:

	SPOT-1	SPOT-2	SPOT-3
Fecha de lanzamiento	22 de Febrero de 1986	22 de Enero de 1990	26 de Septiembre de 1993
Lugar de lanzamiento	Guyanés de Kourou	Guyanés de Kourou	Guyanés de Kourou
Vehículo de lanzamiento	Ariane 1	Ariane 4	Ariane 4
Peso	1,830 Kg.	1,870 Kg.	1,907 Kg.
Perigeo	821 Km	821 Km	821 Km.
Apogeo	823 Km	823 Km	823 Km.
Inclinación	89.7°	89.7º	89.7º
Fin de operación	4 de Mayo de 2002	Aún en operación	14 de noviembre de 1998

Tabla 3.12 Datos generales de los satélites SPOT

3.4.1.1 Sensores

Los satélites SPOT-1, 2 y 3 usaron el sensor **HVR (Haute Resolution Visible)**, el cual es un equipo de exploración por barrido que permite obtener imágenes en dos modalidades: pancromático y multibanda (verde, rojo e infrarrojo cercano), con una resolución espacial de 10 y 20 m respectivamente. El área cubierta en cada escena es de 60 Km. de lado, por lo que estos sensores necesitan incorporar 3000 detectores en modo multi-espectral y 6000 en modo pancromático. A continuación se describen las características de estas 2 modalidades.

	Multispectral	**Pancromática**
Bandas espectrales (µm)	0.50 – 0.59 0.61 - 0.68 0.79 – 0.89	0.51 - 0.73
Tamaño del píxel	20 x 20 m	10 x 10 m
No. de píxeles / línea	3,000	6,000
Ancho de barrido (vista vertical)	60 Km	60 Km

Tabla 3.13 Características de las bandas Multiespectral y Pancromática del sensor HVR

Se añade a estas características la capacidad de cambiar el campo de visión gracias a un dispositivo móvil instalado en el equipo óptico, que facilita observaciones no verticales de hasta 27° a ambos lados del nadir. Esto permite observar la misma zona en órbitas sucesivas ampliando la resolución temporal de las imágenes.

Además se pueden adquirir imágenes estereoscópicas, lo que añade al sensor la capacidad de aplicaciones cartográficas. Se pueden obtener modelos digitales del terreno, a escalas 1:50,000, que pueden considerarse muy precisas.

Las imágenes de HVR son idóneas para tareas de análisis visual, con una notable mejora en resolución espacial frente al LANDSAT, especialmente en medio urbano y para obtener imágenes de textura. Se han desarrollado técnicas para combinar el canal pancromático con imágenes TM, para aprovechar la resolución espectral de ese último y la resolución espacial del primero.

Junto con el HVR se incorporan equipos de apoyo como el DORIS, que proporciona un seguimiento preciso de la posición del satélite, y el POAM (*Polar Ozone and Aerosol Measurement*), incorporado en el SPOT-3 que mide el contenido de ozono, aerosoles, nitrógeno, oxígeno y vapor de agua de la atmósfera.

3.4.2 SPOT-4

El 24 de Marzo de 1998 fue lanzado SPOT-4, el cual tiene las siguientes características:

	SPOT-4
Lugar de lanzamiento	Guyanés de Kourou
Vehículo de lanzamiento	Ariane 4
Peso	2,755 Kg.
Perigeo	824 Km.
Apogeo	825 Km.
Inclinación	89.7°
Fin de operación	Aún en operación

Tabla 3.14 Características del satélite SPOT-4

3.4.2.1 Sensores

El SPOT-4 introduce un novedoso equipo: el HVIR, se trata de un sensor de alta resolución, sucesor del VHR, que introduce una nueva banda en el infrarrojo medio. Además se sustituye la banda pancromática (0.51-0.73 μm) por una nueva banda, la B2 (0.61-0.68 μm), es capaz de operar en dos modos de 10 y 20 m de resolución respectivamente. Esta modificación permite grabar a bordo datos de todas las bandas de frecuencia.

Gracias a los estudios sobre márgenes de reflectancias, realizados en los SPOT-1 y 2, se pueden introducir detectores con ganancias adaptables al tipo de suelo y estación del año, con lo que se obtiene un mayor margen dinámico. Además la polarización de la luz incidente deja de ser un factor que acepte a los sensores.

En el satélite se tienen dos HRVI, que se programan de forma independiente: se puede variar el campo de visión de uno de ellos sin afectar al otro, con lo que se incrementa la sensibilidad del sistema. Gracias al HVRI puede abordarse con mayor facilidad la integración entre imágenes de alta y baja resolución para calibrar modelos globales.

3.4.2.2 Equipos auxiliares

Los equipos auxiliares de SPOT-4 son:

- **PASTEC.** Equipo experimental para el estudio del entorno orbital.
- **DORIS.** Equipo que ya existía en los anteriores SPOT, en el modelo del SPOT-4 permite el cálculo de la posición del satélite con una precisión de 10 cm. Además cuenta con un software en nivel experimental para determinar la posición del satélite en tiempo real; los datos de posición se incluyen en los datos auxiliares transmitidos con los de telemetría.
- **SPOT laser communications passenger.** Es un láser de estado sólido que permite la comunicación entre diversos satélites, los datos de las imágenes podrán enviarse a un elevado régimen binario a través del satélite geoestacionario ARTEMIS.
- **ESBT (*Experimental S-Band Terminal*).** Equipo suministrado por la ESA con el fin de establecer un enlace a 4 Kbits/s, utilizando técnicas de Espectro Ensanchado.
- **RADAR TRANSPONDER.** Se usa para calibrar los radares.
- **POAM 3 (*Polar Ozone and Aerosol Measurement*).** Este equipo mide el nivel de ozono y aerosoles sobre la región polar.
- **INSTRUMENTO DE VEGETACIÓN.** Está orientado al inventario global de las cubiertas vegetales, posee un ángulo de observación de 2,000 Km y una resolución espacial entorno a 1 Km en el nadir. Posee una elevada resolución radiométrica, además de las bandas del VHVIR

(B2, B3 e IR medio) posee una banda adicional, la B0, que se utiliza para aplicaciones oceanográficas y correcciones atmosféricas.

3.4.3 SPOT-5

El 4 de Mayo del 2002, fue lanzado el satélite SPOT-5. Este satélite fue desarrollado por Bélgica, Francia y Suecia, tiene un peso de casi 3 toneladas, dimensiones de 3 m de lado y 5 m de alto.

El SPOT-5 tiene la capacidad de obtener imágenes pancromáticas con resolución espacial de 5 a 2.5 m e imágenes multiespectrales con resolución de 10 m cubriendo al mismo tiempo un espectro territorial de 60 x 120 Km. en cada pasada, esto es una ventaja fundamental para aplicaciones como la cartografía del territorio a mediana escala (1:25,000 y localmente 1:10,000), la planificación urbana y la gestión de riesgos mayores.

Otra ventaja fundamental del SPOT-5 es la capacidad de su instrumento estereoscópico HRS el cual es capaz de adquirir 2 imágenes simultáneamente, lo que permite cubrir un vasto territorio en una sola adquisición. Estas imágenes estereoscópicas son indispensables para todas las aplicaciones que requieren un conocimiento preciso del relieve (bases de datos de simuladores de vuelo, implantación de redes de telefonía móvil, etc).

El instrumento VEGETATION-2, también instalado a bordo de SPOT-5, permite observar el medio ambiente a escala continental.

3.4.4 Niveles de procesamiento de SPOT-4 Y SPOT-5

Nivel 1A

- Corrección radiométrica de los errores originados en las diferencias de sensibilidad entre los detectores elementales del instrumento de captura de imagen (igualación radiométrica).
- Ninguna corrección geométrica.
- Precisión de localización en el suelo inferior a 50 m e inferior a 350 m con SPOT-1, 2, 3 y 4.
- Están destinados para aplicaciones cartográficas, se utilizan para realizar procesamientos geométricos como Modelos Digitales de Terreno (MTD), ortorrectificación y procesamientos radiométricos de precisión.

Nivel 1B

- Corrección radiométrica idéntica a la del nivel 1A.
- Corrección geométrica de las distorsiones internas causadas por las condiciones de captura de la imagen como el efecto panorámico, curvatura y rotación de la tierra.
- Precisión de localización en el suelo idéntica a la del nivel 1A.
- Están adaptados para mediciones geométricas (distancias, ángulos y superficies) y para la fotointerpretación. A este nivel, el análisis es visual, asistido por ordenador o completamente digital.

Nivel 2A

- Corrección radiométrica idéntica a la corrección de los niveles 1A y 1B.
- Corrección geométrica hecha en la proyección cartográfica estándar sin utilización de puntos de apoyo. En el SPOT-5, se utiliza un MDT (Modelo Digital de Terreno) mundial con grillas de 1 Km de lado; para SPOT-1, 2, 3 y 4, la altitud de rectificación es constante en toda la escena.
- Precisión de localización en el suelo idéntica a la de los niveles 1A y 1B.

- Pueden asociarse a informaciones geográficas de tipos y fuentes diferentes, y se les puede aplicar procesamientos colorimétricos para extraer información específica.

Nivel 2B (Precisión)

- Producto geocodificado. Este producto se entrega en una proyección cartográfica dada. El uso de puntos de apoyo permite mejorar la localización en el suelo con una precisión que depende de su calidad. El error de localización es en general inferior a 30 m, en la altitud de rectificación o con un terreno llano.
- Estos productos son verdaderos mapas digitales que brindan información geográfica actualizada de la totalidad del globo. Pueden ser utilizados cada vez que las deformaciones debidas al relieve no sean determinantes.

Nivel 3 (Orto)

- Es un producto geocodificado, que corrige los errores residuales de paralaje debidos al relieve gracias a la utilización de un MDT (Modelo Digital de Terreno) procedente de Reference3D.
- La precisión de localización es inferior a 15 m para todos los píxeles.

3.5 PLEIADES

Además de la plataforma, el satélite esta dividido en dos partes. La primera parte consistirá es la que realiza la función de la proyección de imagen integrada por un telescopio, una unidad de detección y toda la electrónica asociada.
La segunda parte combinará los otros elementos funcionales del satélite: la informática, los elementos de almacenaje y transmisión, la ayuda mecánica, el control de temperatura, unidades de energía, etc.
El satélite de alta resolución Pleiades pesará menos de 1000 kilogramos para asegurar su compatibilidad con los lanzadores tales como Rockot , Soyouz, Vega , etc.



Figura 3.7 Lanzador Rockot [40].



Figura 3.8 Imagen del lanzador Vega [41].

3.5.1 Características

Instrumento de alta resolución de Pleiades
El instrumento Pleiades-HR tendrá las siguientes características:

Características de las imágenes	
Resolución en modo	0,7 m en el nadir
Pancromática	[CACEROLA: 480 - 830 nm]
Swatch	20 kilómetros en el nadir
Anchos de banda espectrales	B0 (azul): 430 - 550 nm
[resolución: 4 veces la	B1 (verde): 490 - 610 nm
resolución del modo	B2 (rojo): 600 - 720 nm
pancromático]	B3 (PIR): 750 - 950 nm
Agilidad	
Roll 60°	25 s.
Pitch 60°	25 s.
Capacidad de la adquisición	
Hasta 450 imágenes por día y por satélite	
Exactitud de la localización	
Con un punto de control de tierra	1 m
Sin punto de control de tierra	mejor que 20 m

Tabla 15 Órbita y accesibilidad

Los satélites de Pleiades serán colocados en una órbita sincronizada con el sol, puesta en fase circular en una altitud de 694 kilómetros, con un nodo descendente en 10H15. El ciclo orbital será 26 días.

Con una capacidad de alcance de 30° con respecto a la pista, la cobertura de la tierra la puede alcanzar en 5 días con un satélite, y en 4 días con los satélites del sistema 2.

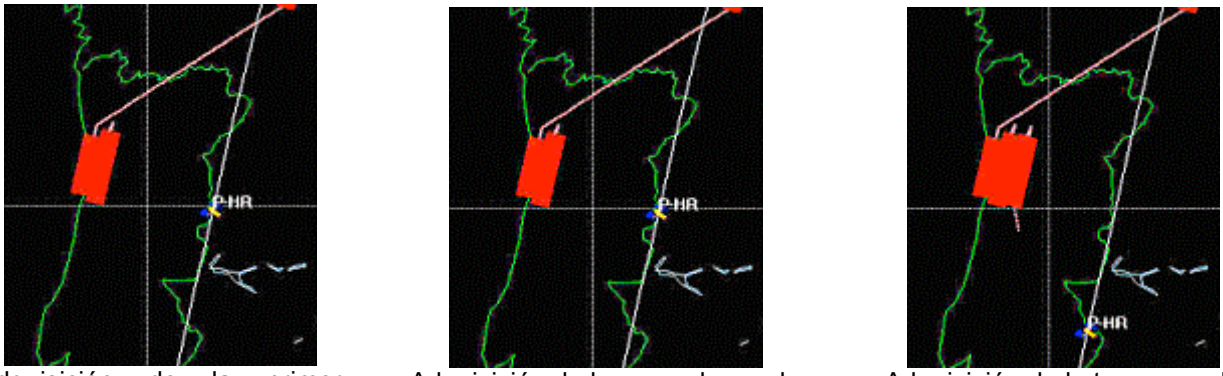
La gran agilidad de los satélites Pleiades-HR, con su capacidad de movimiento en modo roll, pitch, y winding, permitirá los modos de la nueva adquisición, imposibles con los satélites de la serie SPOT, por mencionar un ejemplo.

Estos modos son:

- El modo de adquisición “un paso”.
- El modo estereoscópico o tri-estereoscópico simultaneo de adquisición.
- El modo multi-spot de adquisición.

El modo de la adquisición "un paso" es el modo clásico de la adquisición. La agilidad de los satélites ofrece la posibilidad de agrandar de forma local el swath realizada por la misma órbita y, de forma simultánea, se hace la adquisición de varias vendas adyacentes (swatch). De esta forma, se logra adquirir imágenes con una superficie de aproximadamente 120 kilómetros de largo y 110 kilómetros de grande, con "dispointing" (máximo) en el roll de 30°.

Modo de adquisición “un paso”.



Adquisición de la primer venda | Adquisición de la segunda venda | Adquisición de la tercer venda

Figura 3.9 Modo de adquisición “un paso” [42].

Modo de adquisición estereoscópico o tri-estereoscópico.

El modo estereoscópico o tri-estereoscópico simultáneo de las adquisiciones utiliza el mismo principio de la adquisición que el modo "un paso". En este caso, en lugar de usar las capacidades de la agilidad para adquirir imágenes contiguas, la misma escena se adquiere desde diferentes perspectivas.

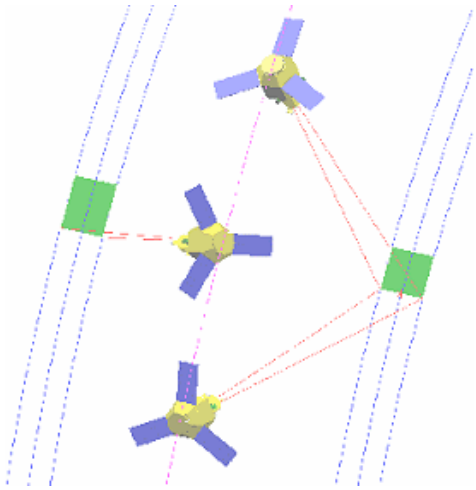


Figura 3.10 Imagen que representa el modo estereoscópico [42].

En el modo multi-spot las capacidades de agilidad del satélite se utilizan para adquirir el máximo número de escenas en una superficie dada en un mismo día.

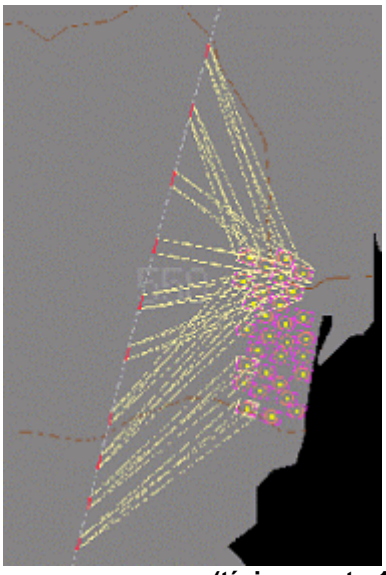


Figura 3.11 Adquisición de escenas en una zona (típicamente 15 escenas adquiridas para cubrir las superficies de 100 kilómetros x 200 kilómetros) [42].



Figura 3.12 Adquisición de las escenas dispersadas (típicamente 20 acquises de las escenas adquiridos para cubrir las superficies de 1000 kilómetros x 1000 kilómetros) [42].

3.5.2 Contribuciones

Los requisitos de PLEIADES fueron analizados por CNES (Misión Espacial Científica de la Agencia Espacial Francesa) con la ayuda de la comunidad de usuarios. Para este propósito, los usuarios franceses especialistas en el campo de la observación de la tierra hicieron una gran contribución, ambas partes reconocidas como organizaciones de usuarios o como abastecedoras de servicios.

Los resultados y las recomendaciones derivaron de foros con diversas comunidades de usuarios, organizadas por el ministerio de la educación, investigación y la tecnología (MENRT) también considerado como parte de las reuniones del "espacio y de la sociedad". De igual forma, las necesidades de las Comunidades Europeas en término de la información sobre el medio ambiente geoespacial, fueron tomados dentro de las consideraciones para la creación de este satélite.

PLEIADES es un sistema con múltiples sensores diseñado para satisfacer el mayor número posible de usuarios. Existe una gran cantidad de posibles aplicaciones, cada una requiere de características específicas, ligadas no solamente al tipo de información buscada, sino a sus características geográficas, climáticas, económicas, etc.

Sin embargo, muchos usos tienen características comunes. Ciertos usos dominantes se pueden definir y considerar para ser representativos de todos ellos.

Usos dominantes
Los usos más representativos fueron identificados para especificar necesidades del usuario. Estos usos fueron agrupados de la siguiente manera:

- Mapeo: Esto se refiere al mapeo, desarrollo, planeación de ciudades, telecomunicaciones.
- Agricultura: Agricultura de precisión, monitoreo y estadísticas.
- Ecología: Producción, protección del bosque.
- Riesgos: Riesgos hidrológicos, geología dinámica (sismos, riesgos de derumbamientos)
- Prospección Geológica.
- Usos de la marina: Hielo de los océanos, mar, líneas de la costa.
- Defensa: usos militares y de seguridad.

3.5.3 Simulaciones

Simulación en modo pancromático.

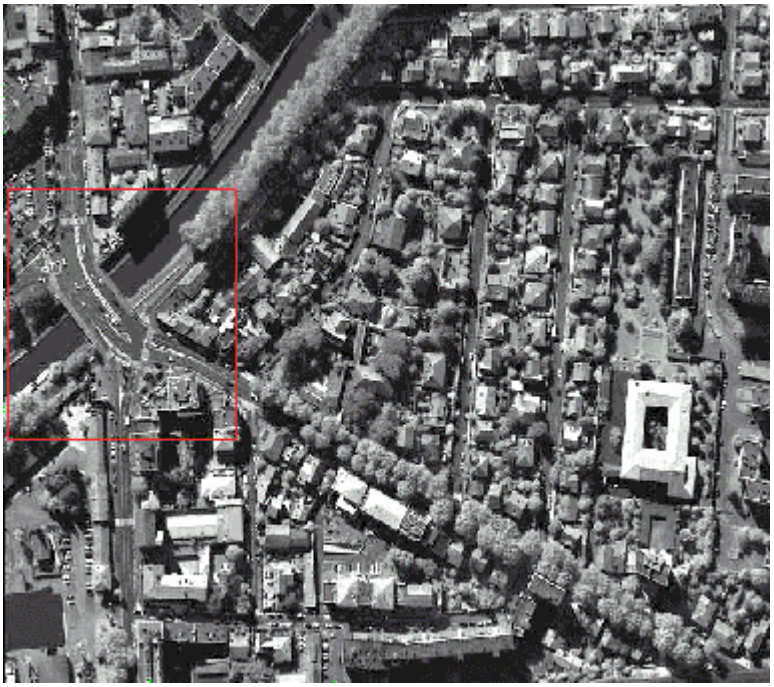


Figura 3.13 Esta imagen es una simulación en el modo pancromático realizado en la resolución espacial de Pleiades-HR en el sitio de Toulouse [42].

Simulación en modo xs



Figura 3.14 Esta imagen se encuentra es sus colores naturales (nc) como resultado de la simulación de Pleiades-HR [42].



Figura 3.15 Esta imagen se encuentra es sus colores falsos (fc) como resultado de la simulación de Pleiades-HR [42].



Figura 3.16 Esta imagen se encuentra es sus colores naturales (nc) como resultado de la simulación de Pleiades-HR [42].



Figura 3.17 Esta imagen se encuentra es sus colores falsos (fc) como resultado de la simulación de Pleiades-HR [42].

4

PROBABILIDAD Y CAMPOS ALEATORIOS DE MARKOV

4.1 Probabilidad y variables aleatorias

Al iniciar el análisis estadístico de una serie de datos, y después de la etapa de detección y corrección de errores, un primer paso consiste en describir la distribución de las variables estudiadas y, en particular, de los datos numéricos. Además de las medidas descriptivas correspondientes, el comportamiento de estas variables puede explorarse gráficamente de un modo muy simple.

Una de las distribuciones teóricas mejor estudiadas y más utilizada en la práctica es la distribución normal, también llamada distribución gaussiana. Su importancia se debe fundamentalmente a la frecuencia con la que distintas variables asociadas a fenómenos naturales y cotidianos siguen, aproximadamente, esta distribución.

Muchos de los procedimientos estadísticos habitualmente utilizados asumen la normalidad de los datos observados. Aunque muchas de estas técnicas no son demasiado sensibles a desviaciones de la normal y, en general, esta hipótesis puede obviarse cuando se dispone de un número suficiente de datos, resulta recomendable contrastar siempre si se puede asumir o no una distribución normal. La simple exploración visual de los datos puede sugerir la forma de su distribución. No obstante, existen otras medidas, gráficos de normalidad y contrastes de hipótesis que pueden ayudarnos a decidir, de un modo más riguroso, si la muestra de la que se dispone procede o no de una distribución normal. Cuando los datos no sean normales, podremos o bien transformarlos o emplear otros métodos estadísticos que no exijan este tipo de restricciones, los llamados métodos no paramétricos.

4.1.1 Distribución gaussiana

A continuación se describirá la distribución gaussiana o normal, su ecuación matemática y sus propiedades más relevantes.

La distribución normal fue reconocida por primera vez por el francés Abraham de Moivre (1667-1754). Posteriormente, Carl Friedrich Gauss (1777-1855) elaboró desarrollos más profundos y formuló la ecuación de la curva; de ahí que también se le conozca más comúnmente, como la "campana de Gauss". La distribución de una variable normal está completamente determinada por dos parámetros, su media y su desviación estándar, denotadas generalmente por μ y σ donde:

μ : es el valor medio de la distribución y es precisamente donde se sitúa el centro de la curva (campana de Gauss).

σ : es la denominada desviación estándar y σ^2 es la varianza que indica si los valores están más o menos alejados del valor central: si la varianza es baja los valores están próximos a la media; si es alta, entonces los valores están muy alejados de ella.

Esta distribución de caracteriza porque los valores se distribuyen formando una campana de Gauss, en torno a un valor central que coincide con el valor medio μ de la distribución.

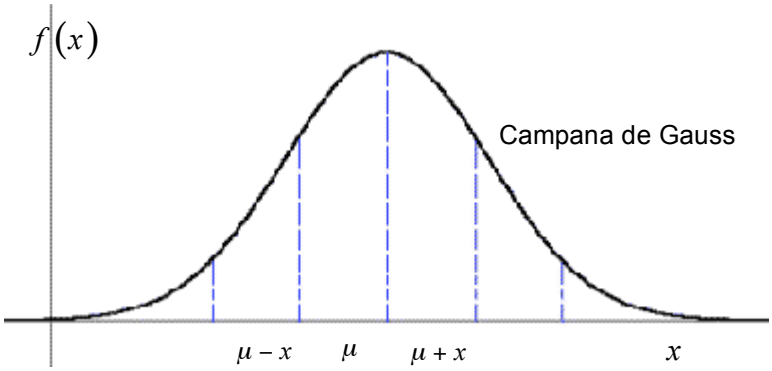


Figura 4.1 Distribución normal [43].

La mitad de los valores están a la derecha de este valor central y la otra mitad a la izquierda.
Un conjunto de variables sigue una distribución normal de media μ y varianza σ^2, y se denota como $X \approx N(\mu, \sigma)$, si su función de densidad viene dada por la ecuación 4.1 que determina la curva en forma de campana.

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left\{\frac{-1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2\right\}; \quad -\infty < x < \infty \quad \text{.....(4.1)}$$

En la figura 4.2, en el eje horizontal se levantan perpendiculares en dos puntos a y b, el área bajo la curva delimitada por esas líneas indica la probabilidad de que la variable de interés, X, tome un valor cualquiera en ese intervalo. Puesto que la curva alcanza su mayor altura en torno a la media, mientras que sus "ramas" se extienden asintóticamente hacia los ejes, cuando una variable siga una distribución normal, será mucho más probable observar un dato cercano al valor medio que uno que se encuentre muy alejado de éste.

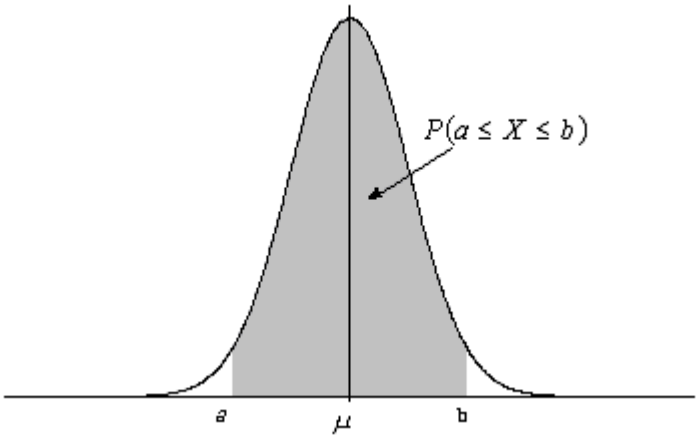


Figura 4.2 Gráfica de una distribución normal y significado del área bajo la curva [44].

Propiedades de la distribución gaussiana

La distribución gaussiana posee ciertas propiedades importantes que conviene destacar:

i. Tiene una única moda, que coincide con su media y su mediana.

ii. La curva normal es asintótica al eje de abscisas. Por ello, cualquier valor entre $-\infty$ y ∞ es teóricamente posible. El área total bajo la curva es, por tanto, igual a 1.

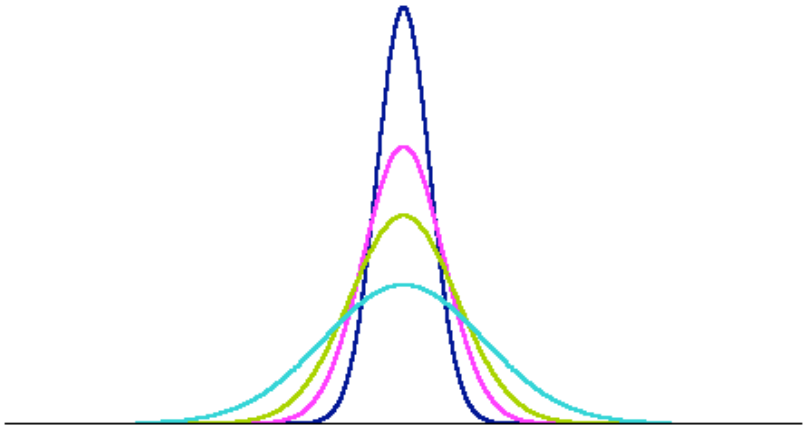
iii. Es simétrica con respecto a su media μ. Para este tipo de variables existe una probabilidad de un 50% de observar un dato mayor que la media, y un 50% de observar un dato menor.

iv. La distancia entre la línea trazada en la media y el punto de inflexión de la curva es igual a una desviación típica (σ). Cuanto mayor sea σ, más aplanada será la curva de la densidad.

v. El área bajo la curva comprendida entre los valores situados aproximadamente a dos desviaciones estándar de la media es igual a 0.95. En concreto, existe un 95% de posibilidades de observar un valor comprendido en el intervalo $(\mu - 1.96\sigma, \mu + 1.96\sigma)$.

vi. La forma de la campana de Gauss depende de los parámetros μ y σ (figura 4.3). La media indica la posición de la campana, de modo que para diferentes valores de μ la gráfica es desplazada a lo largo del eje horizontal. Por otra parte, la desviación estándar determina el grado de apuntamiento de la curva. Cuanto mayor sea el valor de σ, más se dispersarán los datos en torno a la media y la curva será más plana. Un valor pequeño de este parámetro indica, por tanto, una gran probabilidad de obtener datos cercanos al valor medio de la distribución.

(a) Distribuciones normales con diferente desviación estándar e igual media.



(b) Distribuciones normales con diferentes medias e igual desviación estándar.

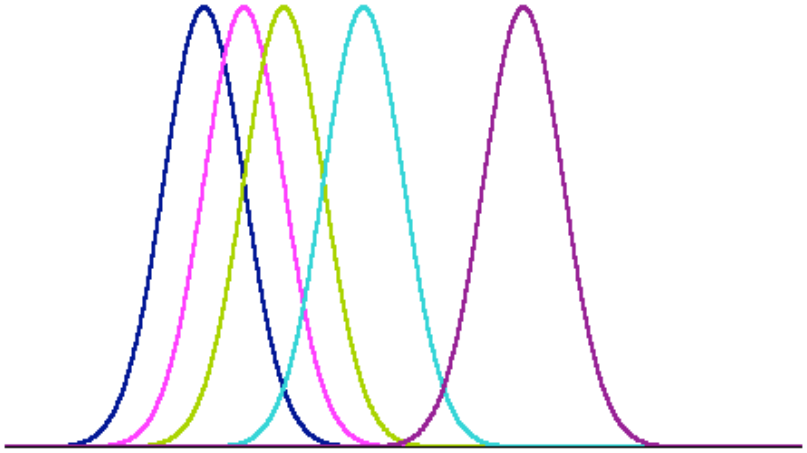


Figura 4.3 Ejemplos de distribuciones normales con diferentes parámetros [44].

Como se deduce de lo anterior, no existe una única distribución normal, sino una familia de distribuciones con una forma común, diferenciadas por los valores de su media y su varianza. De todas las distribuciones, la más utilizada es la distribución normal estándar, que corresponde a una distribución de media 0 y varianza 1, así, la expresión que define su densidad se puede obtener de la ecuación 4.1, resultando:

$$f(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(\frac{-z^2}{2}\right); \quad -\infty < z < \infty \qquad \text{.....(4.2)}$$

Es importante conocer que, a partir de cualquier variable X que siga una distribución $N(\mu, \sigma)$, se puede obtener otra característica Z con una distribución normal estándar, sin más que efectuar la transformación:

$$Z = \frac{X - \mu}{\sigma} \qquad \text{.....(4.3)}$$

Esta propiedad resulta especialmente interesante en la práctica, ya que para una distribución $N(0,1)$ existen tablas publicadas a partir de las que se puede obtener de modo sencillo la probabilidad de observar un dato menor o igual a un cierto valor Z, y que permitirán resolver preguntas de probabilidad acerca del comportamiento de variables de las que se sabe o se asume que siguen una distribución aproximadamente normal.

4.1.2 Teorema del Límite Central

Este teorema explica la relación que existe entre diversas distribuciones de probabilidad y la normal, especificando las condiciones bajo las cuales puede esperarse que una variable aleatoria tenga distribución normal.

Si sumamos variables aleatorias del mismo tipo, y el número de términos de la suma es suficientemente grande, el resultado que se obtiene es una variable con distribución normal.

Sean X_i con $i = 1...n$ variables aleatorias independientes todas con la misma distribución de probabilidad, de media μ y varianza finita σ^2. El teorema del límite central nos dice que la variable aleatoria $S_n = X_1 + ... + X_n$, construida como la suma de las anteriores se distribuye de forma gaussiana independientemente de la distribución de las variables X_i, entonces:

$$\lim_{n\to\infty} P\left(\frac{S_n - n\mu}{\sigma\sqrt{n}} \le x\right) = \phi(x) \quad \text{.....(4.4)}$$

Donde $\phi(x)$ es la probabilidad de que una variable aleatoria normal (0, 1) sea menor que x.

En la práctica, si todas las variables que sumamos tienen la misma distribución, no es necesario que n sea demasiado grande para que se verifique la normalidad de la suma.

Una aplicación inmediata de este teorema es la interpretación de la media aritmética: para calcular un promedio, sumamos variables que provienen de la misma población, y por lo tanto tienen igual distribución, así pues, la media obtenida va a tener distribución normal, aún para valores bajos de n.

Otro aspecto importante del teorema es que no es estrictamente necesario que todas las variables tengan la misma distribución. Basta con que sean independientes, y tengan esperanza y varianza finitas, para que si n es lo suficientemente grande, el resultado de la suma tenga aproximadamente una distribución normal.

4.2 Procesos estocásticos

Un proceso estocástico se define como un conjunto de variables aleatorias $\{X_t\}$, donde el subíndice t toma valores de un conjunto T dado. Con frecuencia T se toma como el conjunto de enteros no negativos y es llamado el "índice" del proceso, X representa una característica de interés que se puede medir en el tiempo t. El índice t es con frecuencia interpretado como tiempo, pero puede referirse a cualquier otra cosa.

Si T es contable se tiene un proceso discreto en el tiempo, y por lo general se usará la siguiente notación, reemplazando el subíndice t por n: $\{X_n,\ n = 0, 1, ...\}$.

Si T es un intervalo, se trata de un proceso estocástico continuo en el tiempo y se denota por: $\{X_t,\ t \ge 0\}$.

En resumen, un proceso estocástico es una familia de variables aleatorias que describe la evolución de un proceso físico a través del tiempo. Para describirlo, bastaría con conocer la distribución conjunta de dichas variables aleatorias.

Para conocer el comportamiento de un proceso estocástico, es suficiente conocer la distribución conjunta de probabilidad $P(X_1, X_2, ... X_n)$.

Considerando un proceso estocástico de parámetro discreto $n = 0,1,2,...,n$ y el conjunto de variables aleatorias $X_0, X_1,...,X_n$. Su comportamiento puede describirse mediante la función de probabilidad conjunta. Para ello considere la siguiente probabilidad:

$$P = P\left(X_n = i_n,\ X_{n-1} = i_{n-1},\ ...\ , X_1 = i_1,\ X_0 = i_0\right)$$

Usando la fórmula de probabilidad condicional $P\left(AB\right) = P\left(A\middle|B\right)P\left(B\right)$ en forma iterativa la probabilidad conjunta anterior puede escribirse como:

$$P = P\left(X_n = i_n \middle| X_{n-1} = i_{n-1},\ ...\ , X_1 = i_1,\ X_0 = i_0\right) P\left(X_{n-1} = i_{n-1} \middle| X_{n-2} = i_{n-2},...,X_1 = i_1,\ X_0 = i_0\right)$$
$$...\ P\left(X_2 = i_2 \middle| X_1 = i_1,\ X_0 = i_0\right)\ P\left(X_1 = i_1 \middle| X_0 = i_0\right)\ P\left(X_0 = i_0\right)$$

De lo anterior, se observa que la probabilidad conjunta puede expresarse en términos de las probabilidades condicionales, condicionando el resultado en el tiempo n a los resultados obtenidos en los tiempos $n-1,\ n-2,...,1$ y el estado inicial, luego el resultado en el tiempo $n-1$ se condiciona a los resultados obtenidos en los tiempos $n-2,...1$ y el estado inicial, y así sucesivamente hasta condicionar el resultado en el tiempo 1 al estado inicial.

Caso Markoviano

Suponga que la probabilidad condicional en el tiempo n, dados los períodos $n-1,\ n-2,...,1$ y 0 se puede expresar de la siguiente manera:

$$P\left(X_n = i_n \middle| X_{n-1} = i_{n-1}, X_{n-2} = i_{n-2}\ ..., X_1 = i_1,\ X_0 = i_0\right) = P\left(X_n = i_n \middle| X_{n-1} = i_{n-1}\right)$$

Es decir, el estado futuro del proceso X_n depende solo del estado presente X_{n-1} y es independiente de los estados pasados $\left(X_{n-2}, X_{n-3},..., X_1, X_0\right)$. En este caso se dice que el proceso tiene la "propiedad Markoviana", o tiene pérdida de memoria, es decir, el futuro depende únicamente del presente y es independiente del pasado. A la probabilidad condicional $P\left(X_n = i_n \middle| X_{n-1} = i_{n-1}\right)$ se le denomina "probabilidad de transición" del estado X_{n-1} al estado X_n en un período.

La probabilidad conjunta se expresa entonces como:

$$P\left(X_n = i_n, X_{n-1} = i_{n-1},..., X_1 = i_1, X_0 = i_0\right) =$$
$$P\left(X_n = i_n \middle| X_{n-1} = i_{n-1}\right)P\left(X_{n-1} = i_{n-1} \middle| X_{n-2} = i_{n-2}\right)..P\left(X_2 = i_2 \middle| X_1 = i_1\right)P\left(X_1 = i_1 \middle| X_0 = i_0\right)P\left(X_0 = i_0\right)$$

4.2.1 Campos de Markov

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

La teoría de los Campos Aleatorios de Markov (CAM) proporciona una manera conveniente y constante de modelar entidades dependientes del contexto tales como pixels de la imagen y otras características espaciales correlacionadas. 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.

El uso práctico de los modelos de Campos Aleatorios de Markov se atribuye en gran parte a la equivalencia entre las distribuciones de probabilidad de los Campos Aleatorios de Markov y de Gibbs establecidas por el teorema de Hammersley y Clifford y posteriormente desarrolladas por Besag.

La segmentación de imágenes es un proceso que divide una escena en un conjunto de regiones disjuntas basándose en características similares como intensidad, color o textura y es uno de los elementos más importantes de cualquier sistema automatizado de visión; es el primer nivel de la tarea de entendimiento de la imagen y afecta severamente al proceso posterior de interpretación de la imagen, proporcionando estructuras útiles tales como regiones y bordes.

En una imagen el conjunto de posiciones donde se define el campo va a denominarse malla o rejilla y se va a denotar por el conjunto S. En la textura el conjunto S representa el conjunto de pixels en una estructura matricial (2D), como puede verse en la figura 4.4(a). En el contorno el conjunto S representa cada uno de los radios trazados desde el centro en una estructura lineal (1D), como puede verse en la figura 4.4(b).

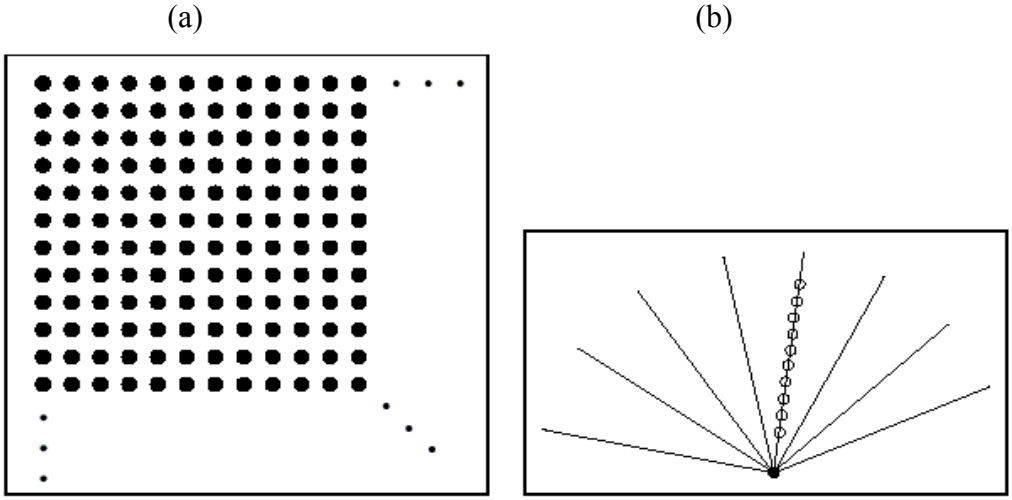


Figura 4.4 Ejemplo de rejilla para (a) textura y (b) contorno [69].

Para cada posición s se va a definir un espacio de estados. Para la textura, s es un pixel y el espacio de estados para cada pixel corresponde a los niveles de gris. Para el contorno, s es un radio y el espacio de estados para cada radio corresponde a cada uno de los puntos del radio por donde puede pasar el contorno. En la figura 4.4(b), éstos corresponden a los círculos blancos a lo largo del radio.

Si todos los pixels tienen el mismo rango de niveles de gris para el caso de la textura y el mismo rango de posiciones para todos los radios en el caso del contorno, se dice que el espacio es homogéneo.

La segmentación de imágenes puede considerarse como un problema de etiquetado con un conjunto de estados homogéneo y un conjunto de etiquetas discreto en el que la solución al problema es el conjunto de etiquetas asignado a los pixels de la imagen y por tanto, se le puede aplicar toda la teoría de los modelos de CAM para caracterizar el problema y encontrar la solución óptima.

Sea S un conjunto discreto con m estados:

$$S = \{1, 2, ..., m\}$$

Un estado puede representar un pixel o una región de una imagen y el conjunto de estados puede ser clasificado en términos de su homogeneidad. Podemos denotar por

$$S = \{(i, j) | 1 \le i, j \le n\}$$

al conjunto de localizaciones de los pixels de una imagen 2D de tamaño $n x n$. La relación entre los distintos pixels esta descrita en el tema 4.2.3.

Sea L el conjunto de etiquetas ya sea un conjunto discreto o continuo. En el caso continuo, el conjunto de etiquetas puede corresponder a $\Re$ (conjunto de números reales) o a un intervalo determinado de $\Re$,

$$L_c = [x_1, x_h] \subset \Re$$

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

$$L_d = \{l_1, ..., l_M\} = \{1, ..., M\}$$

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 $\Re$. pueden ser ordenados en relación a "ser más pequeño que". En un conjunto discreto como, por ejemplo, la intensidad del tono de gris {0,1,...,255}, podemos ordenar los elementos según los valores de la intensidad 0 < 1 <...< 255.

En un conjunto de etiquetas ordenado, podemos definir una medida numérica (cuantitativa) de semejanza entre dos de ellas. Para un conjunto de etiquetas sin relación de orden, la medida de semejanza es simbólica (cualitativa), normalmente tomando un valor *igual* o *no igual*.

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

El etiquetado se representa por:

$$f = \{f_1, ..., f_m\}$$

donde a cada estado de S se la ha asignado una de las etiquetas de L por medio de una función de mapeo:

$$f : S \rightarrow L$$

En terminología de Campos Aleatorios de Markov, el etiquetado se denomina configuración y ésta puede corresponder a una imagen. Cuando todos los estados tienen el mismo conjunto de etiquetas L, el conjunto de todas las configuraciones posibles, es el producto cartesiano:

$$\Im = L \times L \times L \times \ldots \times L = L^m$$

donde m es el número total de pixels.

En términos de homogeneidad y de continuidad, podemos clasificar un problema de etiquetado en visión dentro de una de las cuatro 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 procesado de bajo nivel realizado sobre 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 corresponde a los pixels 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 pixel de la imagen resultante aquí asume un valor discreto y, por tanto, L es conjunto discreto de etiquetas.

En la segmentación de imágenes que es un ejemplo de 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. La propiedad puede ser, por ejemplo, un tono de gris, un color o una textura. Los pixels dentro de cada región tienen asignadas una etiqueta única.

La detección de bordes es también un PE2. A cada pixel se le asigna una etiqueta entre {borde, no borde} si existen diferencias significativas entre las propiedades del par de pixels vecinos.

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 con significado perceptual.

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 las características de la imagen, llegando a aquellos del objeto modelo.

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, afín o en perspectiva).

Para un problema de etiquetado discreto con m estados y M etiquetas existen M^m configuraciones posibles. Para un problema de etiquetado continuo, el número de configuraciones posibles es infinito. Sin embargo, entre todas las posibilidades, solamente algunas son óptimas en términos de algún criterio que mida el costo de las soluciones.

4.2.2 Vecindades

Los Campos Aleatorios de Markov nos permiten describir las relaciones entre pixels de una imagen para establecer posteriormente algunas funciones de probabilidad.

En el ejemplo de la textura, sería la probabilidad de que una subimagen de la textura tome un cierto valor, condicionada al resto de la textura. En el caso del contorno, sería la probabilidad de que una porción del contorno tome un cierto valor, condicionada al resto del mismo. Esto quiere decir que en una textura un pixel va a depender de los pixels cercanos y que en un contorno el valor de éste en un radio va a depender del valor del contorno en los radios cercanos.

Por esta razón vamos a definir para cada pixel s que pertenece a S, un subconjunto de S que corresponde a los pixels de los que s depende y que llamaremos sistema de vecinos o vecindario de la rejilla S.

$$N = \left\{ N_i \,\middle|\, \forall\, i \in S \right\}$$

Un sistema de vecinos debe cumplir con dos propiedades:

1. $i \notin N_i$ que un pixel no sea vecino a sí mismo
2. $i \in N_j \Leftrightarrow j \in N_i$ que si i es vecino de j, éste último lo sea del primero

En general, los sistemas de vecinos son homogéneos. Esto quiere decir que sabiendo los vecinos de un pixel s, se puede saber cuáles son los vecinos de otro pixel t. sólo desplazando a t el sistema de vecinos de s. Se puede decir que son invariantes en el espacio. Los sistemas de vecinos pueden ser también isótropos, esto quiere decir que se comportan de la misma forma en todas las direcciones (son invariantes a rotaciones en las direcciones principales de la rejilla).

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

$$N_i = \left\{ j \in S \,\middle|\, \left[dist\left(pixel_j, pixel_i\right) \right]^2 \le r,\ j \neq i \right\}$$

donde $dist\left(pixel_j, pixel_i\right)$ denota la distancia euclídea entre $pixel_j$ y $pixel_i$, y r es un número entero que puede tomar valores de {1,2,4,5,8,9, ...}.

En la figura 4.5 podemos ver vecindarios de los órdenes más comunes: 1, 2, 4, 5 y 8, para el caso de la textura. El punto negro representa el pixel s y el punto blanco cada uno de los pixels t vecinos de s. Puesto que la imagen definida en la rejilla S tiene dimensiones finitas, los vecindarios de los pixels cerca

del borde de la imagen no pueden ser iguales que los vecindarios de los pixels interiores. El concepto de homogeneidad no se puede cumplir para los pixels de borde; sin embargo, esto siempre va a ocurrir y se va a seguir diciendo que el vecindario es homogéneo suponiendo implícitamente el efecto de bordes.

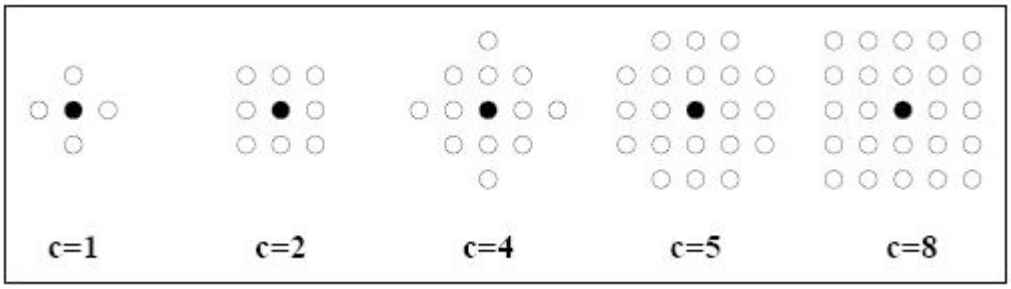


Figura 4.5 Vecindarios de órdenes 1,2,3,4,5 y 8 para el modelo de textura [69].

En el caso del modelo de contorno, si s y t son radios tales que t pertenece al sistema de vecinos de s, se define el orden del vecindario (para el caso homogéneo e isótropo) como el menor entero que cumpla:

$$c \geq |s-t|$$

para todos los vecinos t de s. En la figura 4.6 podemos ver vecindarios de los órdenes más comunes: 1, 2 y 3, para el caso del contorno. Se ha representado cada radio mediante un punto. Puesto que el contorno es cerrado, no tenemos problemas con los bordes y podemos tener un vecindario homogéneo en sentido estricto que cumpla que el sistema de vecinos de s sea un subconjunto de S para cualquier pixel que pertenezca a S.

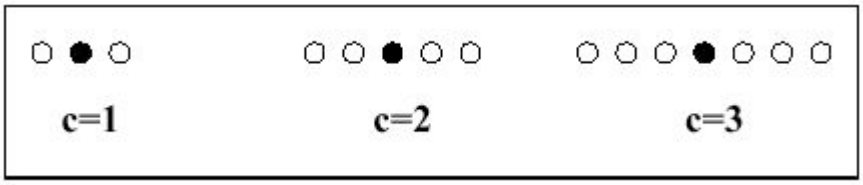


Figura 4.6 Vecindarios de órdenes 1, 2 y 3 para el modelo de contorno [69].

En el sistema de vecinos de primer orden, llamado sistema de 4-vecinos, cada pixel (interior), tiene cuatro pixels vecinos, según lo mostrado en la figura 4.7, donde x denota al pixel considerado y *a* a sus vecinos.

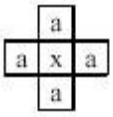


Figura 4.7 Sistema de 4 vecinos [69].

En el sistema de vecinos de segundo orden, también llamado sistema de 8-vecinos, hay ocho vecinos para cada pixel (interior), según lo mostrado en la figura 4.8.

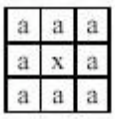


Figura 4.8 Sistema de 8 vecinos [69].

Los números $n = 1,...,5$ mostrados en la figura 4.9 indican los pixels vecinos exteriores en el sistema de vecinos de orden $n-$ésimo.

5	4	3	4	5
4	2	1	2	4
3	1	x	1	3
4	2	1	2	4
5	4	3	4	5

Figura 4.9 Sistema de vecinos de orden n-ésimo [69].

El concepto de *conexidad* constituye una relación de vecindad espacial entre un pixel y sus vecinos próximos.

- Se dice que dos pixels t y s tienen 4-*conexidad* si *t* pertenece al sistema de vecinos de s, (N_s).
- Se dice que dos pixels t y s tienen 8-*conexidad* si *t* pertenece al sistema de vecinos de s (N_s).

Cuando se ha especificado un orden entre los elementos de S, el conjunto de vecinos se puede determinar más explícitamente. Por ejemplo, sea $S = \{1, 2, ..., m\}$ un conjunto ordenado de estados cuyos elementos son los índices de los pixels de una imagen 1D, entonces un estado interior $i \in \{2, ..., m-1\}$ 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 $S = \{(i, j) \mid 1 \le i, j \le n\}$ corresponde a los pixels 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.

4.2.3 Cliques

Dado un sistema de vecinos en S, se dice que un subconjunto $C \subset S$ es un clique, si dos elementos cualesquiera de C diferentes entre sí son vecinos.
Denotamos el conjunto de cliques de un solo elemento, el conjunto de cliques de dos elementos,..., por C_1, C_2, respectivamente, donde

$$C_1 = \{s \mid s \in S\}$$
$$C_2 = \{\{s, t\} \mid t \in N_s \;\; s \in S\}$$
$$C_3 = \{\{s, t, r\} \mid s, t, r \in S \text{ son vecinos dos a dos}\}$$

El conjunto de todas las cliques de S será entonces $C = C_1 \cup C_2 \cup ...$
En el caso de vecindarios homogéneos los cliques se van a poder clasificar en tipos, según la relación espacial entre los elementos que lo forman. El tipo de clique de una rejilla regular, viene determinado por su tamaño, dimensión y orientación.

Las figuras 4.10 y 4.11 representan los tipos de cliques que se definen a partir de los vecindarios de órdenes uno y dos, respectivamente, a partir del modelo de textura.

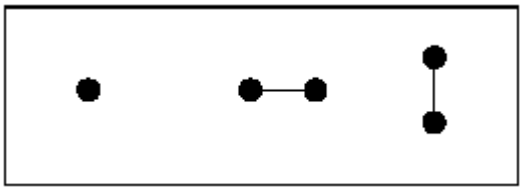


Figura 4.10 Tipos de cliques para el vecindario de orden 1 en el modelo de textura [69].

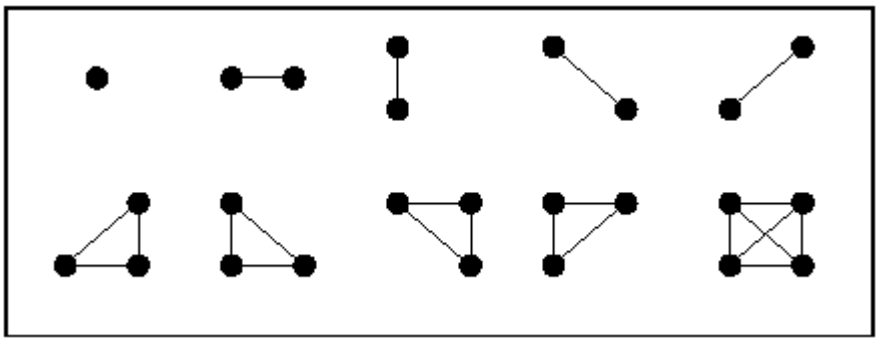


Figura 4.11 Tipos de cliques para el vecindario de orden 2 en el modelo de textura [69].

Los cliques de dos elementos para el vecindario de orden cinco se pueden ver en la figura 4.12. En esta figura el círculo negro representa un elemento que pertenece al clique y el círculo blanco un elemento que no pertenece al clique. Los cliques de dos elementos se denominan “cliques de pares”.

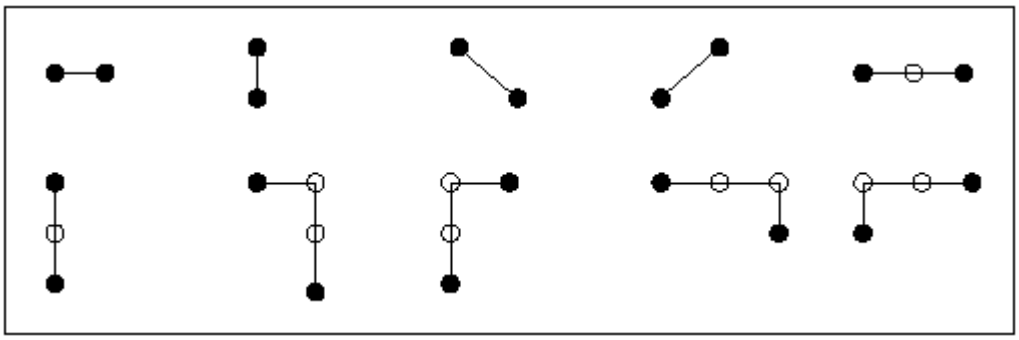


Figura 4.12 Tipos de cliques de pares para el vecindario de orden 5 en el modelo de textura [69].

Con respecto al modelo de contorno, en la figura 4.13 podemos ver los tipos de cliques para el vecindario de orden uno y en la figura 4.14 para el de orden dos.

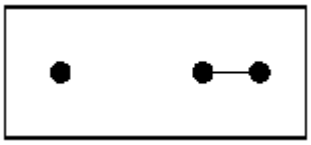


Figura 4.13 Tipos de cliques para el vecindario de orden 1 en el modelo de contorno [69].

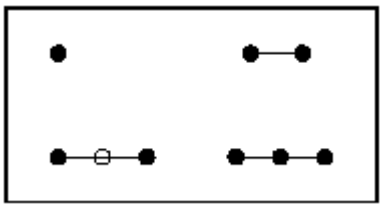


Figura 4.14 Tipos de cliques para el vecindario de orden 2 en el modelo de contorno [69].

A medida que aumenta el orden del sistema de vecinos, el número de cliques crece rápidamente y también el coste computacional asociado.

4.2.4 Propiedades de Markov

Un Campo Aleatorio de Markov se define como una colección de variables aleatorias, que corresponden a los pixels de una rejilla, cuya distribución de probabilidad es tal que la probabilidad condicional de que una variable tenga un valor particular, dado los valores del resto de las variables, es idéntica a la probabilidad condicional dados los valores del campo en un conjunto pequeño de pixels, que son los vecinos de ese pixel determinado.

Sea $F = \{F_1,...,F_m\}$ una familia de variables aleatorias definidas en S, donde cada variable aleatoria F_i toma un valor de f_i en L. Llamaremos *Campo Aleatorio* a la familia de variables aleatorias F. Llamaremos *configuración* del suceso conjunto F a $f = \{f_1,...,f_m\}$.

Para un conjunto discreto de etiquetas L, denotamos por $P(F_i=f_i)=P(f_i)$ a la probabilidad de que la variable aleatoria F_i tome el valor f_i, y denotamos la probabilidad conjunta por:

$$P(F=f)=P(F_1=f_1,...,F_m=f_m)=P(f)$$

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.

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. $P(F=f)>0 \qquad \forall\ f \in \Im$
2. $P(F_i=f_i \mid F_j=f_j, j\in d,\ j\neq i)=P(F_i=f_i \mid F_j=f_j, j\in N_i)$ (Propiedad Markoviana)

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 locales. Cualquier F cumpliendo estas condiciones es un Campo Aleatorio de Markov con respecto a tal sistema de vecinos.

Un Campo Aleatorio de Markov se caracteriza por sus propiedades locales (propiedad Markoviana) mientras que un Campo Aleatorio de Gibbs se caracteriza por sus propiedades globales (la distribución de probabilidad de Gibbs). El teorema de Hammersley-Clifford establece la equivalencia entre estos dos tipos de características.

F es un Campo Aleatorio de Markov en S con respecto a N si y sólo si F es un Campo Aleatorio de Gibbs en S con respecto a N.

Una distribución de Gibbs tiene la siguiente función de densidad:

$$P(f) = \frac{1}{Z} \exp\left(-\frac{U(f)}{T}\right) \quad \text{.....(4.5)}$$

donde

$$Z = \sum_{f \in S} e^{-\frac{1}{T}U(f)}$$

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

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

$$U(f) = \sum_{c} V_c(f) \quad \text{.....(4.6)}$$

y $V_c(f)$ es el potencial de clique.

$U(f)$ es la suma de las funciones cliques potenciales, $V_c(f)$, para todos las cliques posibles *C,* donde el valor de $V_c(f)$ depende de la configuración local de la clique c. La distribución gaussiana es un caso especial de la familia de distribuciones de Gibbs.

Un Campo Aleatorio de Gibbs es homogéneo si $V_c(f)$ es independiente de la posición relativa de la clique c en S. Es más simple especificar una 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 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. 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.

4.2.5 Teorema de Bayes y aproximación máximo *a posteriori*

A menudo nos surgen problemas en los cuales estamos interesados en determinar la mejor hipótesis h, dados los datos que hemos observado D. Una forma más correcta de expresar esto es decir que buscamos la hipótesis h más probable, dados los datos observados D más un conocimiento inicial sobre las probabilidades a priori de h. El teorema de Bayes nos proporciona un método directo para calcular estas probabilidades.

Sea δ un espacio muestral que está formado por los eventos $w_1, w_2, w_3, \ldots w_n$ mutuamente excluyentes, entonces, $\delta = w_1 \cup w_2 \cup w_3 \cup \ldots \cup w_n$

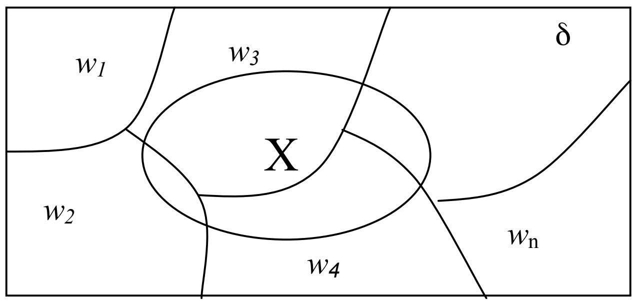


Figura 4.15 Teorema de Bayes [52].

Luego si ocurre un evento X definido en δ, observamos que;

$$X = \delta \cap X = (w_1 \cup w_2 \cup w_3 \cup \ldots \cup w_n) \cap X = (w_1 \cap X) \cup (w_2 \cap X) \cup (w_3 \cap X) \cup \ldots \cup (w_n \cap X)$$

Donde cada uno de los eventos $w_i \cap X$ son eventos mutuamente excluyentes, es decir $w_i \cap X = 0$, entonces,

$$p(X) = p(w_1 \cap X) + p(w_2 \cap X) + p(w_3 \cap X) + \ldots + p(w_n \cap X)$$

y como la $p(w_i \cap X) = p(w_i)\,p(X|w_i)$, o sea que la probabilidad de que ocurra el evento w_i y el evento X es igual al teorema de la multiplicación para probabilidad condicional, entonces,

$$p(X) = p(w_1)p(X|w_1) + p(w_2)p(X|w_2) + p(w_3)p(X|w_3) + \ldots + p(w_n)p(X|w_n)$$

Si deseamos calcular la probabilidad de que ocurra un evento w_i dado que X ya ocurrió, entonces:

$$p(w_i|X) = \frac{p(w_i \cap X)}{p(X)} = \frac{p(w_i)p(X|w_i)}{p(w_1)p(X|w_1) + p(w_2)p(X|w_2) + \ldots + p(w_n)p(X|w_n)}$$

La expresión anterior es el teorema de Bayes, que puede expresarse de una forma más simple como:

$$p(w_i|X) = \frac{p(w_i)p(X|w_i)}{p(X)} \qquad (4.7)$$

$P(w_i)$ es el conocimiento inicial que tenemos sobre el evento w_i, se le suele denominar la probabilidad a priori de w_i. $P(X)$ se define de forma similar, pero esta vez sobre los datos X. $P(X|w_i)$ denota la probabilidad de observar los datos X dado que ocurrió el evento w_i. Se le suele denominar verosimilitud. Por último, $P(w_i|X)$ es la probabilidad a posteriori que tiene el evento w_i, dados los datos observados X.

En la mayoría de problemas donde se plantea la inferencia bayesiana, se parte de un conjunto de hipótesis H y se trata de encontrar la hipótesis más probable $h \in H$. De esta forma, a esta hipótesis más probable se le suele denominar hipótesis maximum a posteriori o MAP. Utilizando el teorema de Bayes, diremos que h_{MAP} es una hipótesis MAP de acuerdo a:

$$h_{MAP} \equiv \arg\max_{h \in H} P(w_i|X) = \arg\max_{h \in H} \frac{P(X|w_i)P(w_i)}{P(X)} = \arg\max_{h \in H} P(X|w_i)P(w_i)$$

En el último paso hemos eliminado $P(X)$ porque es independiente de w_i.

En algunos casos todas las probabilidades en H son igualmente probables a priori $\left(P(h_i) = P(h_j), \forall\ h_i, h_j \in H\right)$. En este caso sólo utilizaríamos el término de verosimilitud, $P(D|h)$, y podemos simplificar aún más la ecuación anterior:

$$h_{ML} \equiv \arg\max_{h \in H} P(D|h)$$

donde a la hipótesis h_{ML} se le suele nombrar como hipótesis de máxima verosimilitud (Maximum Likelihood).

4.3 Modelos de Markov

En esta sección del capítulo, se presenta una introducción de los modelos más importantes de los Campos Aleatorios de Markov.

4.3.1 Modelo de Ising

Pese a que este modelo lleva el nombre de Ernst Ising, fue propuesto por primera vez en 1920 por W. Lenz, el supervisor de tesis de Ising. Éste se lo asignó en 1922, con el objetivo de estudiar el fenómeno del ferromagnetismo.

La importancia de este modelo se debe al hecho de que por mucho tiempo fue uno de los pocos modelos matemáticamente solubles que exhibían transiciones de fases. La solución exacta del modelo en dos dimensiones por Lars Onsager, en 1944, fue visto como un punto de especial importancia en la Mecánica Estadística. Actualmente el Modelo de Ising encuentra aplicación en un gran número de modelos, no sólo en el área del magnetismo y el estudio de los materiales, sino también en la microbiología y sociología, entre otras.

El modelo de Ising surge del problema de modelar materiales; en éste modelo se presenta un espín o un dipolo en una línea que puede tomar un valor de +1 o -1, es decir, orientado hacia arriba +1 o hacia abajo -1 y el estado de cada espín se ve influenciado por los espines cercanos.

Las restricciones de contexto entre dos etiquetas son un primer nivel que hay que tener en cuenta en la información del contexto. Dichas restricciones son muy utilizadas debido a su simplicidad y bajo coste computacional. Estas restricciones se codifican en la función de energía de Gibbs como funciones clique potenciales para cada par de pixels. Así pues, la función clique potencial queda definida por:

$$U(f) = \sum_{i \in S} V_1(f_i) + \sum_{i \in S} \sum_{j \in N_i} V_2(f_i, f_j) \quad \text{.....(4.8)}$$

la cual recibe el nombre de energía de segundo orden porque se calcula para cada clique formado por dos pixels. Si hacemos una selección apropiada de V_1 y V_2, podremos seleccionar un Campo Aleatorio de Gibbs o un Campo Aleatorio de Markov.

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 $G_i(\bullet)$ 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:

$$U(f) = \sum_{\{i\} \in C_1} f_i G_i(f_i) + \sum_{\{i,j\} \in C_2} \beta_{i,j} f_i f_j \quad \text{.....(4.9)}$$

A este modelo se le conoce con el nombre de "auto-modelo".

Si en un auto-modelo las F_i toman valores en el conjunto de etiquetas de tipo discreto $L = \{0,1\}$ o $L = \{+1,-1\}$, se dice entonces, que un auto-modelo es un modelo auto-logístico.

La correspondiente función de energía es de la forma:

$$U(f) = \sum_{\{i\} \in C_1} \alpha_i f_i + \sum_{\{i,j\} \in C_2} \beta_{i,j} f_i f_j \quad \text{.....(4.10)}$$

Donde $\beta_{i,j}$ es el coeficiente de interacción. Cuando el sistema de vecindad que se considera es de "4 vecinos", esto es, 4 vecinos en una rejilla de 2D o dos vecinos en una rejilla de 1D, entonces el modelo auto-logístico recibe el nombre de modelo de Ising. La probabilidad condicional para el modelo de Ising con $L = \{+1,-1\}$ es:

$$P(f_i \mid f_{N_i}) = \frac{e^{\alpha_i f_i + \sum_{j \in N_i} \beta_{i,j} f_i f_j}}{\sum_{f_i \in \{0,1\}} e^{\alpha_i f_i + \sum_{j \in N_i} \beta_{i,j} f_i f_j}} = \frac{e^{\alpha_i f_i + \sum_{j \in N_i} \beta_{i,j} f_i f_j}}{1 + e^{\alpha_i f_i + \sum_{j \in N_i} \beta_{i,j} f_i f_j}} \quad \text{.....(4.11)}$$

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

4.3.2 Modelo de Potts

El modelo de Potts también es conocido como modelo logístico multinivel (Multi-Level Logistic model) o modelo generalizado de Ising. Si hay M > 2 etiquetas discretas en el conjunto de etiquetas $L = \{1,..,M\}$ el potencial del *clique* depende del tipo c (tamaño, dimensión y orientación posible).

Para los *cliques* que contienen más de un pixel se definen las funciones de potencial para cada *clique*, las cuales son:

$$V_c(f_c) = \begin{cases} \varsigma_c & \text{Si todos los estados de } c \text{ tienen la misma etiqueta.} \\ -\varsigma_c & \text{En otro caso.} \end{cases}$$

Donde ς_c es el potencial para los cliques del tipo c, para los cliques de un solo pixel depende de la etiqueta asignada al pixel.

$$V_c(f) = V_c(f_i) = \alpha_1 \text{ si } f_i = I \in L_d$$

Donde α_1 es el potencial para la etiqueta I. La siguiente figura muestra los tipos de cliques y los parámetros asociados en sistemas de vecinos de segundo orden.

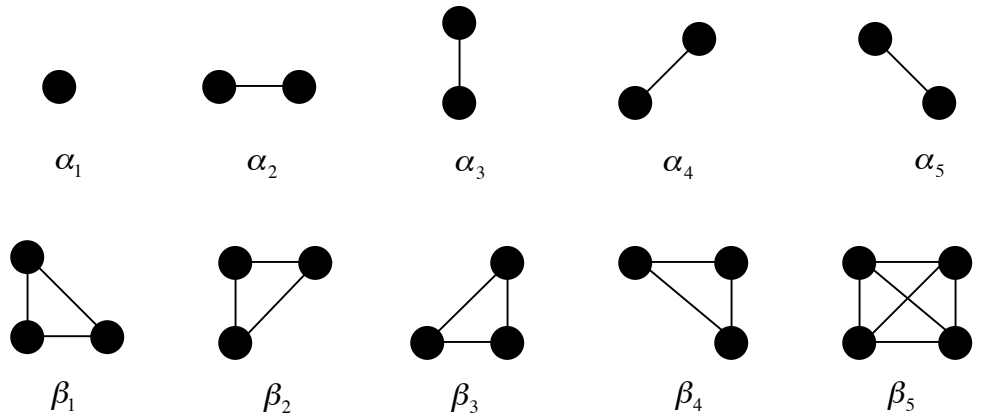


Figura 4.16 Tipos de cliques y parámetros potenciales asociados a una vecindad de segundo orden [68].

Se asume que un modelo MLL es de segundo orden, sí y sólo sí 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:

$$V_2(f_i, f_j) = \begin{cases} \beta_c & \text{Si los estados del } \textit{clique } \{i,j\} = c \in C_2 \text{ tienen la misma etiqueta.} \\ -\beta_c & \text{En otro caso.} \end{cases}$$

donde β_c es el parámetro β para los cliques de tipo c_1 y C_2 es el conjunto de cliques de dos estados. Para una vecindad de primer orden hay cuatro tipos de cliques de dos estados y cuatro diferentes β_c. Cuando el modelo es isotrópico los cuatros toman el mismo valor. Debido a su simplicidad, el modelo de Potts es usado extensamente para modelar regiones y texturas.

Cuando el modelo es isotrópico, la probabilidad condicional puede ser expresada como sigue:

$$P(f_i = I \mid f_{N_i}) = \frac{e^{-\alpha_I - \beta n_I(I)}}{\sum_{I=1}^{M} e^{-\alpha_I - \beta n_i(I)}} \quad \text{.....(4.12)}$$

donde $n_i(I)$ es el número de estados es N_i que tienen etiqueta I.

Para el caso particular en el que las etiquetas son $\{0,1\}$ se reduce al modelo de Ising.

4.4 Optimización

En general, para resolver el problema de segmentación bajo el esquema MAP-CAM, después de haber definido las funciones de potencial para los diferentes cliques, es necesario minimizar la función de energía *a posteriori.* La solución se encuentra en el espacio de configuraciones $\Im$, siendo un problema combinatorio, se utiliza un algoritmo de optimización como lo es el Recocido Simulado que encuentra una solución global.

4.4.1 Recocido Simulado

El algoritmo de Recocido Simulado se basa en una analogía entre la simulación del recocido de sólidos y la necesidad de resolver problemas de optimización combinatoria de gran escala, es por ello que al algoritmo se le conoce como "recocido simulado". El recocido denota un proceso de calentamiento de un sólido a una temperatura en la que sus granos deformados se recristalizan para producir nuevos granos. La temperatura del recocido o de recristalización, depende del tipo de material, del grado de deformación y del uso que se le vaya a dar. Después de la fase de calentamiento, viene un proceso de enfriamiento en donde la temperatura se baja poco a poco. De esta forma, cada vez que la temperatura disminuye, las partículas se reacomodan en estados de más baja energía hasta que se obtiene un sólido con partículas acomodadas conforme a una estructura de cristal.

Si se comienza con un valor máximo de temperatura, en la fase de enfriamiento del proceso de recocido, para cada valor de la temperatura T debe permitirse que se alcance su equilibrio térmico. Por otro lado, si el proceso de enfriamiento es demasiado rápido, y en cada etapa no se alcanza el equilibrio térmico, el sólido se congelará en un estado cuya estructura será amorfa en lugar de la estructura cristalina de más baja energía. Dicha estructura amorfa se caracteriza por una imperfecta cristalización del sólido.

El equilibrio térmico está caracterizado por la distribución de Boltzmann. De acuerdo a esta distribución, la probabilidad de que el sólido esté en un estado i con energía E_i a la temperatura T, viene dada por:

$$P_T\{X = i\} = \frac{1}{Z(T)} \exp\left(\frac{-E_i}{k_b T}\right) \quad \text{.....(4.13)}$$

donde X es una variable aleatoria que denota el estado actual del sólido.
$Z(T)$ es una constante de normalización llamada función partición, la cual se define como:

$$Z(T) = \sum_j \exp\left(-\frac{E_j}{k_b T}\right) \quad \text{.....(4.14)}$$

donde la sumatoria se extiende sobre todos los posibles estados y k_b es una constante física conocida como la constante de Boltzman. El factor $\left(\frac{-E_j}{k_B T}\right)$ se conoce como el factor de Boltzman. La ecuación $P_T\{X = i\} = \frac{1}{Z(T)}\exp(\frac{-E_i}{k_b T})$ es una función de densidad de probabilidad ya que siempre es mayor o igual a cero y la suma sobre todos los valores es igual a la unidad. De igual forma se puede observar que cuando el valor de T disminuye, la distibución de Boltzman se concentra en los estados de menor energía; por otro lado, si la temperatura se aproxima a cero, únicamente los estados con mínima energía tienen una probabilidad de ocurrencia diferente de cero.

El proceso de recocido consta de dos pasos fundamentales:

1.- Incrementar la temperatura a un valor máximo.

2.- Decrementar cuidadosamente la temperatura hasta que las partículas se reacomoden por sí mismas en un estado de mínima energía, a dicho estado se le conoce como estado fundamental del sólido.

El proceso físico del recocido puede moderarse exitosamente usando métodos de simulación. Dado un estado i del sólido con energía E_i, se genera un estado subsecuente j aplicando un mecanismo de perturbación que transforma el estado actual en el siguiente estado por medio de una pequeña distorsión, por ejemplo, por el desplazamiento de una partícula. La energía del siguiente estado es E_i. Si la diferencia de energía, $E_j - E_i$ es menor o igual a cero, el estado j se acepta como el estado actual. Si la diferencia de energía, es mayor que cero, el estado j se acepta con una probabilidad que está dada por

$$\exp\left(\frac{-E_i}{k_b T}\right) \quad \text{.....(4.15)}$$

donde T denota la temperatura del "baño" térmico y k_b es la constante de Boltzman. La regla de decisión descrita en la ecuación 4.15 se conoce como el criterio de Metrópolis y el algoritmo se le conoce como algoritmo de Metrópolis.

Si la temperatura se baja poco a poco, el sólido puede alcanzar su equilibrio térmico en cada temperatura.

La aplicación del recocido simulado en la optimización de la función de energía a posteriori $U(Y \mid X)$ asegura la convergencia hacia el mínimo global (punto C de la figura) y evita la convergencia a los mínimos locales (punto B). El cambio de clase del pixel analizado a la clase propuesta, es aceptado incondicionalmente sólo cuando $\Delta U < 0$ (punto A).

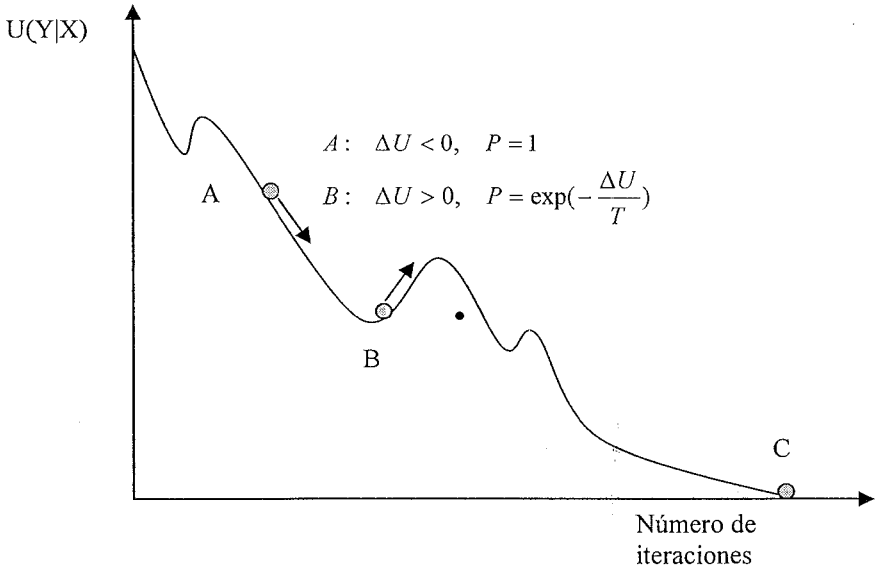


Figura 4.17 Optimización de la función energía *a posteriori.*

4.4.2 Esquemas de decremento de temperatura

Para minimizar la función de energía *a posteriori* es necesario decrementar la temperatura para cada configuración, ya que para temperaturas altas, las configuraciones más aleatorias están presentes. Para asegurar la convergencia a un mínimo global, el esquema de decremento de temperatura, debe seguir las siguientes condiciones:

$$\lim_{n\to\infty} T^{(n)} = 0 \qquad \text{.....(4.16)}$$

$$T^{(n)} \geq \frac{mx\Delta}{\ln(1+n)} \qquad \text{.....(4.17)}$$

Donde $\Delta = \max E(f) - \min E(f)$ y m es el número de pixels, entonces el sistema converge al mínimo global, la desventaja de la ecuación 4.17 es la lentitud, de manera heurística se han adoptado los siguientes esquemas:

1.- El primero, establece una velocidad de enfriamiento de la temperatura de tipo geométrico, $T^{(n+1)} = \alpha T^{(n)}$, como $0 < \alpha < 1$. Las evidencias empíricas señalan que valores elevados de α comprendidos entre 0.88 y 0.99 son los que mejores resultados proporcionaban.

2.- El segundo esquema de enfriamiento, ejecuta una sola iteración para cada temperatura, pero por el contrario, la temperatura se reduce a una velocidad muy lenta según la fórmula $T \rightarrow \frac{T}{1+\beta \cdot T}$, siendo β muy pequeño.

3.- Entre los esquemas de descenso de temperatura también se encuentran los de la forma $T^{(n)} = \frac{c}{\log(n+1)}$, donde n es el número de iteraciones.

4.5 Modelo gaussiano de energía

Al modelo gaussiano también se le conoce con el nombre de Campo Aleatorio de Markov Gaussiano. Si un modelo auto-modelo es un auto-modelo normal, se puede considerar que se trata de un modelo gaussiano si el conjunto de etiquetas L es $\Re$ y la distribución de probabilidad conjunta es una normal multivariante. La función de probabilidad condicional quedaría como:

$$P\left(f_i / f_{N_i}\right) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{1}{2\sigma^2}\left[f_i - \mu_i - \sum_{j \in N_i} \beta_{i,j}\left(f_j - \mu_j\right)\right]^2} \quad \text{.....(4.18)}$$

que es una distribución normal con media condicional

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

y varianza condicional

$$\text{var}\left(f_i / f_{N_i}\right) = \sigma^2$$

Este modelo contiene dos componentes. El primero es una dependencia de datos proporcionando información de la intensidad de la región. El segundo punto es la dependencia de los pixels vecinos al pixel central y a la continuidad espacial. De acuerdo con la definición de función potencial, es claro que si los pixels que pertenecen al tipo de región K en la vecindad son exactamente iguales, el segundo término en el modelo, tomará el mismo valor para todos los tipos de región. Esto no cambiará el orden relativo de los valores de la probabilidad y el atributo en el pixel bajo consideración podrá determinarse únicamente por el dato. En contraste, si los números son diferentes entre ellos, la probabilidad de que el valor corresponda al máximo de ellos será mayor y el pixel central probablemente será asignado a una región relacionada con dicho pixel. Si el valor del pixel es insignificante, en este caso en el que β es muy grande para la instancia, el atributo de dicho pixel será determinado principalmente por los atributos de sus vecinos. Así pues, el espacio contrario tomará efecto si y sólo si el número de pixels vecinos a la región de tipo K en la vecindad del pixel central difiere de otro y además el atributo del pixel en la imagen segmentada sea homogéneo con respecto a la mayoría de los vecinos.

5

ESQUEMA MULTIVENTANA DE SEGMENTACIÓN

5.1 Aproximación por campos aleatorios de Markov

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 pixels de la imagen. El etiquetado es una representación natural para el estudio de los Campos Aleatorios de Markov.

La segmentación de imágenes se considera un problema de etiquetado en donde tenemos un conjunto de pixels homogéneo y un conjunto de etiquetas (clases) y, por tanto, se le puede aplicar toda la teoría de los modelos de CAM para encontrar la mejor solución.

El problema de etiquetado consiste en asignar una etiqueta del conjunto de etiquetas L a cada pixel $i \in S$, donde S está formado por los pixels de la imagen.

El conjunto de etiquetas L puede ser un conjunto discreto o continuo y cada etiqueta representa una clase que se asignará a cada pixel de la imagen. En terminología de CAM llamaremos *configuración* al etiquetado.

Los pixels de S están relacionados mediante un sistema de vecindad, que es el conjunto de pixels vecinos a un pixel i. En el sistema de vecinos de primer orden, llamado sistema de 4-vecinos, cada pixel tiene cuatro vecinos y diremos que tienen 4-*conexidad* y en el sistema de vecinos de segundo orden, también llamado sistema de 8-vecinos tendrán 8-*conexidad* .



a) Sistema de vecinos de primer orden b) Sistema de vecinos de segundo orden

Figura 5.1 Sistemas de vecinos.

Una clique c para $\{S, N\}$ se define como un subconjunto de pixels de S donde todos los pixels son vecinos entre sí. Conforme el tamaño del sistema de vecinos crece, también crece el número de cliques.

Los cliques de dos pixels utilizados para el análisis fueron los de un sistema de vecindad de segundo orden que se muestran en la figura 5.2.

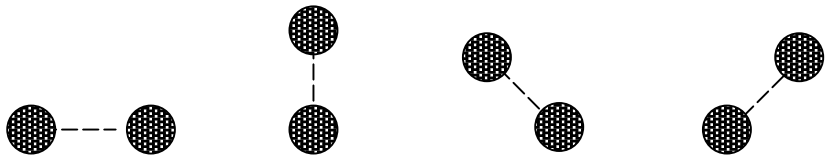


Figura 5.2 Cliques de dos pixels para una vecindad de segundo orden.

El análisis se realiza tomando el pixel central de una vecindad como el pixel de estudio, con respecto a cada uno de sus pixels vecinos.

Un Campo Aleatorio de Markov es un conjunto de variables aleatorias *F* , en el que la probabilidad condicional de un suceso local de una variable i, es equivalente a la probabilidad condicional de los sucesos vecinos de i, es decir, la probabilidad de que un pixel i tome un valor de nivel de gris f_i, dado los niveles de gris de los pixels restantes de la imagen $f_{S-\{i\}}$, es igual a la probabilidad de que el pixel i tome el nivel de gris f_i, dados los niveles de gris de sus vecinos N_i.

El modelo de Campo Aleatorio de Markov tiene otras características como homogeneidad e isotropía. Diremos que es homogéneo si $P(f_i \mid f_{N_i})$ se calcula sin importar la posición relativa del pixel i en S y es isotrópico si hay regiones independientes de la orientación del clique.

Un Campo Aleatorio de Markov se caracteriza por sus propiedades locales (propiedades Markovianas) mientras que un Campo Aleatorio de Gibbs se caracteriza por sus propiedades globales (la distribución de probabilidad de Gibbs). La equivalencia Markov-Gibbs, que nos permitirá representar un CAM a través de la distribución de probabilidad de Gibbs.

Una distribución de Gibbs tiene la siguiente función de probabilidad:

$$P(f) = \frac{1}{Z} \exp\left(-\frac{1}{T} U(f)\right) \quad \text{.....(5.1)}$$

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

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

$$U(f) = \sum_{c} V_c(f) \quad \text{.....(5.2)}$$

$P(f)$ es la probabilidad de ocurrencia de una configuración determinada y como se puede observar de la ecuación 5.1 las configuraciones más probables son aquellas con energías más bajas.

Para calcular la probabilidad conjunta de un Campo Aleatorio de Markov, que tiene una distribución de Gibbs, es necesario dar un valor a Z, T y $U(f)$. Dado que la suma es un número combinatorio de

configuraciones, el coste computacional es muy elevado, pero el cálculo se puede hacer mediante el estimador MAP basado en Campos Aleatorios de Markov.

Los modelos basados en Campos Aleatorios de Markov están formulados dentro del campo de trabajo Bayesiano y ofrecen la posibilidad de obtener la solución óptima de un problema mediante el estimador de probabilidad máxima a posteriori (MAP).

La mayoría de los problemas de visión pueden ser considerados como un problema de etiquetado usando restricciones, debido al conocimiento a priori y a las observaciones. En este caso, la solución óptima es definida por el etiquetado MAP y se calcula minimizando la energía a posteriori.

Por Bayes tenemos:

$$P(Y|X) = \frac{P(X|Y)P(Y)}{P(X)} \quad \text{.....(5.3)}$$

donde:

$P(Y|X)$: Probabilidad a *posteriori.*

$P(Y)$: Probabilidad a *priori* de la clase *Y.*

$P(X|Y)$: Probabilidad condicional de *X* dado *Y*.

$P(X)$: Probabilidad total de *X*.

Se considera que la $P(X)$ no presenta información importante y se hace la siguiente aproximación:

$$P(Y|X) \approx P(X|Y)P(Y) \quad \text{.....(5.4)}$$

$P(Y|X)$ representa un Campo Aleatorio de Markov que mediante la distribución de Gibbs queda expresado:

$$P(Y|X) = \frac{1}{Z}\exp\left(-U(Y|X)\right) \quad \text{.....(5.5)}$$

El método MAP consiste en encontrar la configuración y que maximiza la distribución *a posteriori* $P(Y|X)$, o bien minimiza una función equivalente de energía:

$$y = \arg max\ P(Y=y|X=x) = \arg min\ U(y|x)$$

Por tanto, por medio de la aproximación de la regla de Bayes en la ecuación 5.4, podemos calcular la energía *a posteriori* como:

$$U(Y|X) \approx U(X|Y) + U(Y) \quad \text{.....(5.6)}$$

Los campos de Markov se asocian a un método de optimización, el recocido simulado, el cual permite minimizar la función de energía de la distribución de Gibbs y obtener así la configuración de etiquetas MAP, asegurando la convergencia hacia un óptimo global del problema.

El recocido simulado es una técnica basada en el algoritmo de Metrópolis que se usa para encontrar el mínimo global de una función dada, llamada función objetivo o función de costo, sobre un espacio de configuraciones S. En esta técnica la elección de un nuevo elemento del entorno $N(s)$ se realiza aleatoriamente y si cae en un óptimo local, el recocido permite la aceptación de soluciones peores con una cierta probabilidad; esta probabilidad decrece conforme la solución se acerca al óptimo y es controlada por un parámetro denominado temperatura por analogía con el recocido de sólidos. El algoritmo general de recocido simulado es el siguiente.

Parámetros de entrada: Una imagen X, T_{inic}, y β

// T_{inic} es la temperatura inicial y β es el rango de convergencia

Repetir

  Repetir

    Seleccionar un pixel.

    Obtener una nueva configuración perturbando el valor de ese pixel aleatoriamente.

    Evaluar la probabilidad de toda la imagen, basándose en la función objetivo.

      Si la probabilidad de la nueva configuración es más grande que el de la iteración previa,

      entonces el nuevo valor del pixel se guarda en la imagen

      Si no la nueva configuración puede ser aceptada con una probabilidad controlada por T.

  Hasta que toda la imagen sea visitada.

  Decrementar T de acuerdo a un esquema de enfriamiento.

  Incrementar el número de iteraciones.

Hasta que se alcance un número determinado de iteraciones.

Dos esquemas surgen, dependiendo de la etapa donde se aplica el decremento de la temperatura, son los siguientes:

Recocido Homogéneo	Recocido No Homogéneo
1. Inicialización aleatoria.	1. Inicialización aleatoria.
2. Introducir perturbación mínima.	2. Introducir perturbación mínima.
3. Criterio de Metrópolis.	3. Criterio de Metrópolis.
4. Volver al punto 2 hasta alcanzar un equilibrio.	4. Volver al punto 2 hasta barrer toda la imagen.
5. Decrementar la temperatura.	5. Decrementar la temperatura.

Se sabe que el recocido simulado converge con probabilidad igual a uno hacia el óptimo global si la ley de temperatura T_K decrece menos rápidamente que $C/In(k)$, para una cierta constante C independiente de k. Debido a la lentitud en convergencia del esquema $C/In(k)$, en la práctica, la ley de temperatura se aproxima por una ley exponencial y debido a esta aproximación, la convergencia hacia el óptimo global no se garantiza.

La temperatura inicial T_0 debe ser escogida tal que todas las transiciones puedan ser aceptadas con una probabilidad diferente de cero, pero es muy difícil encontrar ese valor, ya que se encuentra ligado a los valores máximos y mínimos de la función de energía. En la práctica se escoge un valor de T_0 relativamente bajo para asegurar una convergencia rápida. Un valor de 2 resulta generalmente adecuado.

5.2 Funciones de energía condicional

Las funciones de energía condicional $U\left(X \mid Y\right)$ indican la energía que un pixel determinado tiene dada la clase w_i, para ello se aproximan por el numerador de la regla de Bayes y se muestran en la figura 5.3.

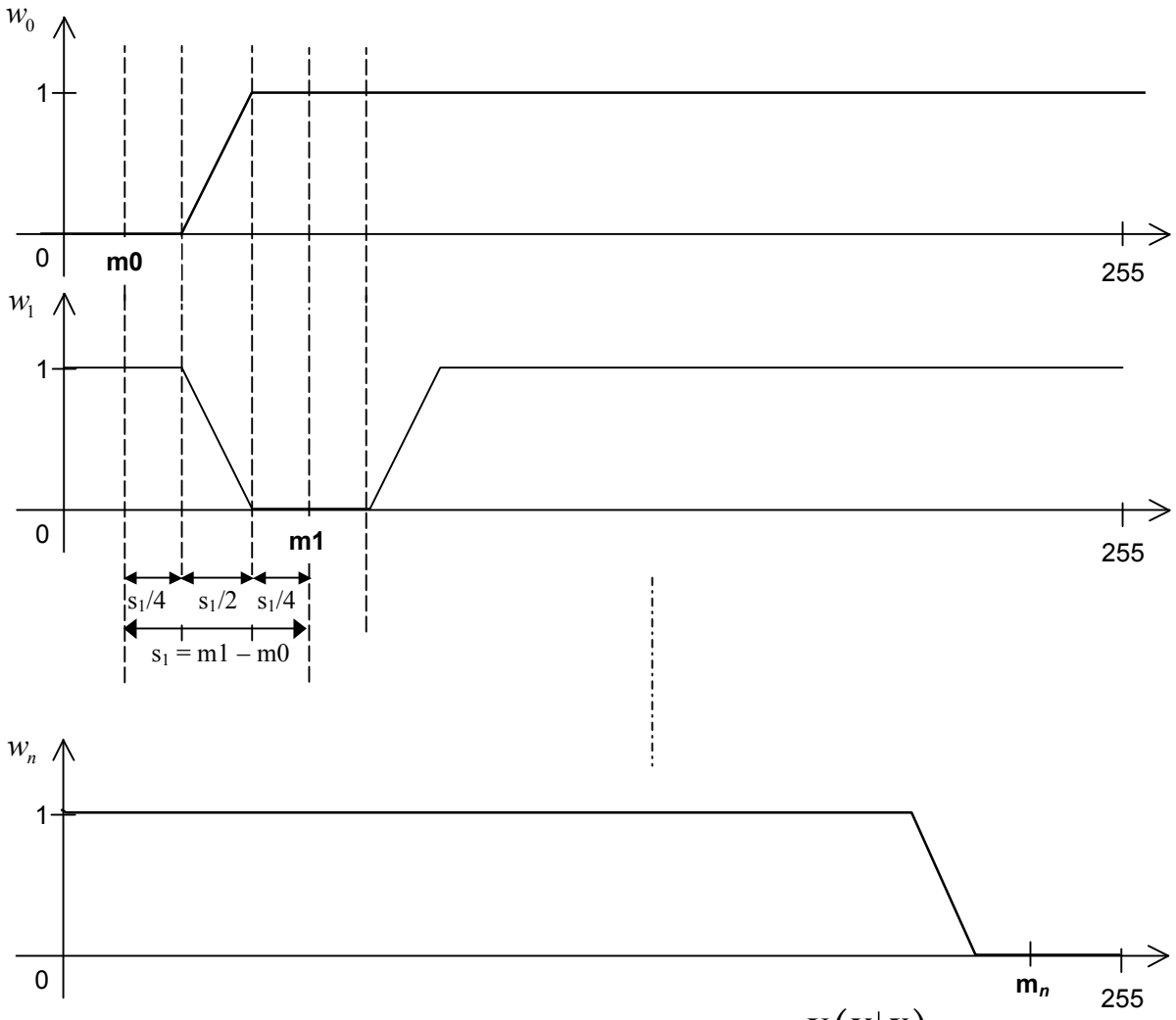


Figura 5.3 Funciones de energía condicional $U\left(X \mid Y\right)$.

Las clases se definen mediante ventanas seleccionadas en la imagen original y pueden representar: agua, tierra, calles, petróleo, etc.

Para obtener la energía condicional del nivel de gris x del pixel analizado en la clase w_i, proyectamos este valor en la función que representa la clase w_i.

Por ejemplo, para la clase w_0 si el nivel de gris x del pixel esta en el rango de $0 \leq x < m_0 + s_1/4$, la energía condicional será de 0, si $x \geq m_0 + 3s_1/4$ la energía será de 1 y si esta en el rango $m_0 + s_1/4 \leq x < m_0 + 3s_1/4$, la energía quedará determinada por la ecuación de la recta que se observa en la figura 5.3 y queda establecida como sigue:

$$u_{w_0} = \frac{2x}{s_1} - \frac{2m_0}{s_1} - \frac{1}{2}$$

donde:

u_{w_0}: es la energía condicional de x en la clase w_0
x: es el valor de nivel de gris del pixel
m_0: es la media de la clase w_0
$s_1 = m_1 - m_0$

De igual forma, para obtener la energía condicional del nivel de gris x del pixel analizado en la clase w_1, si el nivel de gris esta en el rango $0 \leq x < m_0 + s_1/4$ la energía condicional será de 1, si está en al rango $m_0 + s_1/4 \leq x < m_0 + 3s_1/4$ se utilizaría la siguiente ecuación de la recta, en la que la pendiente es de signo contrario a la de la ecuación anterior:

$$u_{w_0} = -\frac{2x}{s_1} - \frac{2m_0}{s_1} - \frac{1}{2}$$

Si el nivel de gris esta en el rango $m_1 - s_1/4 \leq x < m_1 + s_2/4$ la energía condicional será de 0, si esta en el rango $m_1 + s_2/4 \leq x < m_1 + 3s_2/4$ la energía quedaría determinada por la ecuación:

$$u_{w_0} = \frac{2x}{s_2} - \frac{2m_1}{s_2} - \frac{1}{2}$$

Por último, si el nivel de gris es mayor o igual que $m_1 + 3s_2/4$ entonces la energía será 1.

Se hizo un análisis de manera semejante para cada función trapezoidal de las clases, y se establecieron las ecuaciones correspondientes para obtener la energía condicional $U(X|Y)$.
El valor de la energía condicional del nivel de gris del pixel analizado, dependerá de la clase "actual" que se presente en la iteración $Y^{(n)}$ y de la clase "elección" generada aleatoriamente.

En las imágenes SAR se seleccionaron ventanas de entrenamiento para definir las medias de las clases $\{petróleo,\ no\ petróleo\}$. Las funciones de energía condicional $U(X|Y)$quedaron definidas como se explica en los párrafos anteriores para el caso de dos clases y se representan en la figura 5.4.

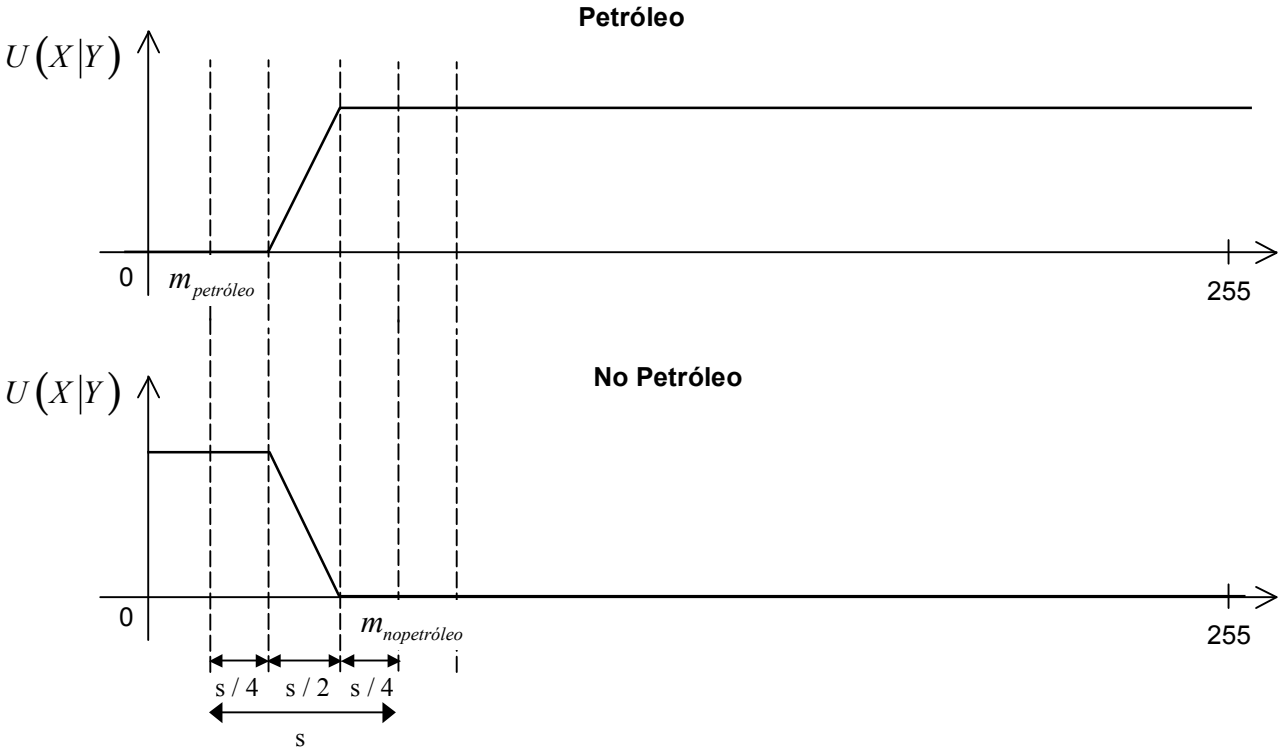


Figura 5.4 Funciones de energía condicional $U(X|Y)$ para las clases $\{petróleo,\ no\ petróleo\}$.

5.3 Función de energía *a priori*

La energía a priori permite calcular la probabilidad de ocurrencia de una configuración determinada, estableciendo así las restricciones de contexto. La fórmula que la describe es la siguiente:

$$U(Y) = \sum_{c \in C} V_c \quad \text{.....(5.7)}$$

Este cálculo es muy utilizado debido a su simplicidad y su bajo coste computacional. Si se presenta una vecindad de primer orden, para su análisis le corresponden 4 cliques de dos pixels, de forma análoga, si la vecindad es de segundo orden le corresponden 8 cliques de dos pixels.

Modelo de Potts

El modelo de Potts se utiliza cuando el análisis es para dos o más clases por ejemplo, {vegetación, agua, tierra, etc.}. Una clique potencial depende de su tamaño, dimensión y orientación, además de su configuración local. Para el cálculo de la función $U(Y)$ por medio del modelo de Potts, se consideraron los cliques de segundo orden.

La función clique potencial para cliques de dos pixels es:

$$V_c = \begin{cases} -\beta_c & \text{Si los pixels del clique } \{i, j\} \text{ tienen la misma clase.} \\ \beta_c & \text{En otro caso.} \end{cases}$$

donde β_c es el parámetro β para las cliques del tipo c.

La función clique potencial en el modelo de Potts queda definida por:

$$V_c = -\beta\,\delta\left(y_i, y_j\right)$$

en el que el clique c contiene a los pixels i y j y y_i y y_j son sus valores de clase.

El cálculo para la energía $U(Y)$ se hace con la siguiente fórmula:

$$U(Y) = -\sum_{c=\{i,j\}} \beta\,\delta\left(i, j\right)$$

donde β es el coeficiente de interacción y la función $\delta\left(i, j\right)$ es una función impulso que toma el valor de 1 si el pixel analizado i tiene la misma clase que su vecino j.
El análisis se hace tomando a un pixel como referencia y comparando su valor de clase con cada uno de los valores de sus vecinos como se observa en la figura 5.5, así al evaluar todos los cliques se tendrá un determinado valor para la ocurrencia de la clase del pixel analizado.

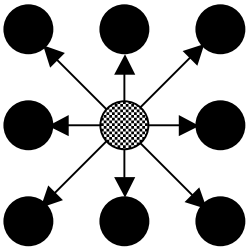
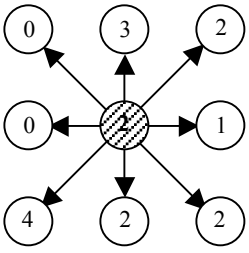


Figura 5.5 Cálculo de la función de energía a priori $U(Y)$ para el sistema de 8 vecinos.

Por ejemplo, para el análisis en *8-conexidad* de la figura 5.6, el valor de la energía a priori es:



$$U(2) = -2\beta$$

Figura 5.6 Ejemplo del cálculo de la función de energía a priori $U(Y)$.

Modelo de Ising

El modelo de Ising se presenta cuando el análisis es solamente para dos etiquetas (clases), en este caso $\{petróleo,\ no\ petróleo\}$ y su función clique potencial queda definida por:

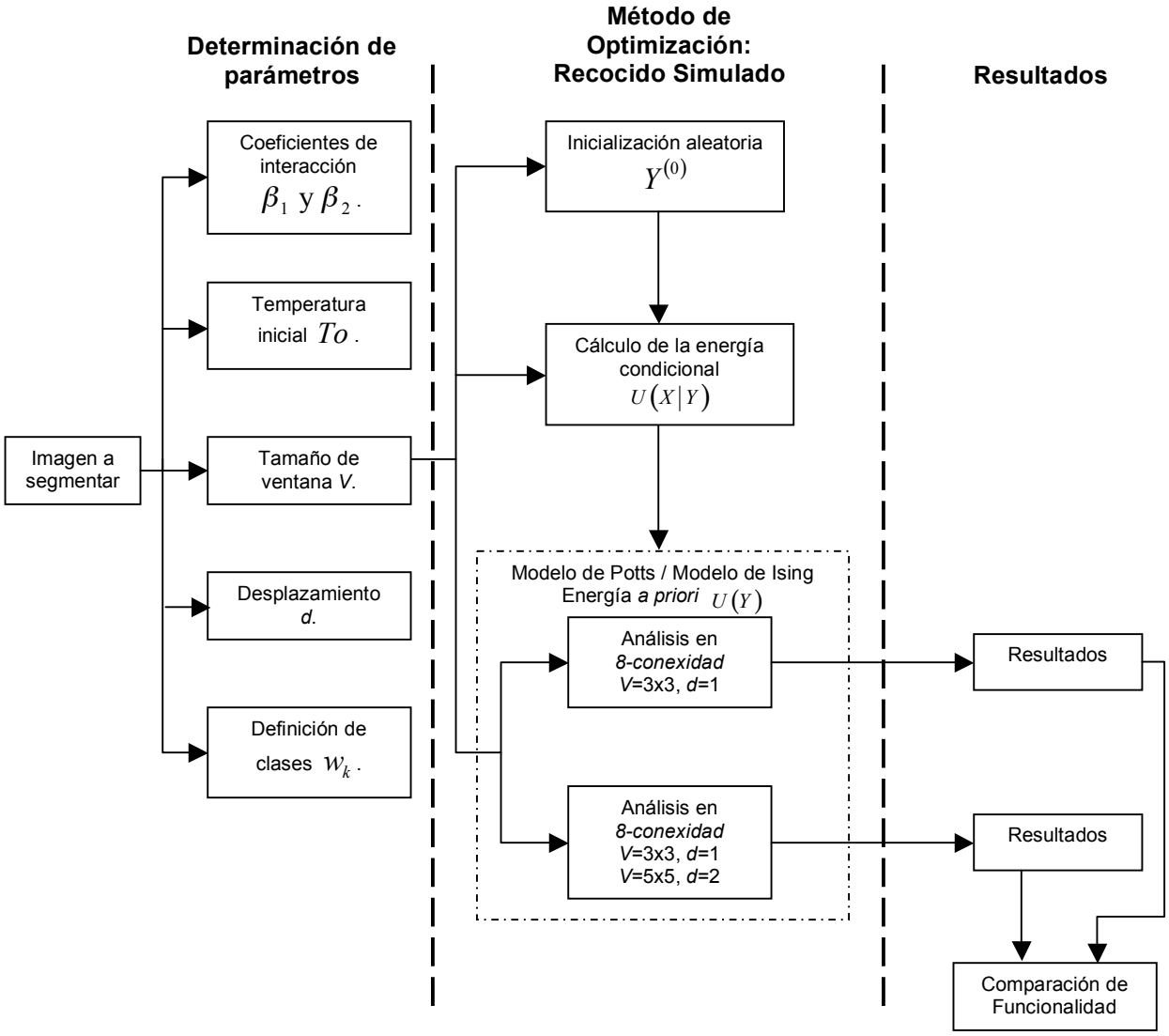
$$V_c = -\beta\,\delta\left(y_k,\, y_l\right)$$

donde el clique c contiene a los pixels k y l y y_k y y_l son sus valores de clase. El cálculo de la energía $U\left(Y\right)$se hace de la misma forma que en el modelo de Potts, pero considerando sólo dos clases.

$$U\left(Y\right) = -\sum_{c=\{i,j\}} \beta\,\delta\left(i,\, j\right)$$

5.4 Esquema Multiventana de Segmentación

El esquema general para el procesamiento y segmentación de las imágenes es el siguiente:



Las fotografías aéreas y las imágenes adquiridas por satélite, presentan deficiencias en la información obtenida, debido al ruido u otros factores, es por ello que son necesarios nuevos y más robustos esquemas de procesamiento para los datos de percepción remota.

El esquema por Campos de Markov pretende obtener imágenes segmentadas basándose en un análisis multiventana del que podemos obtener una mejor descripción de las escenas.

El esquema general consta de tres etapas, las cuales son:

1. Determinación de parámetros.

2. Método de Optimización: Recocido simulado
- ❖ Segmentación por Campos Aleatorios de Markov

Para las fotografías aéreas:
- ❖ Análisis en 8-conexidad

-Ventana de 3x3, desplazamiento 1
-Ventana de 3x3, desplazamiento 1 y ventana de 5x5, desplazamiento 2

Para la imagen SAR original:
- ❖ Análisis en 8-conexidad

-Ventana de 3x3, desplazamiento 1
-Ventana de 3x3, desplazamiento 1 y ventana de 5x5, desplazamiento 2

3. Resultados

1. Determinación de parámetros

Sobre las imágenes obtenidas por fotografía aérea del Distrito Federal, se definieron 5 ventanas de entrenamiento de diferentes tamaños (figura 5.7) que representan las clases de las zonas más obscuras a las más claras, que pueden definir vegetación, caminos, techos, etc.

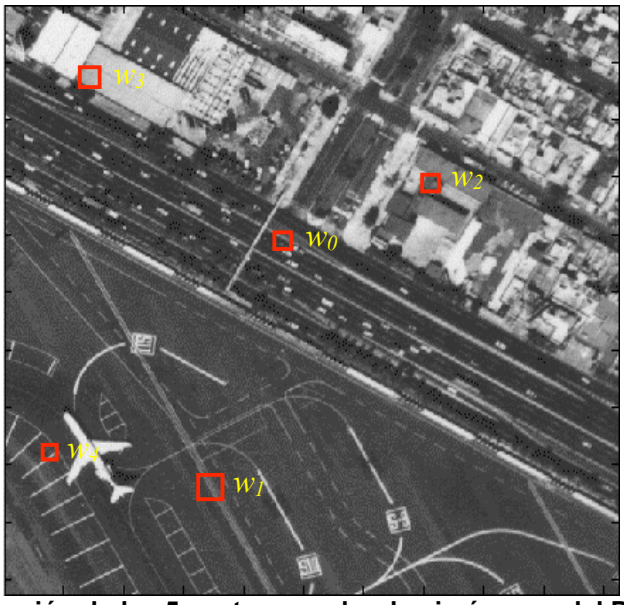


Figura 5.7 Selección de las 5 ventanas sobre las imágenes del Distrito Federal.

En el caso de las imágenes SAR se definieron 2 ventanas de entrenamiento que representan las clases: petróleo y nopetróleo.

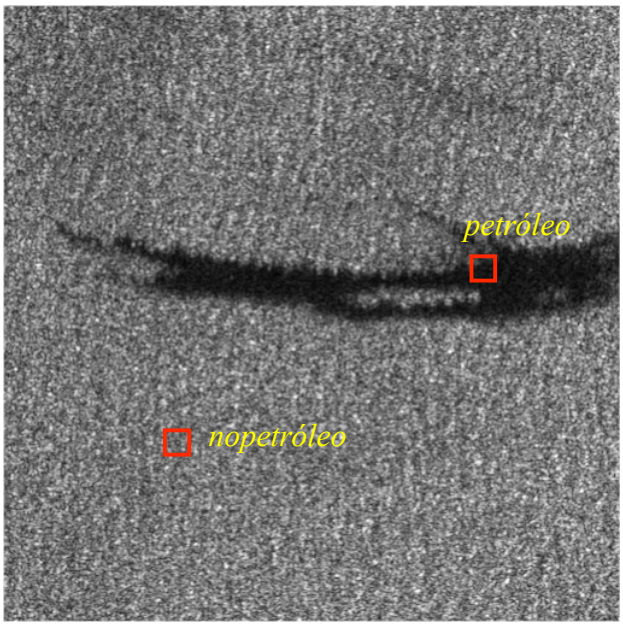


Figura 5.8 Selección de las 2 ventanas sobre las imágenes SAR.

Se obtuvieron las medias m_i de cada ventana de entrenamiento y se calcularon las funciones de energía condicional $U\left(X \middle| Y\right)$ que se describen en el tema 5.2.

Se definieron los tamaños de las vecindades a utilizar, en el caso de una sola vecindad, el tamaño es de 3 x 3 pixels y en el caso multiventana se utilizó una ventana de 3 x 3 y otra de 5 x 5.

Se definieron los valores de β_1 y β_2 considerando que el primero se usa en la vecindad de 3 x 3 y que es la que aporta más información contextual, ya que su desplazamiento alrededor del pixel analizado es de *d* =1, por tanto el valor de β_1 será de 0.35 y el valor de β_2 de 0.1 ya que en este caso aporta menos información de contexto porque la distancia de la vecindad de 5 x 5 es de *d* =2.

La temperatura inicial se estableció en un valor de $T^{(0)}$=2, sabiendo que la temperatura debe ser considerablemente elevada a fin de obtener buenos resultados en la convergencia del método de segmentación.

2. Método de Optimización: Recocido simulado

Para el proceso de segmentación se utiliza el procedimiento de recocido simulado que usa el algoritmo de Metrópolis con un esquema de temperatura variable, modificando el parámetro temperatura T desde una valor muy alto en el que se aceptan casi todos los nuevos estados, hasta un valor muy bajo en el que ya no se aceptan nuevos estados, a fin de minimizar la función de energía *a posteriori* $U\left(Y \middle| X\right)$.

El objetivo del problema de optimización es encontrar la configuración de energía mínima.

Consideremos X como la imagen original en 256 niveles de gris y Y la imagen segmentada en 5 o 2 clases, la simulación toma como datos iniciales a X y a la imagen de clases originada en la

inicialización, $Y^{(0)}$. La figura 5.9 muestra el esquema del algoritmo de simulación para el caso de n iteraciones.

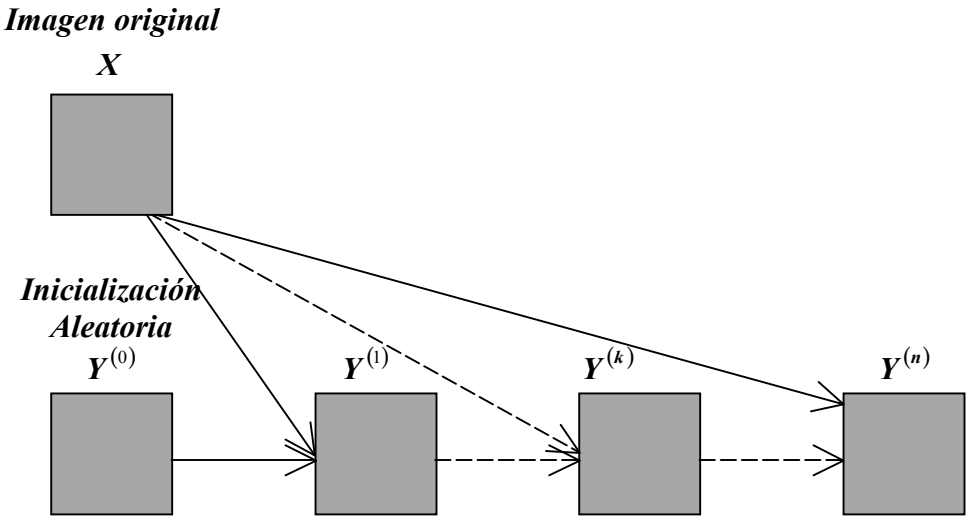


Figura 5.9 Esquema del algoritmo de simulación.

La simulación del algoritmo de recocido simulado es usada para minimizar la energía a posteriori $U\left(Y \middle| X\right)$ y encontrar la configuración $Y^{(n)}$. Esta configuración es la imagen segmentada y es la solución al problema de segmentación.

Algoritmo de Recocido Simulado

1. Inicialización

- Determinación aleatoria de la solución $Y^{(0)}$.
- Escoger una temperatura inicial $T^{(0)}$ suficientemente elevada.

2. Barrer secuencialmente la imagen y en cada etapa n,

- Escoger un pixel $r = s^{(n)}$, su valor es $Y_r^{(n)}$ y su configuración de vecindad es $V_r{}^{(n)}$.
- Efectuar el sorteo de una variable aleatoria con distribución uniforme: $\xi \in \Omega$.

3. Criterio de Metrópolis

- Calcular la variación de la energía asociada al pixel r:

$$\Delta U = U\left(\xi \middle| V_r{}^{(n)}, X\right) - U\left(Y_r{}^{(n)} \middle| V_r{}^{(n)}, X\right)$$

- Pueden surgir dos casos:

Si $\Delta U \leq 0$, $\qquad Y_r{}^{(n+1)} = \xi$

$$\text{Si } \Delta U > 0, \qquad Y_r^{(n+1)} = \xi \text{ con probabilidad } \Pi\left(Y_r^{(n+1)} \rightarrow \xi\right) = \exp -\frac{\Delta U}{T_n}$$

4. Continuar con la etapa 2.

5. Serie de temperaturas decrecientes hacia 0, por tanto, $\lim_{n\to\infty} T_n = 0$.

La simulación del algoritmo de recocido simulado, dado el esquema de segmentación propuesto es el siguiente:

Simulación del Algoritmo de Recocido Simulado

1. Inicio

- Determinación aleatoria de la solución $Y^{(0)}$. La clase de cada pixel se determina generando números aleatorios con distribución uniforme en el rango del número de clases, 5 o 2.
- Definir una temperatura inicial $T^{(0)}$ suficientemente elevada, $T^{(0)}$=2, y los coeficientes de interacción, $\beta_1 = 0.35$ y $\beta_2 = 0.1$, según sea el caso.

2. Hacer desde $iter = 1$ hasta $iter = n$

Barrer secuencialmente la imagen original y la solución $Y^{(n)}$ y para cada pixel $r = s^{(n)}$:

- Su valor es $Y_r^{(n)}$ y su configuración de vecindad es $V_r^{(n)}$.
- Efectuar el sorteo de una variable aleatoria con distribución uniforme, que será la clase elección $\xi \in \Omega$ =[0,4] o bien $\xi \in \Omega$ =[0,1], según el caso.

Análisis en 8-conexidad en la solución $Y^{(n)}$

- Para la ventana con desplazamiento igual a 1:
  - Si “actual” =”x”: prob_actual=prob_actual- β_1 [actual]
  - Si “elección” =”x”: prob_elección=prob_elección- β_1 [elección]

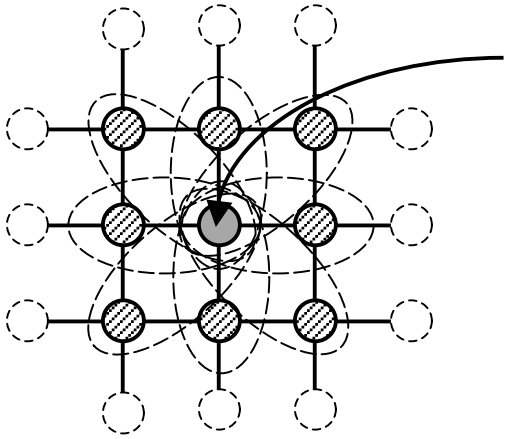
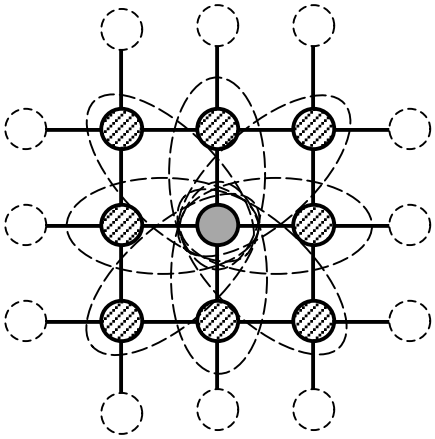


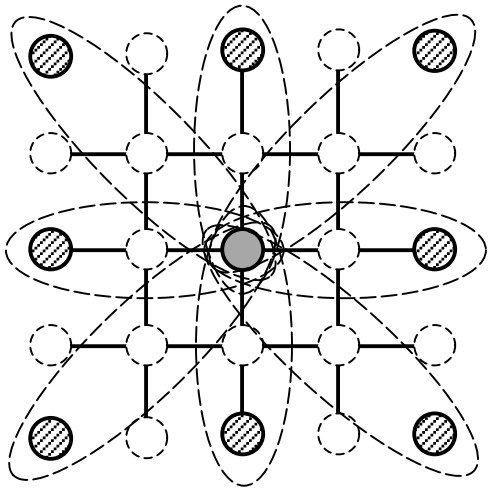
Figura 5.10 Desplazamiento igual a 1 y β_1=0.35.

- Para ventana con desplazamiento igual a 1 y desplazamiento igual 2:

- Si "actual" ="x": prob_actual1=prob_actual1- β_1 [actual]
  prob_actual2=prob_actual2- β_2 [actual]
- Si "elección" ="x": prob_elección1=prob_elección1- β_1 [actual]
  prob_elección2=prob_elección2- β_2 [elección]



Desplazamiento igual a 1, $\beta_1 = 0.35$.



Desplazamiento igual a 2, $\beta_1 = 0.35$ y $\beta_2 = 0.1$.

Figura 5.11

Calcular la variación de la energía local asociada al pixel r :

- Para ventana con desplazamiento igual a 1:
  - prob_actual=prob_actual + potencial[actual] $_{ij}$
  - prob_elección=prob_elección + potencial [elección] $_{ij}$
- Para ventana con desplazamiento igual a 1 y desplazamiento igual 2:
  - prob_actual=prob_actual1 + prob_actual2 + potencial[actual] $_{ij}$
  - prob_elección=prob_elección1 + prob_elección2 + potencial[actual] $_{ij}$

  donde potencial [actual] $_{ij}$ representa la energía condicional $U\left(X \middle| Y\right)$ e i, j son las coordenadas del pixel analizado.

Si prob_elección ≤ prob_actual:

Y_{ij} ="elección"

En caso contrario:

- p=exp –[(prob_elección – prob_actual) / $T^{(k)}$]
- sorteo de una variable aleatoria ξ_2 , uniformemente distribuida en el rango [0,1]
- si $\xi_2 < \mathrm{p}$, entonces Y_{ij} ="elección"

Fin del barrido

3. Decrementar la temperatura:

$$T^{(n)} = 0.95\ T^{(n-1)}$$

4. Regresar al punto 2 hasta terminar el número de iteraciones.

Los métodos bayesianos asociados al modelo markoviano proporcionan una función de energía *no convexa* que debe ser minimizada. La aplicación del recocido simulado en la optimización de la función de energía a posteriori $U\left(Y \middle| X\right)$ asegura la convergencia hacia el óptimo global y evita la convergencia a los mínimos locales. El cambio de la clase del pixel analizado a la clase propuesta, es aceptado incondicionalmente solo cuando $\Delta U < 0$.

3. Resultados

Se obtuvieron dos resultados para cada imagen en 10, 20, 40 y 60 iteraciones, usando para el cálculo de la función de energía a priori $U\left(Y\right)$una ventana de 3 x 3 con *d* = 1 para el primer resultado y una ventana de 3 x 3 con *d* = 1 y otra ventana de 5 x 5 con *d* = 2 para el segundo resultado, a fin de obtener una imagen en la que se considera la información contextual que esta muy cerca del pixel analizado, *d*=1 y otra imagen en la que se involucra no sólo la información de los pixels vecinos de distancia igual a 1 sino los pixels en una vecindad de distancia igual a 2 que están más alejados del pixel central, pero que aportan información valiosa para definir el cambio de clase del pixel en cada iteración.

Los resultados fueron comparados con un método estándar de segmentación que fue el de K-medias y que se presenta en el tema 6.3.

6

RESULTADOS

6.1 Fotografía aérea de alta resolución

La fotografía aérea es un caso particular de la teledetección en la que se utilizan plataformas a baja altura (aviones en lugar de satélites) con lo que la escala es mayor. En los últimos años el desarrollo de las cámaras digitales ha permitido la aparición de fotografía aérea digital y el uso de diversas bandas del espectro.

La fotografía aérea espacial de alta resolución, en la actualidad, es una fuente básica de obtención de información sobre estructuras y procesos en muy distintos campos de investigación básica y aplicada.

Las aplicaciones para las nuevas cámaras digitales multiespectrales son ilimitadas y despiertan la creatividad para la solución y previsión de problemas.

La fotografía aérea de alta resolución se aplica en diferentes campos de investigación, entre los cuales se encuentra, la agricultura, el desarrollo urbano, soporte en el control y mitigación de desastres e incendios, monitoreo ambiental, etc.

El esquema multiventana de segmentación propuesto en esta tesis fue aplicado a tres imágenes de fotografía aérea de alta resolución del Distrito Federal que tienen una dimensión de 512 x 512 pixels, una resolución radiométrica de 256 niveles de gris y una resolución espacial de 50 cm por pixel.

Las imágenes muestran secciones del bosque de Tlalpan, la zona de Villa Olímpica y una parte del Aeropuerto “Benito Juárez”.

Las imágenes se procesaron en formato raw (formato “crudo”) y en 256 niveles de gris. El primer paso para el análisis fue la definición de los parámetros iniciales que fueron $T = 2$, $\beta_1 = 0.35$ y $\beta_2 = 0.1$ y la elección de cinco ventanas de entrenamiento dentro de cada imagen como se muestra en el subtema 5.4, para lo cual se tomo en cuenta desde las zonas mas obscuras hasta las más claras.

El procedimiento posterior se llevo a cabo por medio de los modelos de Markov y el método de Recocido Simulado, en el que a partir de las matrices obtenidas de las ventanas de entrenamiento se obtuvieron las medias para el cálculo de la energía condicional, tomando como referencia la matriz de niveles de gris de la imagen original.

Se genero la inicialización aleatoria para calcular por medio del modelo de Potts la energía a priori de clase y posteriormente conjuntar los valores con los de la energía condicional para generar la siguiente iteración y así ir segmentando cada imagen en las cinco clases elegidas.

Para cada imagen se obtuvieron resultados para 10, 20, 40 y 60 iteraciones en dos casos:

a) Una ventana de 3 x 3, desplazamiento igual a 1 y β_1=0.35, y
b) Un análisis multiventana con una ventana de 3 x 3, desplazamiento igual a 1 y β_1=0.35, y una ventana de 5 x 5, desplazamiento igual a 2 y β_2 =0.1.

Las imágenes segmentadas se obtuvieron en 5 niveles de gris, definidos por la media de cada clase, que van desde el valor más pequeño (negro), hasta el más alto (blanco).

Para realizar el procesamiento de las imágenes se utilizó un equipo Pentium III a 800 Mhz, con 128 MB de RAM y el software utilizado fue Matlab 6.5 y su GUI (Graphical User Interface).

Los tiempos de procesamiento variaron entre 11 y 15 minutos, dependiendo del número de iteraciones, el tipo de análisis de ventana y la imagen analizada.

A continuación se presentan los resultados del modelo markoviano multiventana de segmentación aplicado a las tres imágenes del Distrito Federal.

Se presenta primero la imagen original, una sección aproximada de la zona localizada en la Guía Roji y la inicialización aleatoria $Y^{(0)}$. Después se presentan dos imágenes, para el caso de una ventana y dos ventanas obtenidas en 10, 20, 40 y 60 iteraciones, con el fin de visualizar fácilmente los resultados obtenidos y poder compararlos.

En cada figura se especifica:

- El nombre de la imagen y número de iteraciones.
- v.- tamaño de la ventana.
- d.- desplazamiento.
- Parámetros β_1 y β_2.

Imagen "Tlalpan"



Figura 6.1 Imagen original "Tlalpan".



Figura 6.2 Ubicación imagen "Tlalpan".

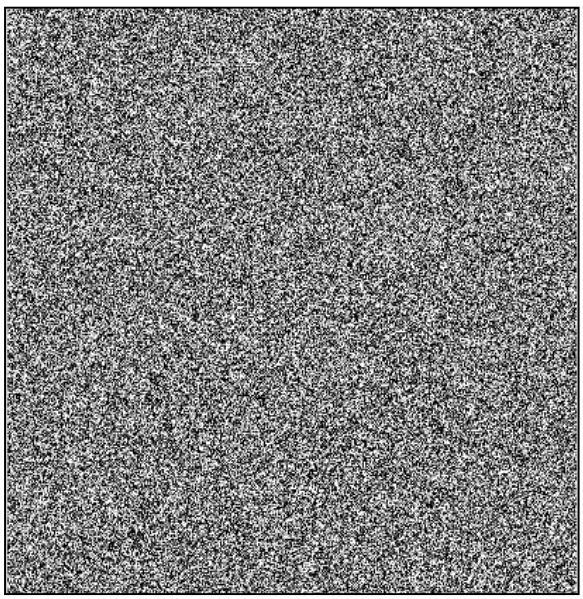
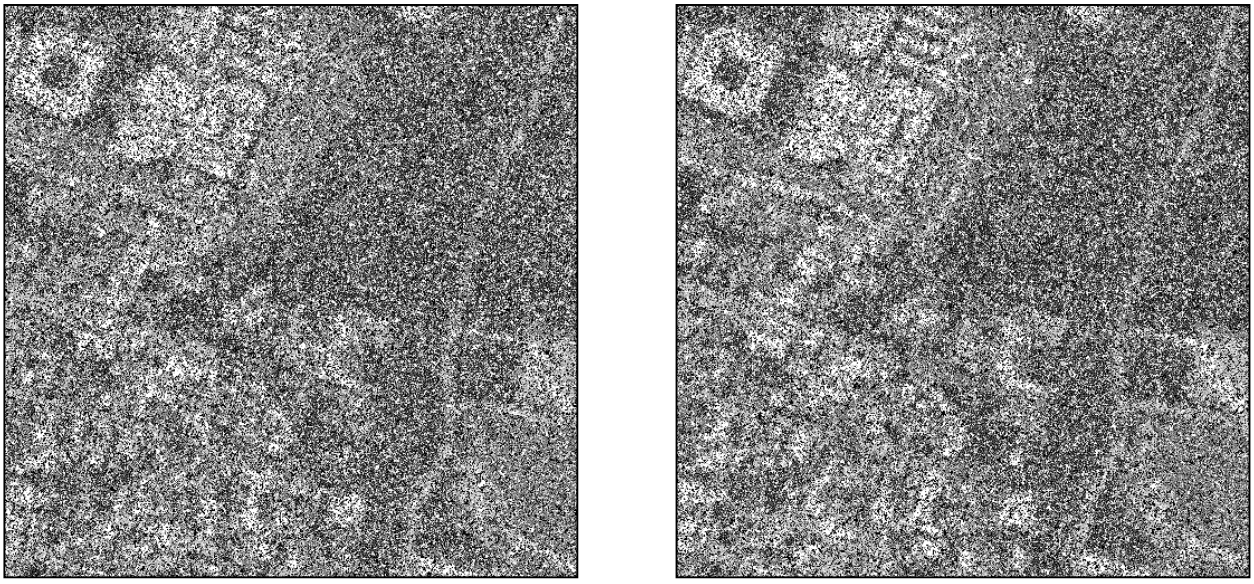


Figura 6.3 Imagen de inicialización $Y^{(0)}$.

Resultados para 10 iteraciones de la imagen "Tlalpan"



(a) (b)

Figura 6.4 (a) v=3x3, d=1, β_1=0.35 (b) v=3x3, d=1, β_1=0.35 y v=5x5, d=2, β_2=0.1

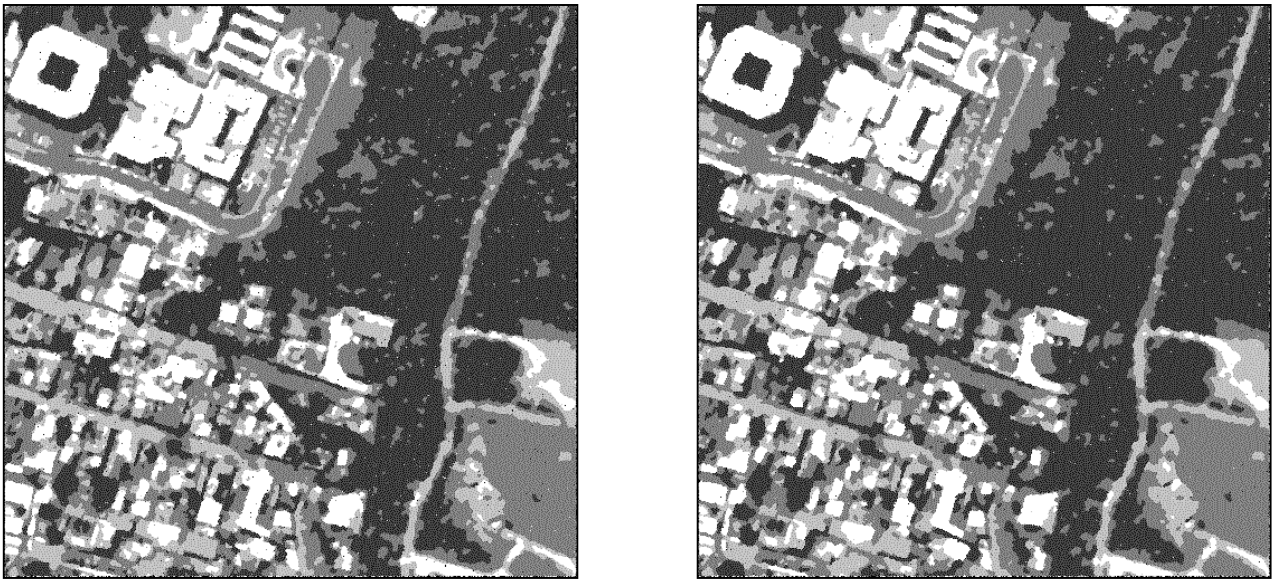
Resultados para 20 iteraciones de la imagen "Tlalpan"



(a) (b)

Figura 6.5 (a) v=3x3, d=1, β_1=0.35 (b) v=3x3, d=1, β_1=0.35 y v=5x5, d=2, β_2=0.1

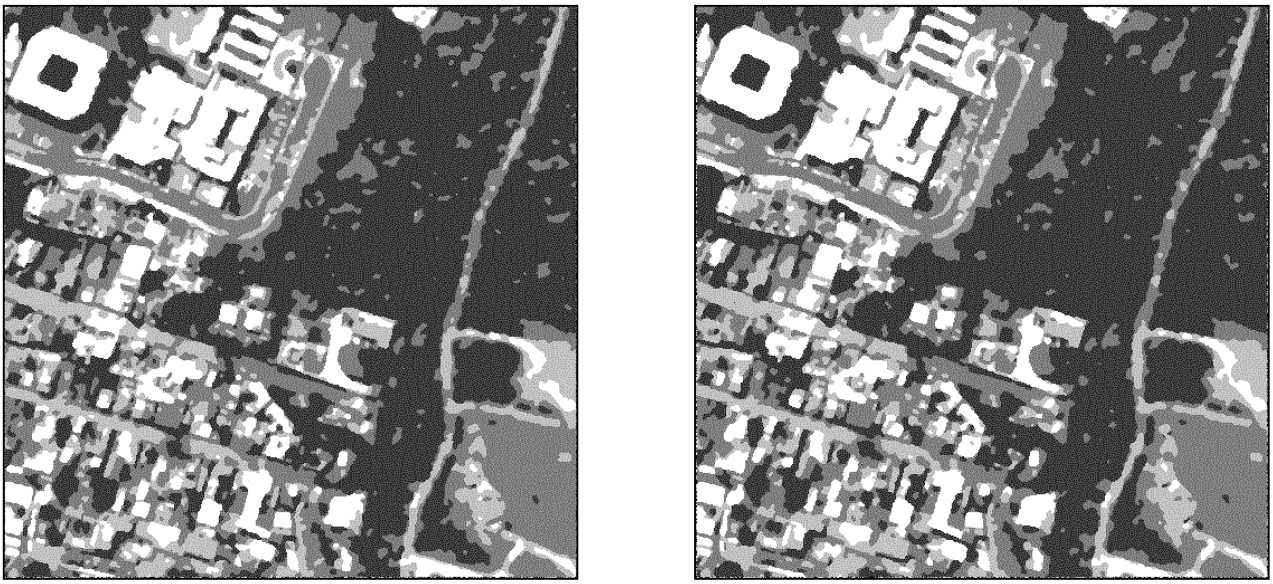
Resultados para 40 iteraciones de la imagen "Tlalpan"



(a) (b)

Figura 6.6 (a) v=3x3, d=1, β_1=0.35 (b) v=3x3, d=1, β_1=0.35 y v=5x5, d=2, β_2=0.1

Resultados para 60 iteraciones de la imagen "Tlalpan"



(a) (b)

Figura 6.7 (a) v=3x3, d=1, β_1=0.35 (b) v=3x3, d=1, β_1=0.35 y v=5x5, d=2, β_2=0.1

Imagen "Aeropuerto"



Figura 6.8 Imagen original "Aeropuerto".

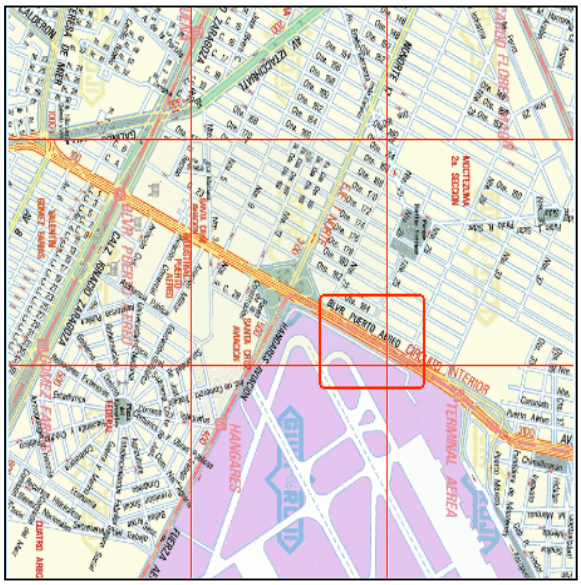


Figura 6.9 Ubicación imagen "Aeropuerto".

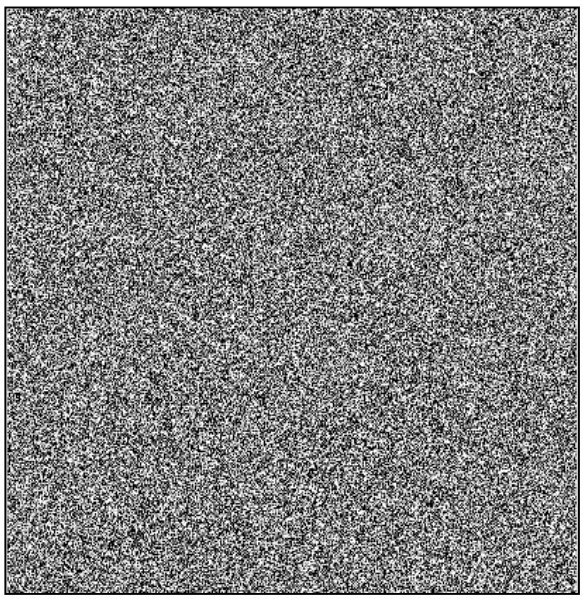
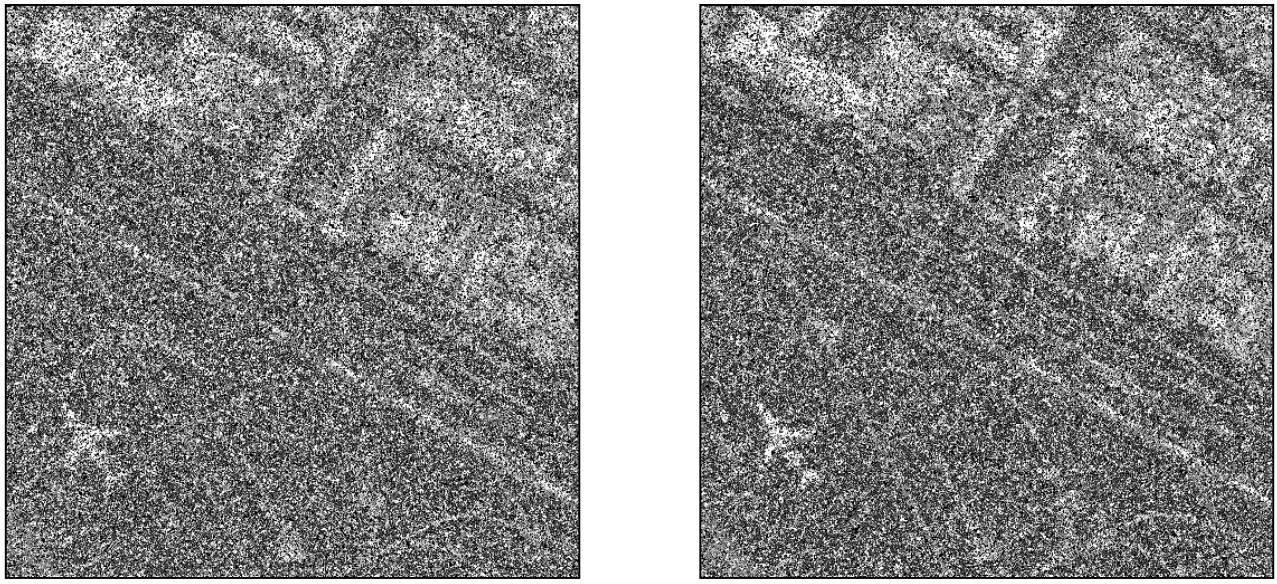


Figura 6.10 Imagen de inicialización $Y^{(0)}$.

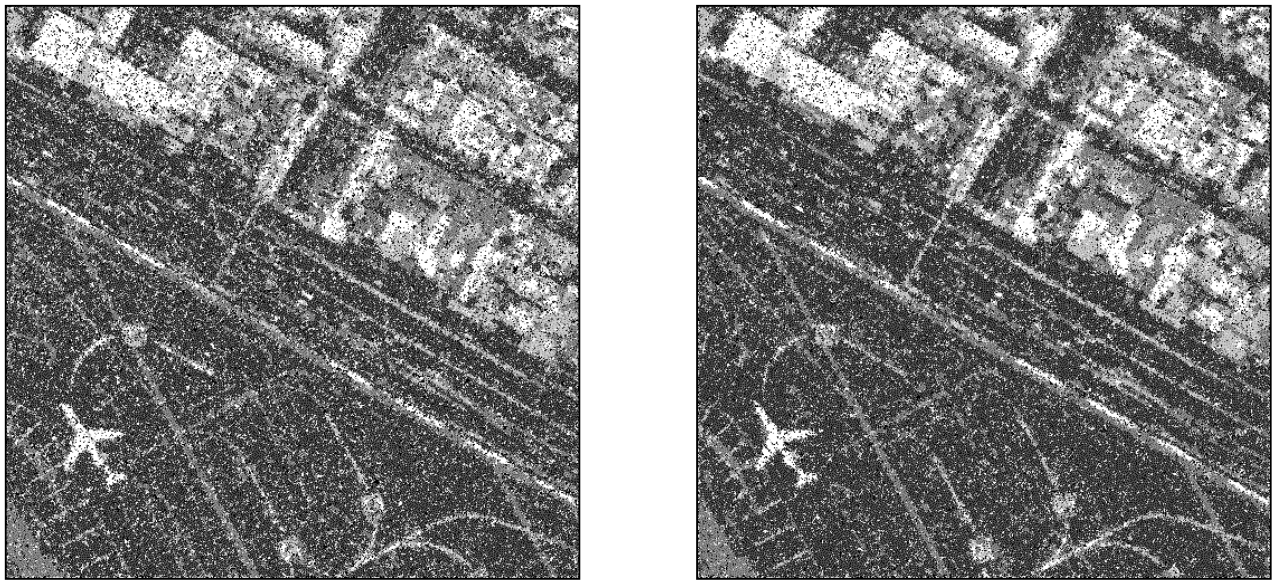
Resultados para 10 iteraciones de la imagen "Aeropuerto"



(a) (b)

Figura 6.11 (a) v=3x3, d=1, β_1=0.35 (b) v=3x3, d=1, β_1=0.35 y v=5x5, d=2, β_2=0.1

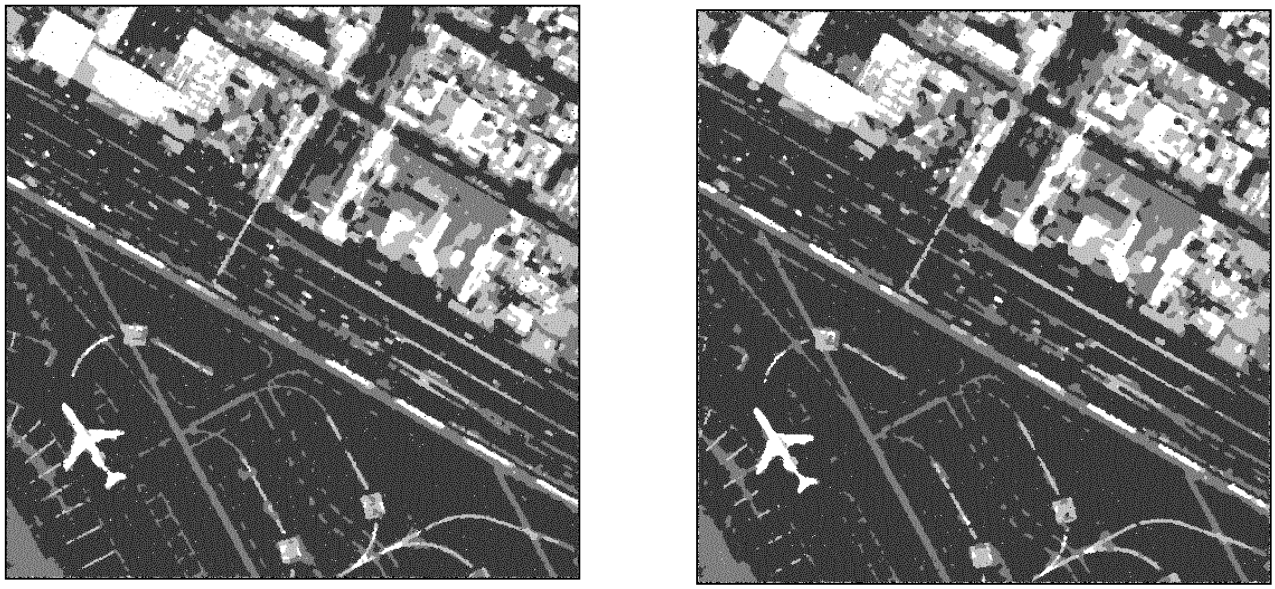
Resultados para 20 iteraciones de la imagen "Aeropuerto"



(a) (b)

Figura 6.12 (a) v=3x3, d=1, β_1=0.35 (b) v=3x3, d=1, β_1=0.35 y v=5x5, d=2, β_2=0.1

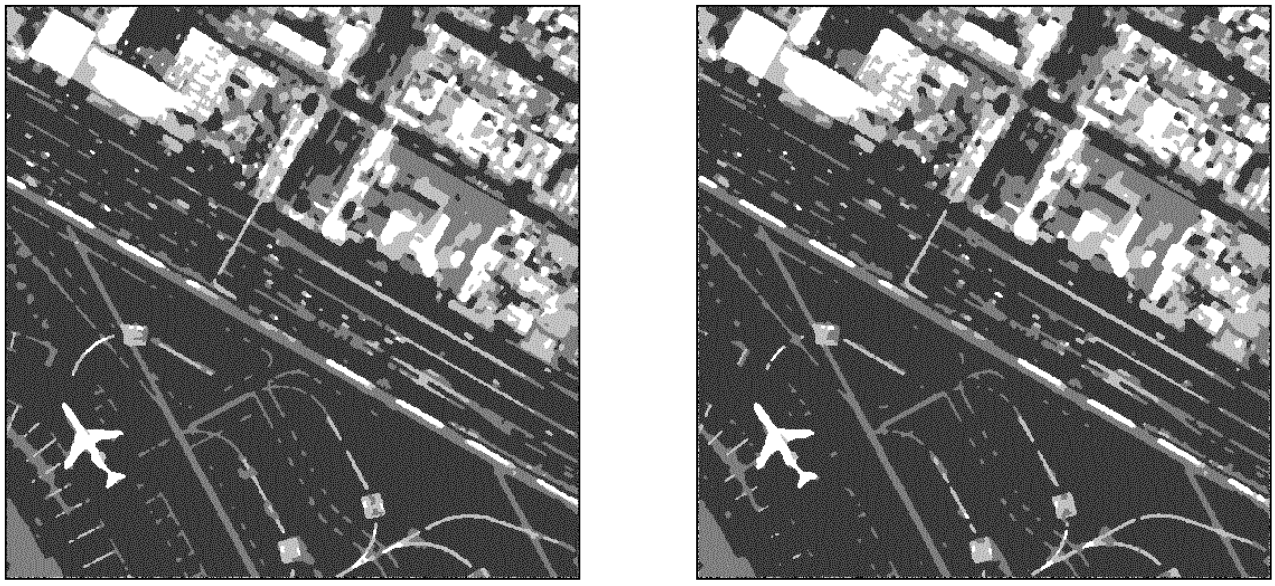
Resultados para 40 iteraciones de la imagen "Aeropuerto"



(a) (b)

Figura 6.13 (a) v=3x3, d=1, β_1=0.35 (b) v=3x3, d=1, β_1=0.35 y v=5x5, d=2, β_2=0.1

Resultados para 60 iteraciones de la imagen "Aeropuerto"



(a) (b)

Figura 6.14 (a) v=3x3, d=1, β_1=0.35 (b) v=3x3, d=1, β_1=0.35 y v=5x5, d=2, β_2=0.1

Imagen "Villa Olímpica"



Figura 6.15 Imagen original "Villa Olímpica".



Figura 6.16 Ubicación imagen "Villa Olímpica".

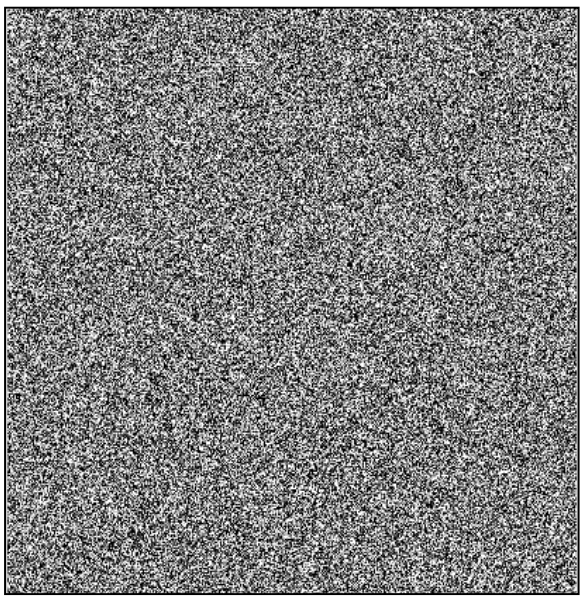
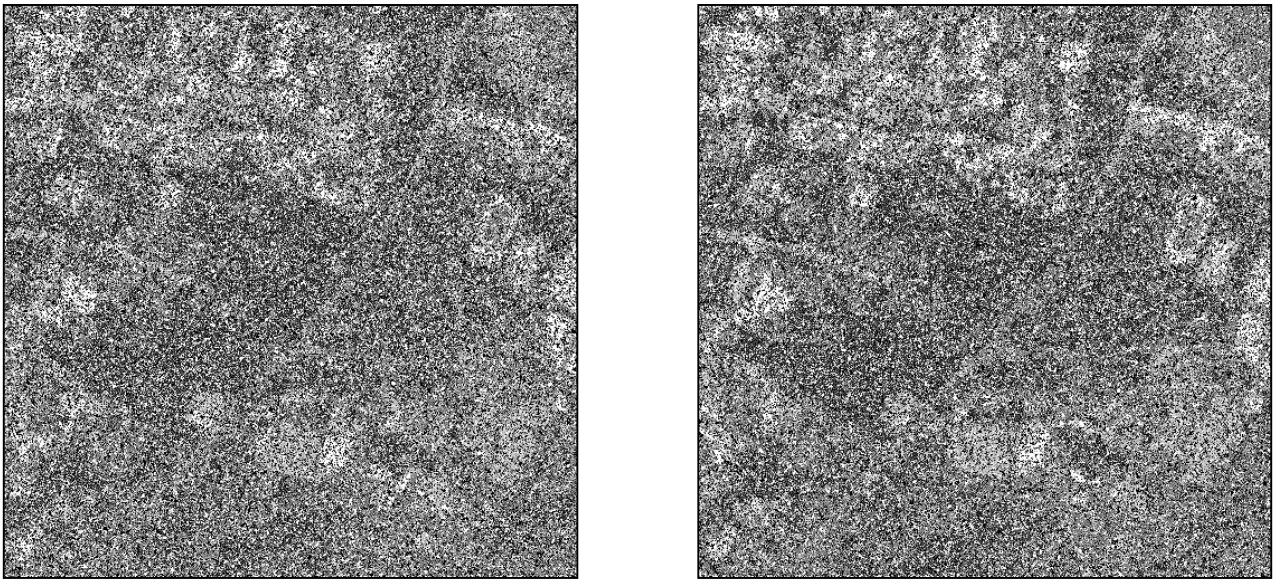


Figura 6.17 Imagen de inicialización $Y^{(0)}$.

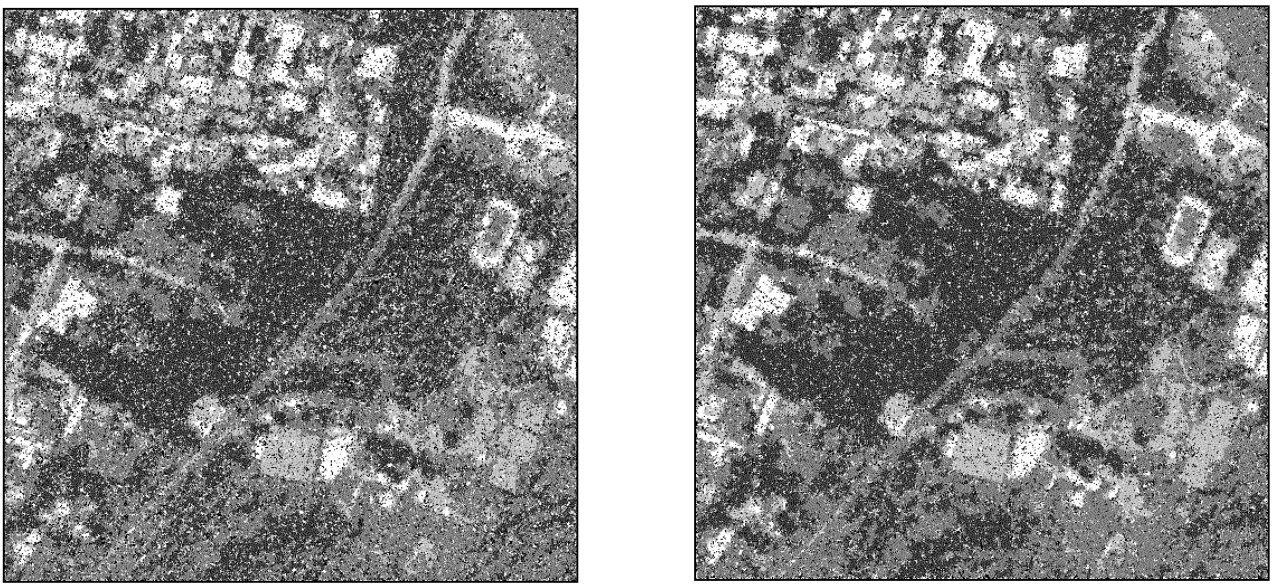
Resultados para 10 iteraciones de la imagen "Villa Olímpica"



(a) (b)

Figura 6.18 (a) v=3x3, d=1, β_1=0.35 (b) v=3x3, d=1, β_1=0.35 y v=5x5, d=2, β_2=0.1

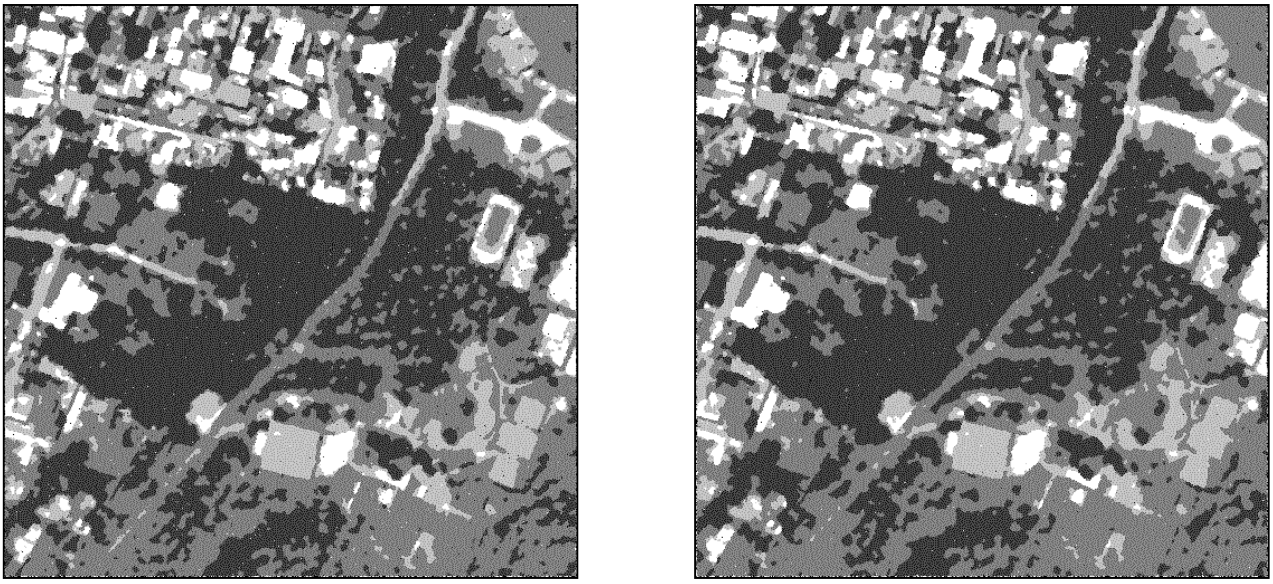
Resultados para 20 iteraciones de la imagen "Villa Olímpica"



(a) (b)

Figura 6.19 (a) v=3x3, d=1, β_1=0.35 (b) v=3x3, d=1, β_1=0.35 y v=5x5, d=2, β_2=0.1

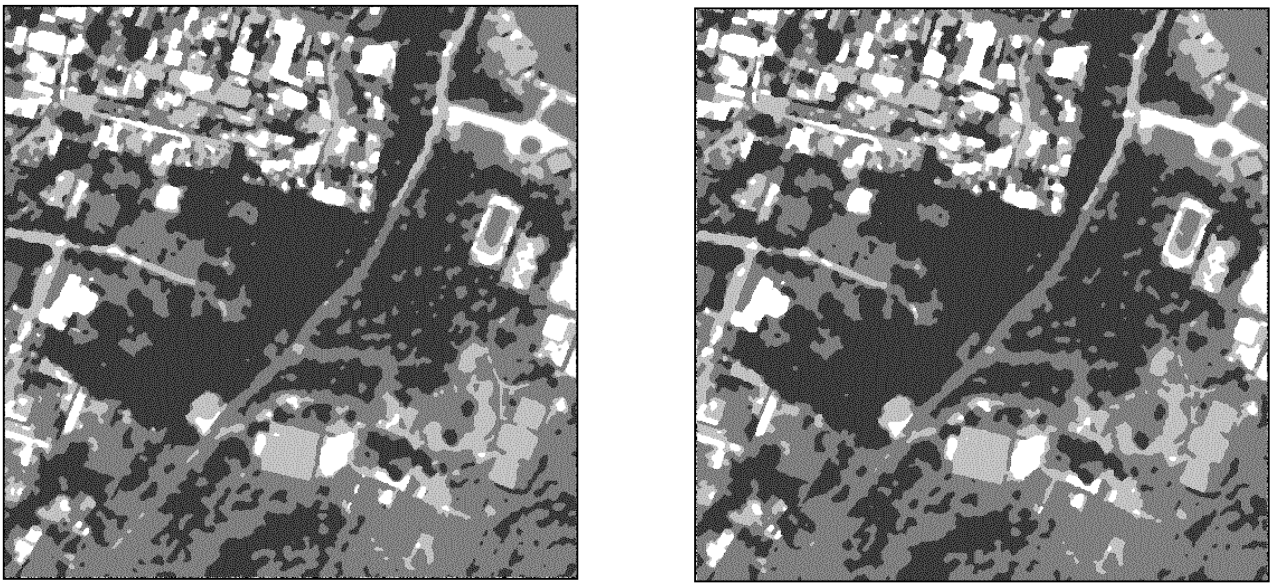
Resultados para 40 iteraciones de la imagen "Villa Olímpica"



(a) (b)

Figura 6.20 (a) v=3x3, d=1, β_1=0.35 (b) v=3x3, d=1, β_1=0.35 y v=5x5, d=2, β_2=0.1

Resultados para 60 iteraciones de la imagen "Villa Olímpica"



(a) (b)

Figura 6.21 (a) v=3x3, d=1, β_1=0.35 (b) v=3x3, d=1, β_1=0.35 y v=5x5, d=2, β_2=0.1

6.2 Aplicación a la detección de derrames petroleros del buque "Prestige"

En esta sección analizaremos los resultados que se obtuvieron luego de procesar la imagen que muestra el derramamiento de petróleo provocado por el buque "Prestige", el cual sucedió en el año 2002 en la órbita de adquisición 40114 que corresponde a las zonas de Galicia y Asturias en España.

Cuando el buque petrolero Prestige se encontraba a 80 kilómetros de las costas españolas y derramaba miles de toneladas de petróleo, el ministro de Agricultura, Pesca y Alimentación, Miguel Arias, se apresuró a descartar cualquier riesgo de catástrofe ecológica o afección a los recursos pesqueros como consecuencia del derrame. Pronto la realidad se encargó de desmentirlo con la llegada de la ola negra a la costa de Galicia.

El 19 de septiembre del 2002 el buque Prestige zarpó con 80 mil toneladas de combustible del puerto Venspits, en Letonia.



Figura 6.22 Imagen del Buque Prestigue luego de zarpar [81]

El barco era propiedad de una compañía griega y navegaba con bandera de Bahamas. Ocho días después de partir, a 80 kilómetros de las costas españolas, sufrió una avería, por lo que quedó a la deriva y comenzó a derramar su peligrosa carga.

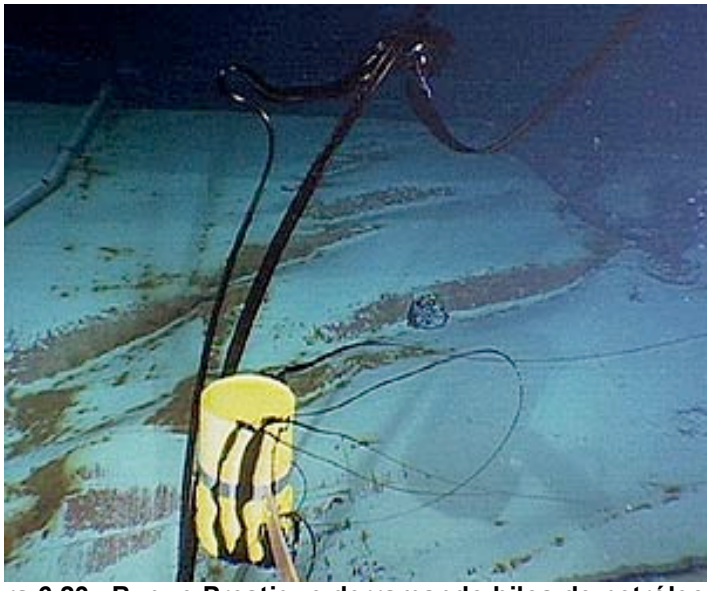


Figura 6.23 Buque Prestigue derramando hilos de petróleo [82]



Figura 6.24 Buque Prestigue cuando se partió en dos. [83]

La tripulación fue evacuada mientras cuatro remolcadores lo alejaban de la costa española.
Finalmente el buque se partió en dos y se hundió a 240 kilómetros del litoral portugués, en una zona de 4 mil metros de profundidad y muy baja temperatura, por lo que se confía en que cerca de 65 mil toneladas de petróleo se solidifiquen y no afecten las aguas marinas, flora, fauna y playas de Portugal, España y Francia. Los daños fueron incalculables, pues el Prestige llevaba a bordo el doble de petróleo que el Exxon Valdez, que en 1989 provocó una catástrofe frente a las costas de Alaska.



Figura 6.25 Undición del Buque Prestigue. [84]

Las casi 15 mil toneladas de petróleo que el barco griego derramó antes de hundirse formaron una mancha negra de casi 8 mil kilómetros cuadrados que, por la acción de las tormentas y los vientos naturales de la zona, se ha fragmentado y poco a poco arribó al litoral gallego. La contaminación que el buque provocó, afectó 300 kilómetros costeros, 90 playas, así como flora y fauna marinas de la región, de enorme riqueza pesquera y ecológica



Figura 6.26 Daños causados por el derramamiento del Buque Prestigue [85]

Ante la inquietud de saber cuántos litros reales había derramado el Prestige, cómo se movía y hasta dónde se extendía la marea negra, diversos grupos de investigación realizaron estudios para detener sus efectos negativos.



Figura 6.27 Derrame del buque *Prestige* [86]

Uno de ellos fue el Laboratorio de Percepción Remota del Instituto de Ciencias de la Atmósfera y del Clima (ISAC) de Bolonia, Italia, que al mando del doctor Flavio Parmiggiani inició un proyecto de verificación de imágenes tomadas por el Radar de Apertura Sintética (SAR) del satélite Envisat, propiedad de la Agencia Espacial Europea.



Figura 6.28 Zona del derrame de petróleo del buque *Prestige* [86]

Aunque el SAR puede tomar imágenes sin importar las condiciones climáticas o de iluminación, la desventaja es que son de muy baja calidad; es decir, demasiado ruidosas para que el ojo humano logre discernir las texturas de elementos en mar y tierra.

Con la finalidad de ayudar a detectar con precisión el derrame de petróleo en el Atlántico, se diseñó un esquema de segmentación multiventana de imágenes basado en la teoría de Campos Aleatorios de Markov, dicha teoría se basa en elementos estadísticos que ayudan a codificar restricciones contextuales en problemas de visualización gráfica.

La imagen que se utilizó para la aplicación de la propuesta del esquema de segmentación fue adquirida utilizando el Radar de Apertura Sintética (SAR) perteneciente al satélite ERS-2, el día 22 de diciembre de 2002 en la que se observan manchas de petróleo como consecuencia del derrame del buque "*Prestige*". Tiene una dimensión de 8131 x 8000 pixels con una resolución espacial de 12.5 metros y una resolución radiométrica de 256 niveles de gris.

Para la aplicación del esquema de segmentación propuesto se eligieron dos zonas representativas de la mancha de petróleo en donde de acuerdo a investigaciones realizadas por la Agencia Espacial Europea, se tiene certeza de presencia de petróleo.

La Zona1 es de 512 x 512 pixels en donde se presenta un buen contraste visual entre el mar y la mancha de petróleo, la estructura y forma de la mancha es sencilla a pesar de que presenta algunas partes difusas en el contorno.

La Zona2 forma parte de la misma mancha de petróleo que la Zona1. Su geometría es más complicada y difusa especialmente en la parte interna de la mancha en donde se puede apreciar regiones de mar que no fueron alcanzadas por el petróleo. A pesar de ello se logran distinguir las clases que se pretende segmentar.

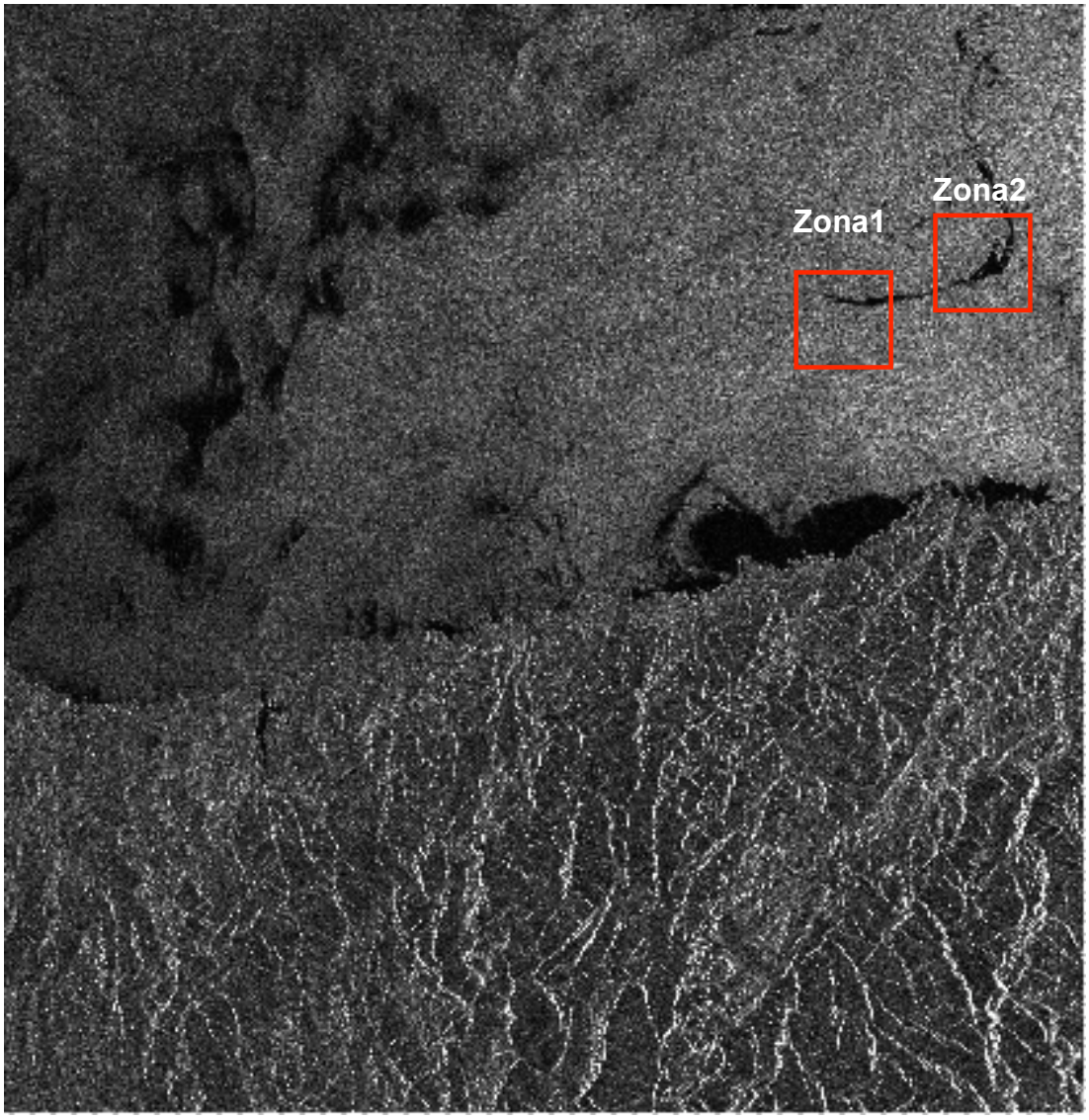


Figura 6.29 Imagen SAR tomada por el satélite ERS-2 de la zona del derrame de petróleo del buque *Prestige.*

A continuación se presentan los resultados de segmentación por el modelo markoviano multiventana de segmentación aplicado a las dos zonas de derrame de petróleo del buque "*Prestige*".

Se presenta primero la imagen original y la inicialización aleatoria $Y^{(0)}$. Después se presentan dos imágenes, para el caso de una ventana y dos ventanas obtenidas en 10, 20, 40 y 60 iteraciones, con el fin de visualizar fácilmente los resultados obtenidos y poder compararlos.

En cada figura se especifica:

- El nombre de la imagen y número de iteraciones.
- v.- tamaño de la ventana.
- d.- desplazamiento.
- Parámetros β_1 y β_2.

Los resultados obtenidos fueron los siguientes:

Imagen "Zona1"

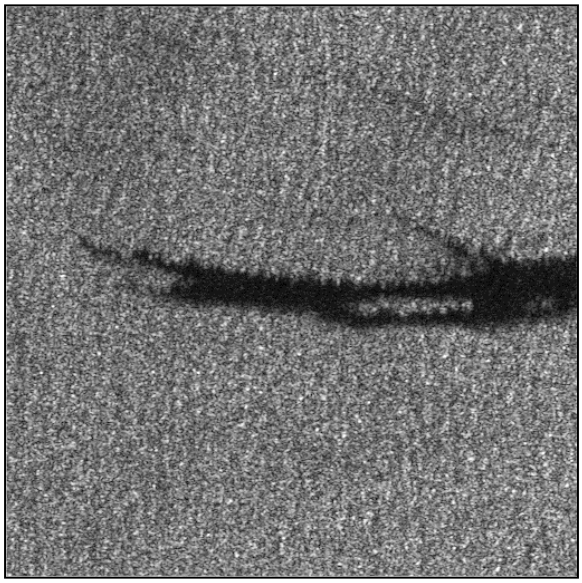


Figura 6.30 Imagen original "Zona1"

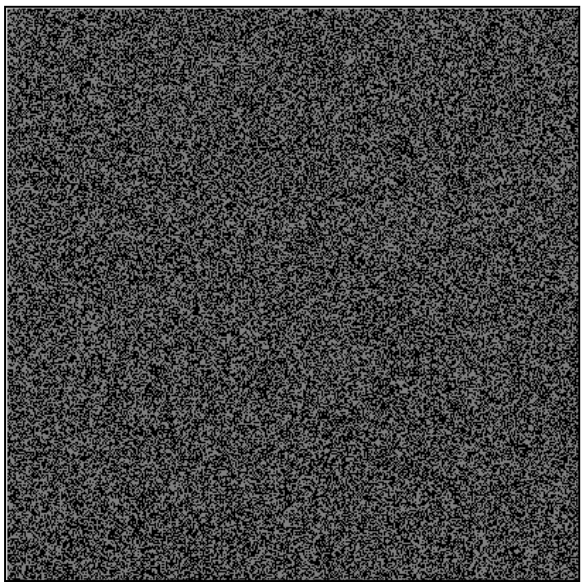
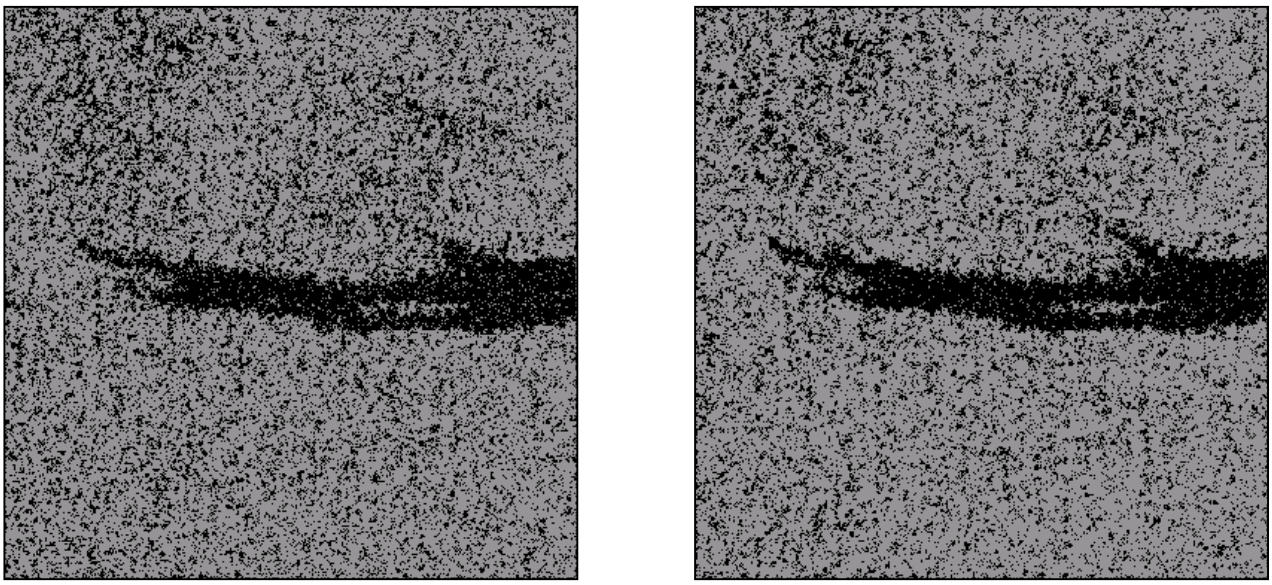


Figura 6.31 Imagen de inicialización $Y^{(0)}$

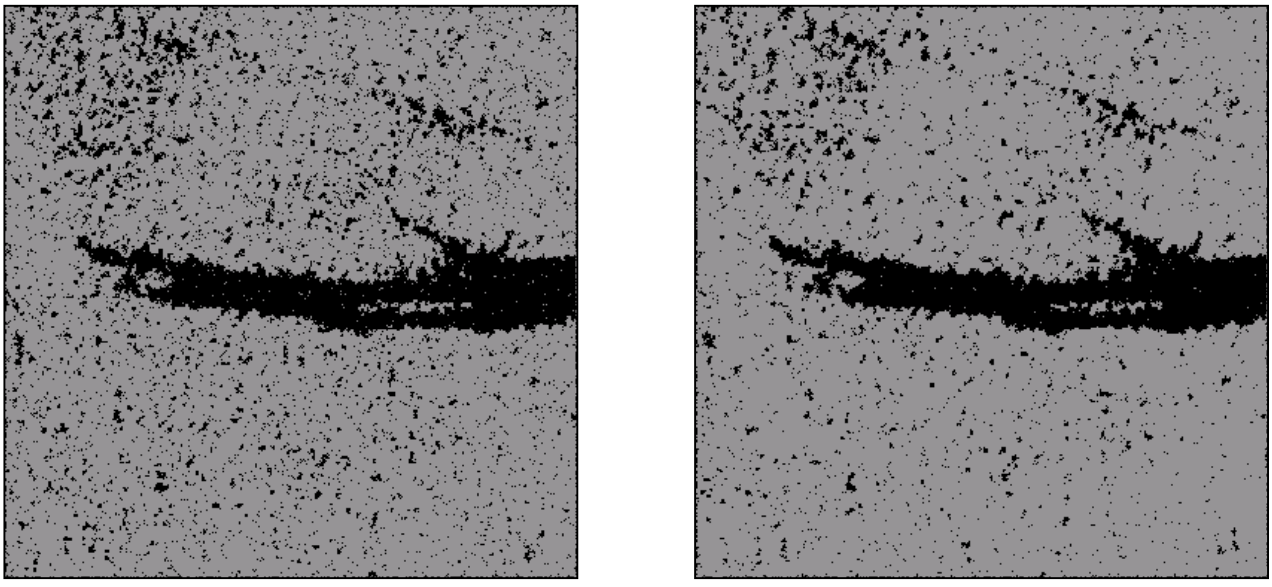
Resultados para 10 iteraciones de la imagen "Zona1"



(a) (b)

Figura 6.32 (a) v=3x3, d=1, β_1=0.35 (b) v=3x3, d=1, β_1=0.35 y v=5x5, d=2, β_2=0.1

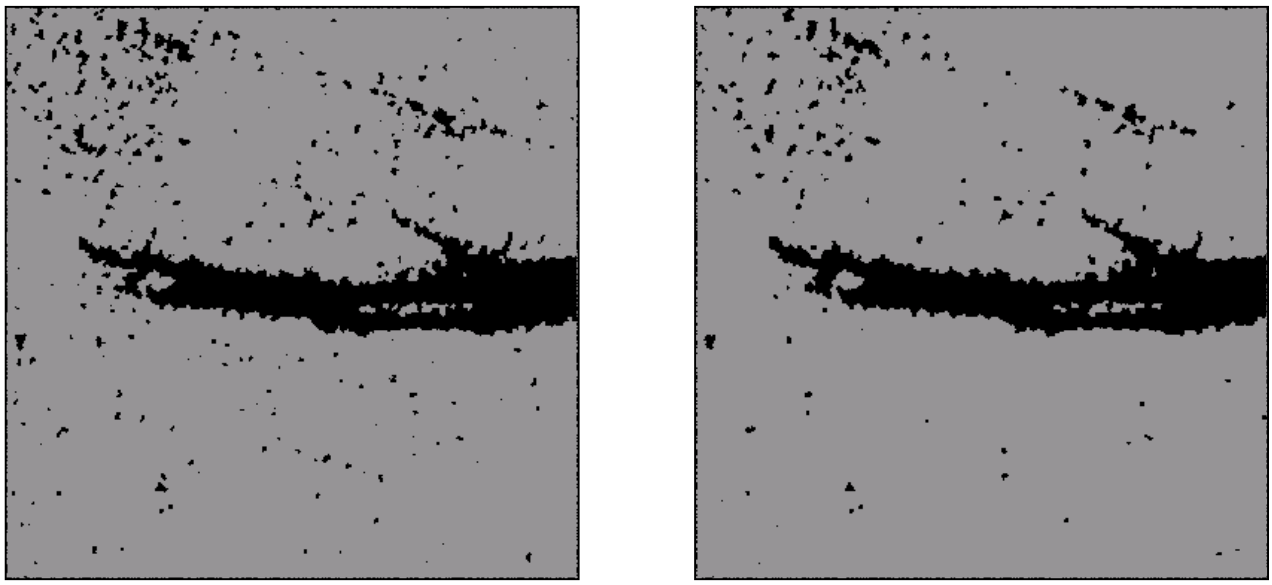
Resultados para 20 iteraciones de la imagen "Zona1"



(a) (b)

Figura 6.33 (a) v=3x3, d=1, β_1=0.35 (b) v=3x3, d=1, β_1=0.35 y v=5x5, d=2, β_2=0.1

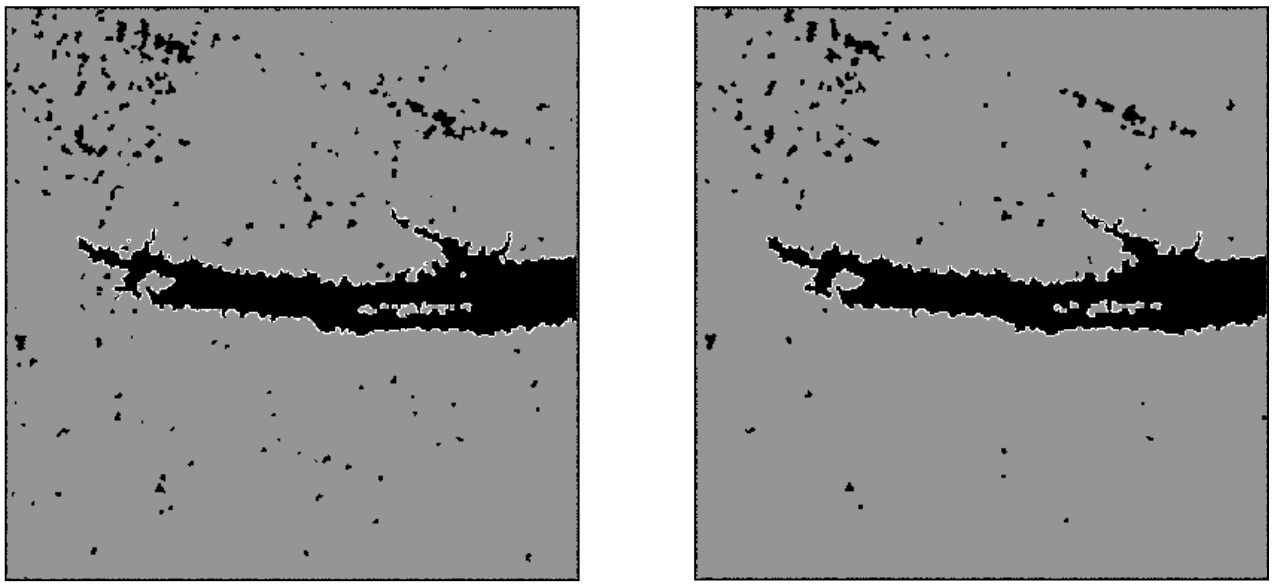
Resultados para 40 iteraciones de la imagen "Zona1"



(a) (b)

Figura 6.34 (a) v=3x3, d=1, β_1=0.35 (b) v=3x3, d=1, β_1=0.35 y v=5x5, d=2, β_2=0.1

Resultados para 60 iteraciones de la imagen "Zona1"



(a) (b)

Figura 6.35 (a) v=3x3, d=1, β_1=0.35 (b) v=3x3, d=1, β_1=0.35 y v=5x5, d=2, β_2=0.1

Imagen "Zona2"

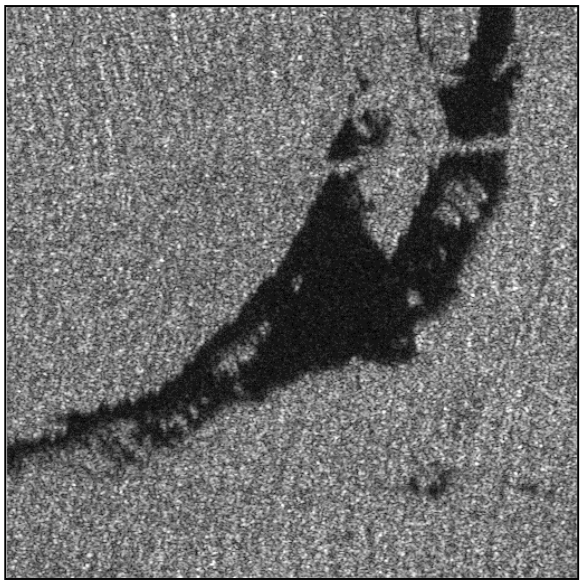


Figura 6.36 Imagen original "Zona2".

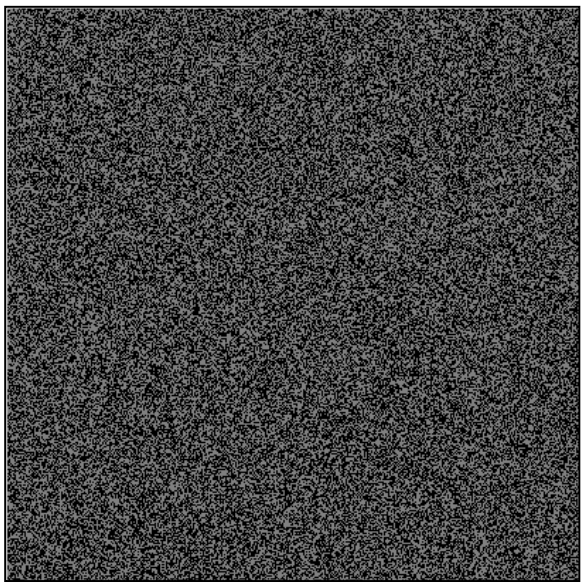
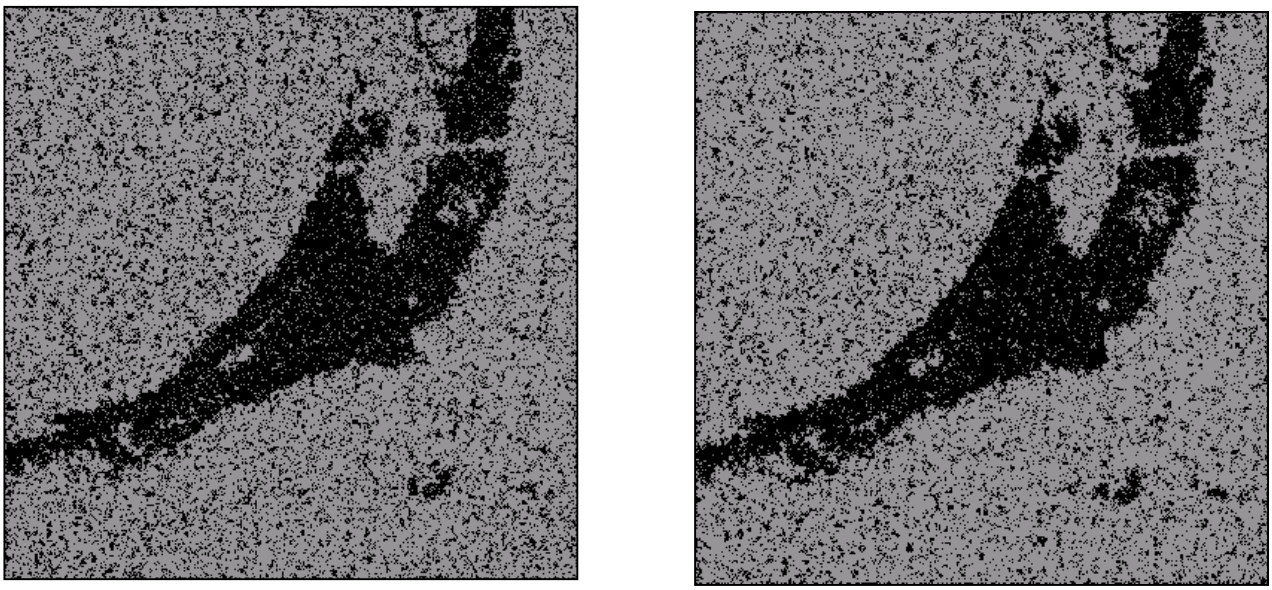


Figura 6.37 Imagen de inicialización $Y^{(0)}$.

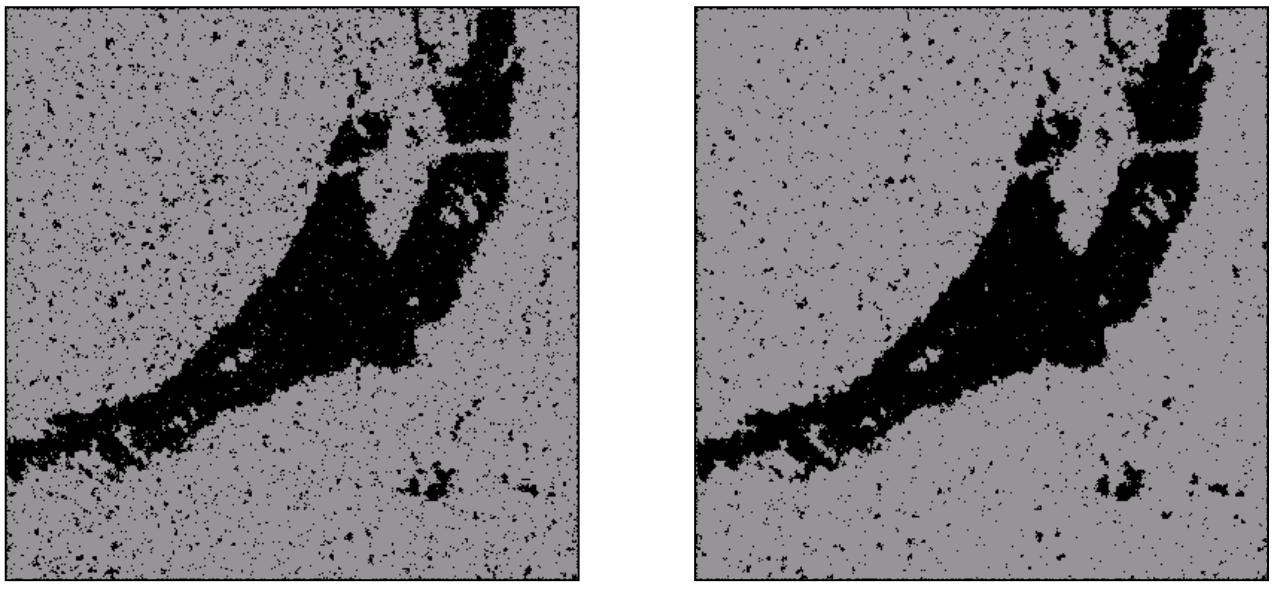
Resultados para 10 iteraciones de la imagen "Zona2"



(a) (b)

Figura 6.38 (a) v=3x3, d=1, β_1=0.35 (b) v=3x3, d=1, β_1=0.35 y v=5x5, d=2, β_2=0.1

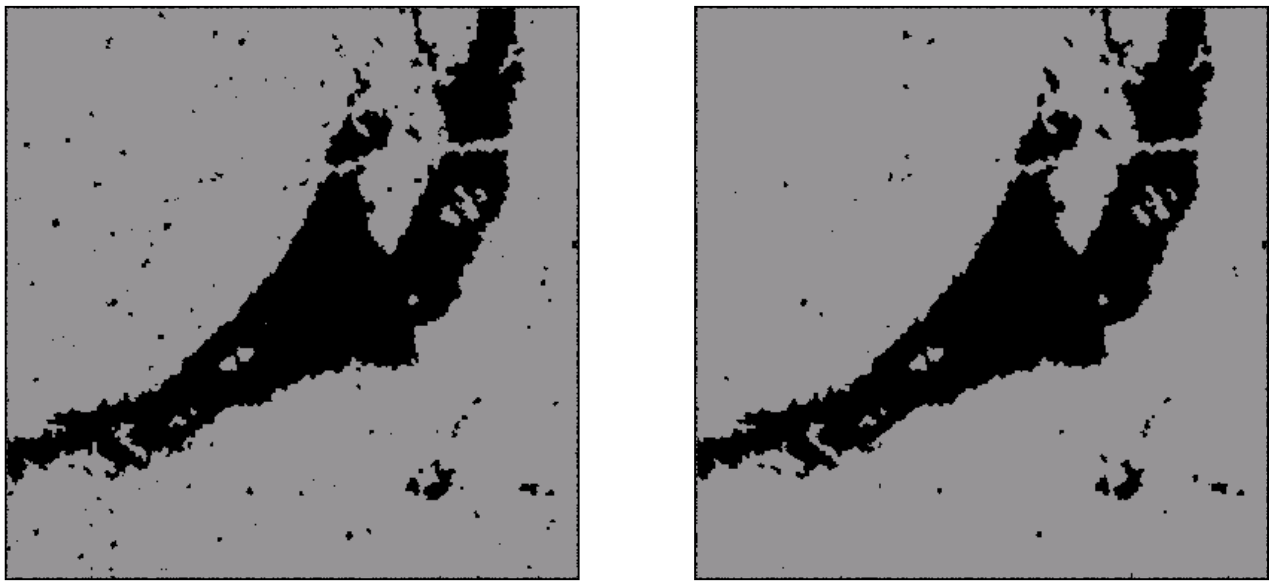
Resultados para 20 iteraciones de la imagen "Zona2"



(a) (b)

Figura 6.39 (a) v=3x3, d=1, β_1=0.35 (b) v=3x3, d=1, β_1=0.35 y v=5x5, d=2, β_2=0.1

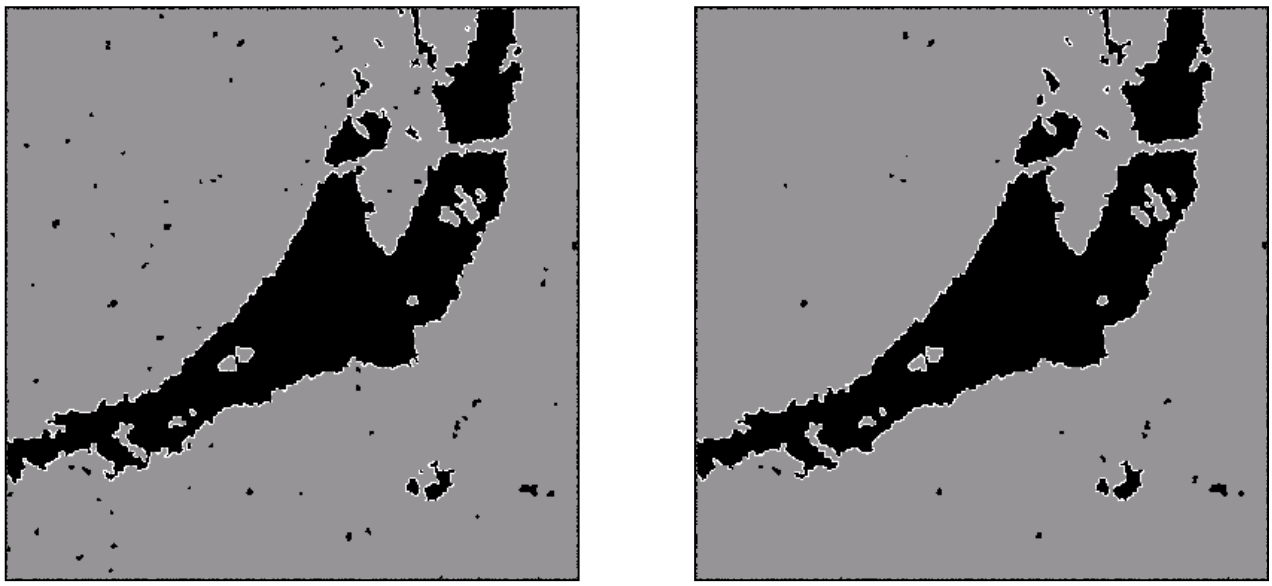
Resultados para 40 iteraciones de la imagen "Zona2"



(a) (b)

Figura 6.40 (a) v=3x3, d=1, β_1=0.35 (b) v=3x3, d=1, β_1=0.35 y v=5x5, d=2, β_2=0.1

Resultados para 60 iteraciones de la imagen "Zona2"



(a) (b)

Figura 6.41 (a) v=3x3, d=1, β_1=0.35 (b) v=3x3, d=1, β_1=0.35 y v=5x5, d=2, β_2=0.1

6.3 Comparación de funcionalidad

En esta sección observaremos las ventajas de utilizar el esquema multiventana de segmentación.

El esquema multiventana de segmentación se aplicó a las tres imágenes de fotografía aérea de alta resolución del Distrito Federal con parámetros iniciales de $T = 2$, $\beta_1 = 0.35$ y $\beta_2 = 0.1$ y la elección de cinco ventanas de entrenamiento dentro de cada imagen. Se obtuvieron resultados al aplicar el esquema de segmentación propuesto para 10, 20, 40 y 60 iteraciones. Cada imagen se obtuvo con 5 niveles de gris, definidos por la media de cada clase para lo cual se tomó en cuenta desde las zonas más obscuras hasta las más claras.

El esquema propuesto también fue aplicado a imágenes SAR, usando los mismos parámetros que en la fotografía aérea, en las que se logro segmentar las regiones de petróleo y no petróleo.

Con el fin de validar el desempeño del modelo markoviano multiventana de segmentación propuesto para evaluar sus ventajas y desventajas, los resultados fueron comparados con un método de segmentación estándar que fue el de K-medias.

A continuación se presenta el esquema comparativo de 4 imágenes por cada una de las imágenes procesadas por el esquema multiventana de segmentación propuesto. El esquema comparativo esta compuesto de la siguiente forma:

1. Imagen original.
2. Imagen segmentada por k-medias.
3. Imagen segmentada por una ventana (v= 3 x 3), resultado de 60 iteraciones.
4. Imagen segmentada con dos ventanas (v = 3 x 3 y v= 5 x 5) resultado de 60 iteraciones.

Imagen "Tlalpan"



Figura 6.42 Imagen original "Tlalpan".



Figura 6.43 Imagen segmentada por K-medias.



Figura 6.44 Imagen segmentada con una ventana (v= 3 x 3).



Figura 6.45 Imagen segmentada con dos ventanas (v=3 x 3 y v=5 x 5).

Imagen "Aeropuerto"



Figura 6.46 Imagen original "Aeropuerto".



Figura 6.47 Imagen segmentada por K-medias.



Figura 6.48 Imagen segmentada con una ventana (v= 3 x 3).

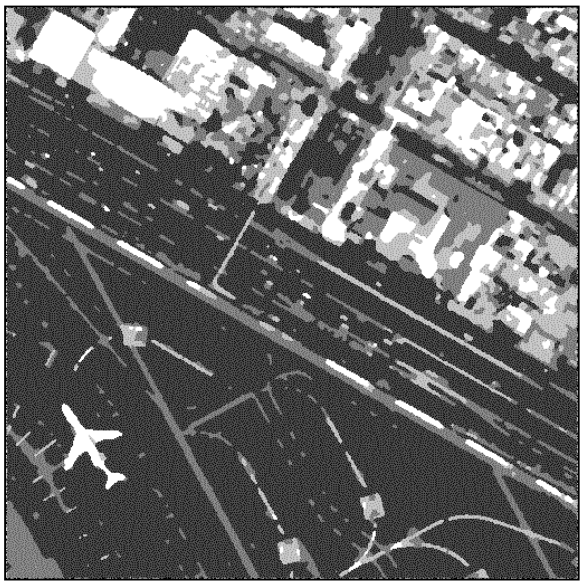


Figura 6.49 Imagen segmentada con dos ventanas (v=3 x 3 y v=5 x 5).

Imagen "Villa Olímpica"



Figura 6.50 Imagen original "Villa Olímpica".



Figura 6.51 Imagen segmentada por K-medias.



Figura 6.52 Imagen segmentada con una ventana (v= 3 x 3).

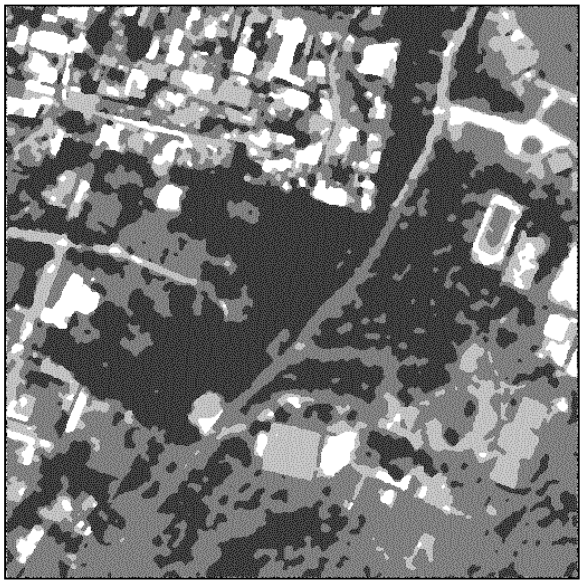


Figura 6.53 Imagen segmentada con dos ventanas (v=3 x 3 y v=5 x 5).

Imagen "Zona1"

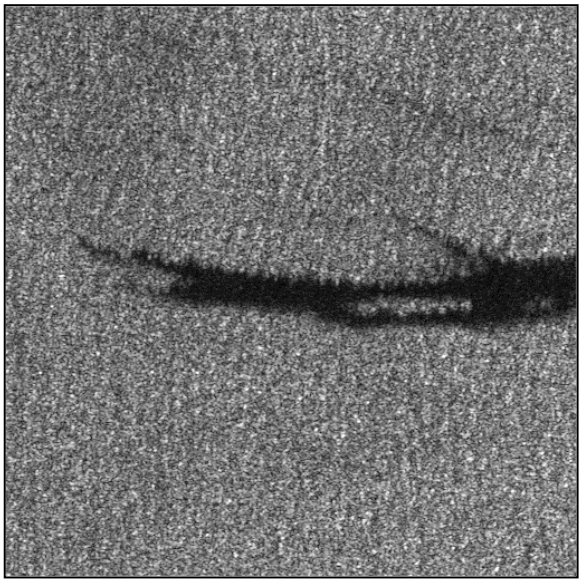


Figura 6.54 Imagen original "Zona1".

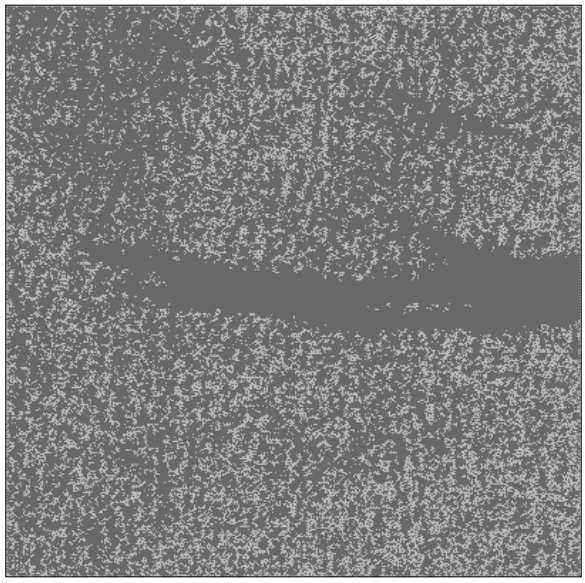


Figura 6.55 Imagen segmentada por K-medias.

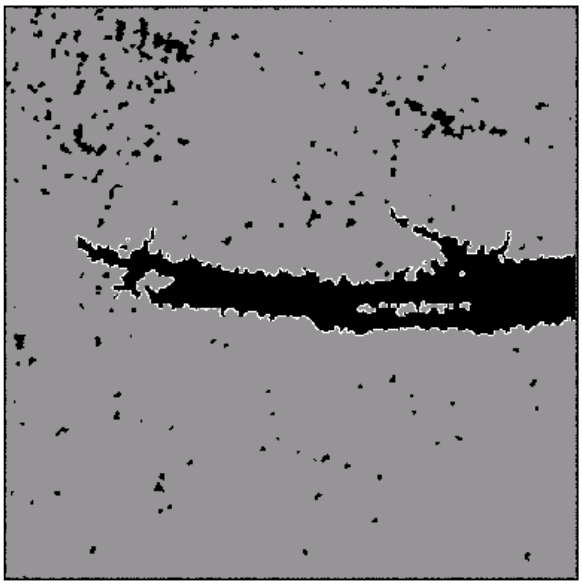


Figura 6.56 Imagen segmentada con una ventana (v= 3 x 3).

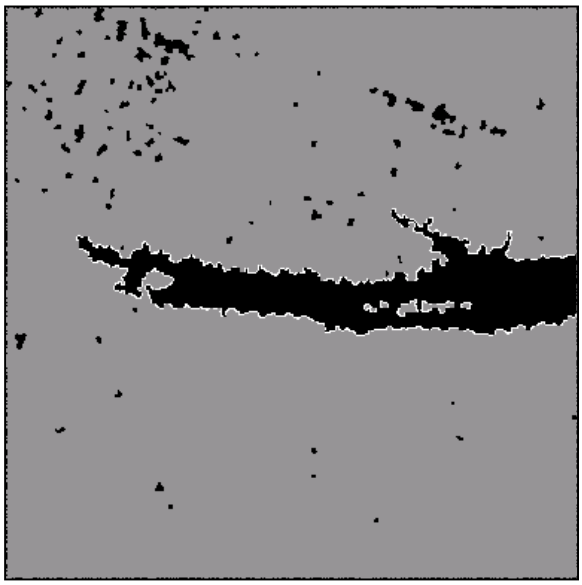


Figura 6.57 Imagen segmentada con dos ventanas (v=3 x 3 y v=5 x 5).

Imagen "Zona2"

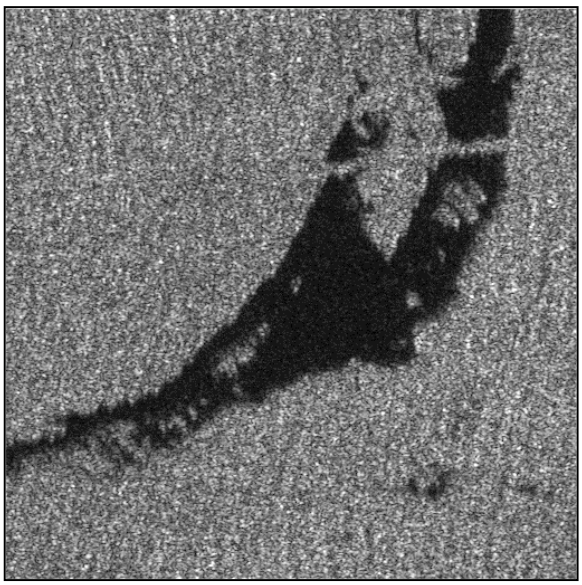


Figura 6.58 Imagen original "Zona2".

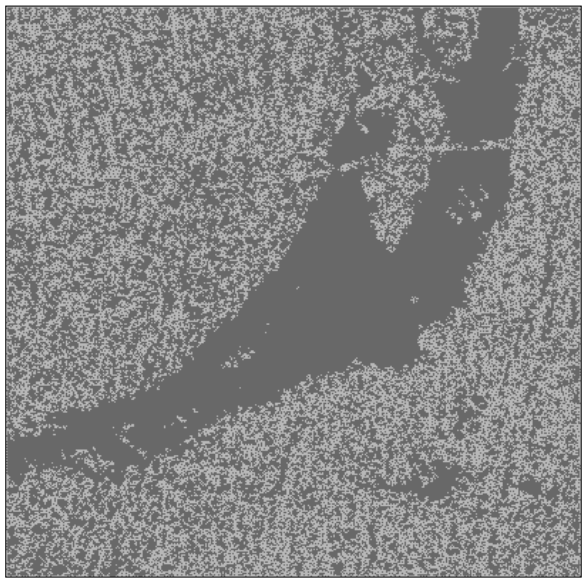


Figura 6.59 Imagen segmentada por K-medias.

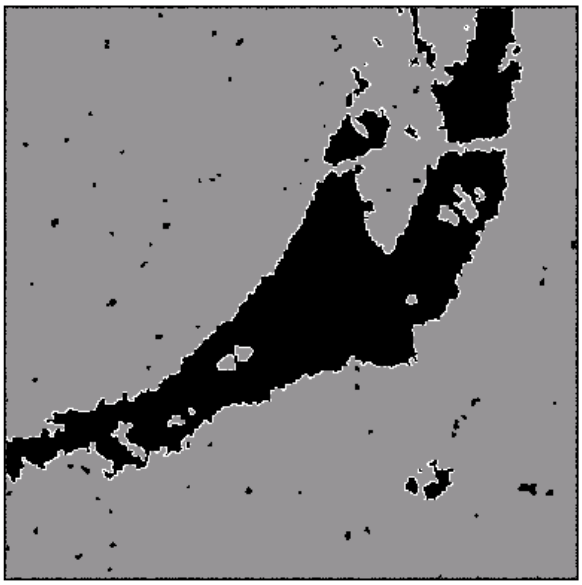


Figura 6.60 Imagen segmentada con una ventana (v= 3 x 3).



Figura 6.61 Imagen segmentada con dos ventanas (v=3 x 3 y v=5 x 5).

7

CONCLUSIONES

La aplicación de la percepción remota constituye una herramienta valiosa para muchas áreas de estudio. En los últimos años el hombre ha podido ver con asombro fotografías tomadas por sondas espaciales. Las imágenes recibidas han aportado tantos datos que los científicos aún trabajan en su recopilación, elaboración y análisis. Todo esto ha ayudado a entender con más detalle la estructura de nuestro planeta.

La utilización de las imágenes obtenidas por los satélites de percepción remota en México comenzó poco después del lanzamiento del Landsat 1. Desde entonces, las aplicaciones de estas imágenes han crecido rápidamente hacia la mayor parte de las áreas de investigación en usos de suelo y prospección de recursos naturales.

Así, por ejemplo, se puede determinar cuantitativamente la magnitud y zonas de crecimiento de la mancha urbana de la ciudad de México, por ejemplo, estableciendo claramente las regiones absorbidas por la ciudad, con la consecuente pérdida de áreas agrícolas o forestales. También se puede observar el cambio de la infraestructura industrial y vías de acceso asociadas a ella. Junto con un modelo numérico del terreno, los mapas topográficos resultan ser un apoyo fiel para el diseño del desarrollo socioeconómico, en general, del país.

En el desarrollo de esta tesis se implementó un modelo markoviano multiventana para la segmentación de fotografías aéreas de alta resolución de varias zonas de la ciudad de México y de imágenes SAR del derrame petrolero del buque "*Prestige*".

El objetivo principal de la tesis fue definir un esquema cooperativo de segmentación y aplicarlo para segmentar en 5 clases de niveles de gris las imágenes de fotografía aérea y en 2 clases las imágenes SAR para identificar las manchas de petróleo.

Para cumplir con el objetivo se plantearon tres etapas en el esquema de procesamiento, las cuales fueron:

- ✓ La determinación de parámetros fue muy importante para poder obtener resultados confiables y óptimos.
  Las imágenes originales se trabajaron en formato crudo (raw), en 256 niveles de gris y almacenando los valores de niveles gris en una matriz de 512 x 512. Se eligieron 5 ventanas de entrenamiento de diversos tamaños en las imágenes de fotografía aérea, que son matrices que nos representan un tono de gris y 2 ventanas de entrenamiento en las imágenes SAR.
  A cada una de estas matrices se les calculó su media y este valor representó uno de los 5 tonos de gris a segmentar en el caso de las fotografías aéreas y 2 tonos de gris en las imágenes SAR.

  Las ventanas de análisis que se utilizaron fueron de 3 x 3 y de 5 x 5 con distancia de $d = 1$ y $d = 2$ respectivamente.

Se definieron los parámetros de interacción entre pixels vecinos que fueron $\beta_1 = 0.35$ y $\beta_2 = 0.1$.

La temperatura inicial fue de $T^{(0)}$=2 para una buena convergencia y resultados óptimos.

- ✓ En la segunda etapa se segmentaron las imágenes usando el método de optimización de Recocido Simulado.

Este análisis se basó en los Campos Aleatorios de Markov que nos permiten considerar a la imagen como un CAM y considerar por medio de su propiedad de markovianidad que la probabilidad condicional de que un pixel determinado tenga un nivel de gris particular, dado los valores de todos los pixels restantes en la imagen, es igual a la probabilidad condicional dados los valores del campo en un conjunto pequeño de pixels, es decir, su vecindad.

Por medio del método MAP que consiste en encontrar la configuración que maximiza la distribución *a posteriori* $P(Y|X)$ podemos encontrar la pertenencia del pixel a una determinada clase. La aproximación MAP contiene tres términos, la probabilidad conjunta $P(X|Y)$, la probabilidad *a priori* $P(Y)$ y la probabilidad *a posteriori* $P(Y|X)$, así como las funciones de energía equivalentes.

La función de energía equivalente a la probabilidad conjunta $P(X|Y)$es $U(X|Y)$, para la que se definieron ventanas de la imagen original y se obtuvo la media correspondiente a cada clase, éstas se representaron por medio de funciones trapezoidales que nos indican qué tan probable es que el valor de nivel de gris del pixel analizado pertenezca a cada clase.

Para la probabilidad *a priori* $P(Y)$, la función de energía equivalente es $U(Y)$. Utilizamos la teoría de Campos Aleatorios de Markov para definir las restricciones contextuales en el modelo de energía *a priori*. Se analizaron únicamente cliques de dos pixels y consideramos que el CAM era homogéneo e isotrópico, es decir, los parámetros de interacción β_1 y β_2 fueron independientes de la posición y orientación del clique.

Para el análisis en 8-*conexidad* en el cálculo de $U(Y)$ se utilizaron el modelo de Potts y el modelo de Ising que son modelos de Markov, el primero de ellos se usa cuando se trata de dos clases y el segundo para dos o más clases. Se realizó un análisis en 8-*conexidad* primero con una ventana de 3 x 3 con distancia igual a 1, en la que se apreció que había algunos pixels no bien definidos dentro de las regiones ya segmentadas, aunque en general en los resultados de la segmentación se observan las clases definidas claramente.

En el caso multiventana, se realizó el análisis en 8-*conexidad* tanto en una ventana de 3 x 3 con distancia igual a 1 y en otra de 5 x 5 con distancia igual a 2 con el fin de conjuntar más información alrededor del pixel analizado. En los resultados se observó una segmentación más definida, ya que las regiones fueron más uniformes y homogéneas.

La energía *a posteriori* se estableció como la suma de la función de energía conjunta $U(X|Y)$ y la función de energía *a priori* $U(Y)$. Por último se minimizó la función de energía *a posteriori* usando el algoritmo de Recocido Simulado que nos asegura la convergencia hacia un óptimo global del problema.

El empleo del esquema de segmentación basado en la teoría de Campos Aleatorios de Markov nos proporciona una manera conveniente y constante de modelar las restricciones contextuales y las características espaciales correlacionadas.

- ✓ En la última etapa se obtuvieron resultados para cada imagen con una y dos ventanas a fin de realizar una comparación en la segmentación usando el modelo markoviano multiventana propuesto y usando otro método de segmentación como lo es el de K-medias.

  El esquema multiventana de segmentación propuesto ofrece buenos resultados en la segmentación de regiones en tonos de gris en las fotografías aéreas de la Ciudad de México.

  En el caso de una ventana, los resultados que se obtuvieron muestran una clara segmentación en regiones homogéneas, aunque presentan manchas muy pequeñas de pixels con tonos de gris, que no se alcanzaron a definir dentro de la región a la que pertenecen.

  Cuando se usaron dos ventanas, se involucró más información contextual alrededor del pixel, por lo tanto los resultados fueron mejores que en el caso anterior. Las regiones segmentadas son más homogéneas y definidas, en las que se puede distinguir los distintos tonos de gris de las clases, que en casos prácticos pueden representar zonas urbanas, zonas no urbanas, áreas de bosque, agua, calles, techos, etc.

  En comparación con los resultados obtenidos por el método de K-medias, se observó que el esquema propuesto presenta regiones homogéneas más grandes que no permiten distinguir detalles finos en la estructura de la escena, y se concluye que en el caso de fotografías aéreas el método absorbe las estructuras finas y permite segmentar en regiones grandes y homogéneas. En cambio, el algoritmo de K-medias presenta detalles más finos en la estructura de la escena en la que se puede distinguir mejor los objetos pequeños, aunque presenta algunas manchas pequeñas de pixels dentro de regiones que por CAM sí quedaron bien definidas.

  En los resultados obtenidos de las imágenes SAR usando una ventana, se observan numerosas manchas falsas alrededor de la mancha principal, debido a que una característica principal de las imágenes SAR es su naturaleza ruidosa y por medio de éste análisis no se permite eliminar en gran medida el ruido asociado a ellas. A pesar de ello, se logra percibir con claridad la zona del derrame de petróleo y el resultado es mucho mejor que la segmentación por K-medias.

  La segmentación de las imágenes SAR usando dos ventanas, se consideró como el mejor resultado obtenido tanto en nitidez como en la segmentación de zonas homogéneas de la mancha de petróleo. Se observa con claridad que incluyendo más información contextual se permite reducir en gran medida el ruido asociado a las imágenes SAR.

  Los resultados obtenidos en las imágenes SAR de una ventana y de dos ventanas fueron notablemente mejores a los resultados de la segmentación por el método de K-medias que presenta mucho ruido y una estructura deficiente de la mancha de petróleo.

En general, el tiempo de procesamiento de las imágenes fue entre 11 y 15 minutos dependiendo del número de clases a segmentar y de la imagen.

Con lo anterior, constatamos que los objetivos de la tesis se cumplieron eficazmente y que los resultados obtenidos pueden servir para un mejor análisis y desarrollo de áreas urbanas y aplicaciones en la agricultura, geología, hidrológica y climatología.

Una siguiente etapa para mejorar el método de segmentación propuesto sería realizar un método de segmentación combinado usando ventanas adaptables, a fin de obtener resultados en los que se puedan percibir las estructuras finas de la escena y regiones homogéneas bien definidas.

BIBLIOGRAFÍA

Capítulo 2

Páginas electrónicas

[1] http://www.teledet.com.uy/quees.htm
[2] http://www.ciat.cgiar.org/dtmradar/teledeteccion-concepto.htm
[3] http://omega.ilce.edu.mx:3000/sites/ciencia/volumen1/ciencia2/33/htm/sec_3.html
[4] http://www.oas.org/usde/publications/Unit/oea65s/ch09.htm#a.%20una%20visión%20general %20de%20atributos%20importantes%20de%20la%20percepción%20re
[5] http://www.fcagr.unr.edu.ar/catedras/mdt/GTS/Zonaedu/sensat1.htm
[6] http://www.fao.org/documents/show_cdr.asp?url_file=/DOCREP/003/T0355S/T0355S03.htm
[7] http://www.ciat.cgiar.org/dtmradar/images/pasivyact.gif
[8] http://www.innovanet.com.ar/gis/TELEDETE/TELEDETE/teledete.htm
[9] http://www.teledet.com.uy/fotoaerea.htm
[10] http://www.bmp.com.pe/newgeo/productos/imagenes/radar/radar.htm
[11] http://omega.ilce.edu.mx:3000/sites/ciencia/volumen1/ciencia2/33/htm/sec_4.html
[12] http://perso.club-internet.fr/tpouchin/images_monde/images/popocat.jpg
[13] http://www.ghcc.msfc.nasa.gov/GOES/goes_es.html
[14] http://www.profc.udec.cl/~gabriel/tutoriales/curso/cap02-espectro.PDF
[15] http://es.wikipedia.org/wiki/Rayos_X"
[16] http://www.astromia.com/glosario/radiactividad.htm
[17] http://www.ciencia-ficcion.com/glosario/r/radielec.htm
[18] http://canaltiempo.iespana.es/canaltiempo/radiacionelectromag.htm
[19] http://omega.ilce.edu.mx:3000/sites/ciencia/volumen1/ciencia2/33/htm/sec_6.html

Libros y revistas

[20] **La Percepción Remota**
Jorge Lira
Ed. La ciencia para todos, México 1987

[21] **Digital Image Processing**
Pratt William K.
Ed. John Wiley & Sons, 2ª. ed.
Estados Unidos, 1991.

[22] **Digital Image Processing**
Kenneth R. Castleman.
Ed. Prentice-Hall.
Estados Unidos, 1996.

[23]. **Digital Image Processing**
González, Rafael C. & Woods Richard E.
Ed. Addison-Wesley Publishing Company
Estados Unidos, 1993.

Capítulo 3

Páginas electrónicas

[24] http://envisat.esa.int
[25] http://www.meteored.com/ram/numero10/envisat1.asp
[26] http://www.eurimage.com/products/envisat.html
[27] http://www.eduspace.esa.int
[28] http://www.eumetsat.de/en/index.html?area=left2.html&body=/en/area2/cgms/ap10-11.htm&a=284&b=2&c=280&d=200&e=0
[29] http://www.esa.int/export/esaCP/ESA1ZKF18ZC_Spain_1.html
[30] http://www.esa.int/
[31] http://www.eurimage.com/products/landsat.html
[32] http://www.ltid.inpe.br/selper/image/espanhol/landsat2.html
[33] http://www.ltid.inpe.br/selper/image/espanhol/landsat3.html
[34] http://www.ltid.inpe.br/selper/image/espanhol/landsat4.html
[35] http://www.cartesia.org/data/apuntes/teledeteccion/landsat-analisis-visual.pdf
[36] http://www.skyrocket.de/space/index_frame.htm?http://www.skyrocket.de/space/doc_sdat/landsat-1.htm
[37] http://www.skyrocket.de/space/index_frame.htm?http://www.skyrocket.de/space/doc_sdat/spot-5.htm
[38] http://www.iafe.uba.ar/tele/recursos/tele-generalidades.pdf
[39] http://www.spotimage.fr/spot5/ensavoirplus/esp/plus_reso.html
[40] http://www.eurockot.com/alist.asp?cnt=20040805
[41] http://smsc.cnes.fr/PLEIADES/Fr/PDF/vega.pdf
[42] http://smsc.cnes.fr/PLEIADES/GP_satellite.htm

Capítulo 4

Páginas electrónicas

[43] http://nutriserver.com/Cursos/Bioestadistica/Distribuciones_Continuas.html
[44] http://www.fisterra.com/mbe/investiga/distr_normal/distr_normal.htm#Figura%201
[45] http://www.ideamas.cl/cursoProb/javaEstat/central_limit_theorem/clt.html
[46] http://www.aulafacil.com/CursoEstadistica/Lecc-38-est.htm
[47] http://server2.southlink.com.ar/vap/DISTR-PROB.htm
[48] http://valbuena.fis.ucm.es/expint/html/fises/tlc/tlc.html
[49] http://www.itlp.edu.mx/publica/tutoriales/investoper2/tema44.htm
[50] http://docencia.udea.edu.co/ingenieria/procesosestocasticos/
[51] http://www.mor.itesm.mx/~esucar/Clases-incer/clase07-cm.ppt
[52] http://thales.cica.es/rd/Recursos/rd98/Matematicas/28/8.html
[53] http://www.dccia.ua.es/~miguel/tesis/tesis006.html
[54] http://www.fing.edu.uy/inco/cursos/aprendaut/bayesiano.pdf
[55] http://calisto.sip.ucm.es/people/pedro/aa02/05bayesiano.pdf
[56] http://www.itch.edu.mx/academic/industrial/sabaticorita/_private/08Teorema%20de%bayes.htm
[57] http://apphys.uned.es/actividades/no_reglada/laboratorio/segmentacion3.pdf
[58] http://www.virtual.unal.edu.co/cursos/ingenieria/2001832/lecciones/hmm1.html
[59] http://www.gdl.cinvestav.mx/~jramirez/Tesis_RTO.pdf
[60] http://www.esi2.us.es/~dco/recocido.htm
[61] http://www.azc.uam.mx/publicaciones/enlinea2/3-2rec.htm
[62] http://www.dm.uba.ar/materias/optimizacion/2005/1/SimAnneal.doc
[63] http://w3.mor.itesm.mx/~emorales/Cursos/Busqueda04/node79.html

[64] http://www.esi2.us.es/~dco/recocido.html

Libros y revistas

[65] **Probabilidad y Estadística. Aplicaciones y Métodos**
George Canavos
Ed. McGraw-Hill, 1ª. Ed.
México, 1994.

[66] **Teorema del Límite Central**
Jimena Blaiotta y Pablo Delieutraz
Universidad de Buenos Aires Facultad de Ciencias Exactas y Naturales 2004

[67] **Procesos Estocásticos y Estimación de Parámetros**
Miguel Angel Lagunas Cap. II, 2003

[68] **Aplicación de los modelos de campos aleatorios de Markov en visión artificial**
M. Pujol, R. Rizo, P. Arques, P. Compañ, F. Escolano, R. Molina
Departamento de Ciencia de la Computación e Inteligencia Artificial y F. Pujol
Departamento de Tecnología Informática y Computación
Universidad de Alicante Número 4, Octubre 2000.

[69] **Campos aleatorios de Markov**
Marcos Martín Fernández
4 de mayo de 2004

[70] **Aprendizaje Automático: Notas sobre Teoría de Decisión Optima.**
Dr. Alejandro Guerra Hernández
Facultad de Física e Inteligencia Artificial, Universidad Veracruzana
Maestría en Inteligencia Artificial
Sebastián Camacho No. 5, Xalapa, Ver., México 91000
Febrero 12, 2004

[71] **Simulación Metropolis-Montecarlo del Modelo Ising en Dos Dimensiones**
Lic. Paul Blackburn
Facultad de Física, Pontificia Universidad Católica de Chile.

Capítulo 5

Libros y revistas

[72] **Evaluación de Filtros para la Reducción del Ruido Multiplicativo en Imágenes Synthetic Aperture Radar**
Alma Delia Nieto Yáñez, Apolinar Ramírez Saldivar
Instituto Tecnológico de Ciudad Madero, México

[73] **Un criterio óptimo para coordinar estabilizadores enfocado mediante una técnica global heurística**
Rubén Tapia Olvera
Centro de Investigación y Estudios Avanzados del IPN, Unidad Guadalajara
Agosto 2002.

[74] **SVD y tratamiento de imágenes**
Jesús Gago-Vargas

[75] **Propuesta de características robustas para segmentación de imágenes**
P. Arques, P. Compañ, F. Escolano, R. Molina, M. Pujol, R. Rizo
Departamento de Ciencia de la Computación e Inteligencia Artificial
Universidad de Alicante.

[76] **Monitoring Oil –Spill Pollution in the Mediterranean with ERS SAR**
P. Pavlakis, A. Sieber, y S. Alexandry, ESA-ESRIN,
Jun. 1996.

[77] **Automatic Detection of Oil Spill in ERS SAR Images**
A. Solberg, G. Storvik, R. Solberg, y E. Volden
IEEE Trans. on Geosci. and Remote Sensing, vol. 37, No. 4, Jul. 1999.

[78] **Restoration of Polarimetric SAR Images Using Simulated Annealing**
J. Schou y H. Skriver
IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, vol. 39, No. 9, 2001.

[79] **Oil Spill Monitoring.**
Tromsø Satellite Station(TSS).

[80] **Markov Random Field, Modeling in Computer Vision**
S.Z. Li
Ed. Springer-Verlag

Capítulo 6

Páginas electrónicas

[81] http://iceac.sarenet.es/cuadernoss/bigarrena/presti1.jpg
[82] http://cultura.terra.es/addon/img/cac/ciencia/b8d083prestigartp.jpg
[83] http://webs.uvigo.es/c04/webc04/prestige/prestige/20021119184229.jpg
[84] http://www.nocompares.com/files/an2002/prestige-4-hilitos.jpg
[85] http://www.nocompares.com/files/an2002/prestige-ave.jpg
[86] http://archivo.greenpeace.org/costasPrestig/C-comunicados13.htm
[87] http://www.jornada.unam.mx/2002/11/25/021a1pol.php?origen=opinion.html