

5
291.



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

Transformada polinomial y campos aleatorios
de Markov: una aplicación a la detección de líneas
de costa en imágenes de radar de apertura sintética

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:
INGENIERO EN TELECOMUNICACIONES
P R E S E N T A:

RICARDO MENDEZ ACEVEDO

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

DIRECTOR DE TESIS:
DR. MIGUEL MOCTEZUMA FLORES



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

México, D. F.

1997



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

Transformada polinomial y campos aleatorios de Markov: una aplicación a la detección de líneas de costa en imágenes de radar de apertura sintética.

Ricardo Méndez Acevedo.

A Dios, a Jeanne y a mis padres.

Agradecimientos:

Deseo agradecer de la manera más atenta a una serie de personas e instituciones que contribuyeron grandemente a que este sueño se hiciera realidad.

A Dios por su poder infinito.

A Jeanne por su compañía y por todo lo que ha sido para mí.

A mis padres por su incondicional apoyo y comprensión.

A mis hermanos por haber confiado en mí.

A la Fundación Lorena Alejandra Gallardo por su oportuna ayuda.

Al Doctor Miguel Moctezuma Flores por su gran paciencia.

Al Ingeniero Alfonso López Tapia por su confianza y apoyo.

Al Ingeniero Carlos Castillo Tejero por su apoyo y confianza en mí como parte del PARA.

Al Doctor Alejandro Rodríguez Valdés por siempre estar dispuesto a ayudarme.

A mis amigos Iván, Erik y Carlos por su sincera amistad.

A todos mis profesores por dar lo mejor de sí en el salón de clases.

Y en general a todos mis amigos.

GRACIAS.

Índice.

Introducción	7
Capítulo I.	
Radargrametría: Teoría y aplicaciones.	
1.1 ¿Qué es la radargrametría?.	11
1.2 Confiabilidad de la información radargramétrica.	14
1.3 Tópicos de la radargrametría.	15
1.4 Imágenes <i>Side-Looking Radar</i> .	16
1.5 Radar de Apertura Real o de fuerza bruta.	18
1.6 Radar de Apertura Sintética (SAR).	20
1.6.1 El primer paso: generación del firm de la señal.	21
1.6.2 El segundo paso: transformación de la señal en una imagen de mapa correlación de la imagen SAR.	22
1.6.3 Otros puntos de vista de SAR.	22
1.7 Diferencias relevantes en radargrametría entre radares de apertura sintética y de apertura real.	23
1.8 SLR en un satélite.	24
1.9 Caracterización y restauración de imágenes SAR.	24
1.10 Aplicaciones del sistema SAR.	
1.10.1 Interferometría SAR.	25
1.10.2 Imágenes de radar planetarias tomadas desde la Tierra.	27
1.10.3 Rastreo de hojas de helios árticos con imágenes SAR.	28
1.10.4 Mapeo de imágenes de radar a una escala de 1:50.000.	29
1.11 Estado actual.	30
1.11.1 Progreso con datos SAR.	31
1.11.2 Progreso radargramétrico.	32
1.11.3 Radar para cartografía.	33
1.11.4 Iconometría de sensor independiente.	33
Capítulo II.	
Sistemas Satelitales.	
2.1 ERS-1 (ESA Remote-Sensing Satellite I).	
2.1.1 Introducción.	35
2.1.2 Objetivos de la misión.	37
2.1.3 El satélite.	38
2.1.4 Segmento de Tierra (Ground Segment).	40
2.1.5 Capacidades operacionales.	42

2.1.6 Fases de la misión.	44
2.1.6.1 Adquisición de órbita (Orbit acquisition).	44
2.1.6.2 "Commissioning Phase".	44
2.1.6.3 Primera fase de hielo.	45
2.1.6.4 Fase multidisciplinaria.	45
2.1.6.5 Segunda fase de hielo.	46
2.1.6.6 Fase geodésica.	47
2.2 ERS-2 (ESA Remote Sensing Satellite 2).	47
2.2.1 Fases de la misión.	47
2.2.2 Desarrollo de las misiones.	48
2.3 Programa Landsat.	48

Capítulo III.

La Transformada Polinomial. Teoría.

3.1 Introducción.	51
3.2 Transformada polinomial unidimensional.	53
3.3 Transformada hermitiana unidimensional.	56
3.4 Transformada polinomial en dos dimensiones.	58
3.5 Transformada hermitiana en dos dimensiones.	63
3.6 Conclusiones.	64

Capítulo IV.

Campos Aleatorios de Markov.

4.1 Sistemas de vecindad y cliques.	65
4.2 Campos aleatorios de Markov y distribución de Gibbs.	68
4.3 El modelo.	70
4.4 Modelo de Ising.	71
4.5 Modelo de Potts.	72
4.6 Algoritmo de simulación y optimización.	
4.6.1 Algoritmo de simulación.	73
4.6.1.1 Muestreador de Gibbs.	74
4.6.1.2 Algoritmo de metrópolis a temperatura constante.	75
4.6.2 Algoritmo de optimización.	76
4.6.2.1 Algoritmo Máximo a Posteriori (Maximum a Posteriori MAP).	77
4.6.2.2 El recocido simulado.	78
4.7 Conclusiones.	81

Capítulo V.**Detección de líneas de costa en imágenes SAR mediante el empleo de la Transformada Polinomial y Campos de Markov.**

5.1	Introducción.	82
5.2	Pirámide Gaussiana.	84
5.3	La transformada polinomial.	89
5.4	Algoritmo de K-means.	92
5.5	Aplicación del modelo de Potts de campos de Markov y extracción de la línea de costa en baja resolución.	98
5.6	Aplicación del modelo de Ising y detección final de la línea de costa en alta resolución.	103

Capítulo VI.**Conclusiones y análisis de resultados.**

6.1	Discusión de los resultados.	110
-----	------------------------------	-----

Bibliografía.**113**

Introducción.

La historia del procesamiento digital de imágenes data de unas cuantas décadas solamente. Lo anterior es debido, no a la falta de teoría matemática aplicable para este campo sino a que hasta hace poco era casi imposible realizar cualquier tipo de procesamiento debido a la falta de capacidad tanto de velocidad como de almacenamiento de las computadoras existentes. Con el advenimiento de las nuevas tecnologías ha sido más fácil, también, implantar sistemas de procesamiento de imágenes, y en general de señales, adaptarlos, modificarlos y mejorarlos fácilmente.

Una aplicación muy importante del procesamiento de imágenes se encuentra en la detección de líneas de costa aplicable a muchas ramas de la ciencia como lo son la geografía, la geofísica y la cartografía. Aplicaciones como la navegación automática requieren de información exacta de líneas de costa.

Mediante el estudio de la evolución temporal de las líneas de costa podría llegarse a conclusiones importantes en el ámbito geográfico o ecológico. Por ejemplo, las costas de la Guyana francesa están sometidas a una fuerte influencia del sistema de dispersión amazónica. Ello se debe a las variaciones significativas de las zonas erosionadas y de sedimentación [31].

Las imágenes de Radar de Apertura Sintética pueden ser de gran utilidad en el estudio de la anterior tarea, tomando algunos minutos lo que antes costaba meses de exploración marina y geográfica. Los Radares de Apertura Sintética adquieren mayor importancia en comparación con la fotografía aérea convencional, debido a que son capaces de lograr tomas incluso en condiciones meteorológicas adversas, como es el caso de precipitaciones, densas capas de nubes, corrientes de vientos, etc..

Sin embargo, las imágenes de Radar de Apertura Sintética presentan el problema de que una gran cantidad de ruido (*speckle*) se agrega a la señal original, lo que origina imágenes de baja calidad. Lo anterior hace muy difícil la extracción de información e incluso puede no garantizar una buena precisión en la estimación de la regiones u objetos de una escena. Ante tales problemas, la detección de líneas de costa en este tipo de imágenes no queda aislada y ha permanecido sin resolver.

Lee y Jurkevich [4] intentan una separación entre el mar y la tierra antes de aplicar un algoritmo de detección de líneas de costa para imágenes SAR. Utilizan una secuencia de procedimientos de baja resolución así como un algoritmo de rastreo de contornos. En general, el filtrar y el usar procedimientos de baja resolución se traduce en pérdidas en la precisión de la detección. Wu [5] propone una combinación de una representación piramidal con una propagación dinámica para la detección de líneas de costa. Al utilizar campos aleatorios de Markov (MRF), las propiedades locales se emplean para modelar las propiedades generales de la imagen. Modelar las interacciones entre los píxeles adyacentes se ha convertido en un método ampliamente usado en el procesamiento de imágenes. En este contexto, Zhang [6] procede a la separación entre el mar y la tierra por medio de la distribución de Gibbs. Sin embargo, al no existir compensación para la correlación del ruido, este método puede arrojar segmentaciones erróneas cuando se aplica a imágenes moderadamente ruidosas como es el caso de las imágenes tratadas aquí.

El ruido complica las propiedades estadísticas de la imagen. Así pues, el poder de discriminación de los estimadores clásicos se ve reducido drásticamente. Los modelos de filtrado de ruido basados en modelos de ruido independientes no funcionan debido a la correlación y las características del ruido dependientes de la imagen. De la discusión anterior se desprende que:

- Previamente es necesario aplicar un filtrado que no dañe los contornos principales (los de alto contraste, como lo son las costas).
- Posteriormente proceder a la aplicación de un método de segmentación que conduzca indirectamente a la detección de la línea de costa.

El presente trabajo propone un método mediante el cual pueden obtenerse mejores resultados en la detección de líneas de costa. Se trabaja con imágenes tomadas por el satélite ERS-1 de la Agencia Espacial Europea, correspondientes a una toma de la Guyana francesa en años diferentes durante la misma época del año, de dimensiones de 1024X1024 píxeles cada una de ellas. Primero se hace una pirámide de la imagen original, trabajando en un nivel de 256X256 píxeles. Con la información de los dos niveles se procede a restaurar la imagen mediante el empleo de la Transformada Polinomial Hermilitiana. Ya de aquí, se pasa al empleo de los campos de Markov para la separación de las regiones y para la detección de la línea de costa.

Las figuras 1 y 2 muestran una escena tomada por el satélite ERS-1 en los años 1992 y 1993 con un año de diferencia aproximadamente. Cada escena está compuesta de tres ventanas de 1024X1024 píxeles. Una de las imágenes en las que se aplica el algoritmo de detección de líneas de costa es la primera de las ventanas en la figura 1 viendo de izquierda a derecha.

Previo al desarrollo del método se exponen los antecedentes teóricos que lo sustentan. Así pues, en el capítulo I se da una explicación de lo que es la radargrametría, sus principios y sus aplicaciones de manera general. El capítulo II da una descripción breve de tres de los principales sistemas satelitales de percepción remota en el mundo: el ERS-1, ERS-2 y Landsat. Los primeros dos son proyectos administrados por la Agencia Espacial Europea y el último forma parte de un programa de la NASA. En el capítulo III se exponen los principios teóricos de la Transformada Polinomial, así como un método para la detección de contornos. El capítulo IV trata la teoría de los Campos Aleatorios de Markov así como diferentes métodos implantados para la separación o segmentación de regiones, en este caso del mar y la tierra. El capítulo V expone detalladamente el método mencionado en los párrafos anteriores, presentando los resultados obtenidos con diferentes parámetros y dando una explicación de cada caso. Finalmente, en el capítulo VI, se presentan las conclusiones, la discusión del método y las posibles mejoras para un trabajo posterior a fin de definir un método más funcional.



Figure 1. Escena tomada por el satélite ERS-1. Fecha de adquisición: 29 de noviembre de 1992. El tamaño de cada sub-imagen es de 1024x1024 píxeles.



Figure 2. Escena tomada por el satélite ERS-1. Fecha de adquisición: 14 de noviembre de 1993. El tamaño de cada sub-imagen es de 1024x1024 píxeles.

CAPÍTULO 1.

RADARGRAMETRÍA, TEORÍA Y APLICACIONES.

1.1 ¿Qué es la radargrametría?.

La palabra radargrametría data de tres a cuatro décadas atrás. El libro *Radargrammetry* de D. Levine, publicado en 1960 define la radargrametría como "la ciencia de obtener medidas confiables por medio de radar". Esta es una definición muy extensa para el trabajo contemporáneo con imágenes de radar porque la definición de Levine engloba sistemas de radar de imágenes y datos. Una definición más adecuada es la siguiente:

Radargrametría es la tecnología de extraer información de objetos y regiones de imágenes de radar.

Claramente, existen dos vertientes derivadas de esta: el procesamiento de coordenadas basado en un modelo matemático del sensor y el procesamiento de los diferentes valores de grises de los píxeles basado en un modelo radiométrico de un procesamiento de imágenes. La primera vertiente es tan vieja como las imágenes de radar en sí. La segunda se deriva de la ventaja de los sistemas de procesamiento digitales de imágenes de radar.

Las imágenes de radar y radargrametría surgen en el contexto militar y pronto se extienden, incluyendo a las aplicaciones científicas. El *Side-Looking Radar* (SLR) es actualmente, el dispositivo de imágenes esencial usado para radares de percepción remota. El radar de escaneo circular (*plan-position indicator*, PPI) fue el predecesor y el objeto de estudio en los años 50 y 60, pero ahora este no tiene papel en percepción remota. Ésta última resulta ser una herramienta importante para la navegación y monitoreo de tráfico.

El SLR fue usado extensivamente para un rápido reconocimiento de vastas zonas, regiones previamente inexploradas de los diferentes continentes y para el estudio de los fenómenos oceanográficos. Como resultado de ello, se generaron mapas de imágenes SLR a una escala de 1:250,000 de países enteros, tales como Brasil (Azevedo, 1971); Venezuela (McKeon, 1979), entre otros.

Las preguntas acerca de la utilidad del SLR en aplicaciones geocientíficas ahora se han convertido en el objeto de estudio de un creciente número de científicos en todo el mundo. La tendencia puede observarse en los Estados Unidos con el "Shuttle Imaging Radar" (SIR) y el "Earth Observation System" (EOS); Europa con el "Earth Resources Satellite", ERS-1 y ERS-2; Japón con el "Japanese Earth Resources Satellite", JERS-1; y en Canadá con el proyecto RADARSAT. Las aplicaciones de este trabajo y misiones son evidentes no sólo en el mapeo exploratorio, sino también en el estudio detallado y monitoreo de fenómenos cambiantes, tales como vegetación, inundaciones, bloques de hielo y procesos globales, entre otras.

Una razón que motiva al uso del radar es que utiliza microondas, las cuáles son capaces de penetrar nubes y lluvia y, por lo tanto, una operación SLR es independiente de las

condiciones climatológicas, contrario a la fotografía aérea. Algunas ventajas adicionales de las imágenes de radar contra otros sistemas de imágenes se mencionan a continuación:

Ventajas primarias

- Penetra nubes y sirve como sensor independientemente de las condiciones climatológicas prevalecientes.
- Puede producir vistas sinópticas de áreas extensas, típicamente a escalas de 1:50,000 a 1:400,000.
- La cobertura puede obtenerse rápidamente en tiempos específicos.
- Permite tomas de imágenes a diferentes ángulos dando resultados en diferentes perspectivas.

Ventajas secundarias

- Tiene el potencial de penetrar vegetación, superficies de capas de nieve, etcétera.
- Provee su propia iluminación, y así la controla sobre el ángulo de iluminación.
- Emplea longitudes de onda diferentes a las de los sensores fotográficos, con lo que da información diferente (sobre superficies rugosa, propiedades dieléctricas, humedad).
- Facilita que la resolución sea independiente de la distancia al objeto variando la resolución de 1 x 1 m. a 10 x 10 m.
- Puede usar efectos de polarización.
- Puede operar simultáneamente a diferentes longitudes de onda, por lo que tiene potencial multiespectral.
- Puede obtener imágenes de ondas oceánicas, incluso a distancias orbitales.
- Es capaz de producir imágenes sobrepuestas para vista estereoscópica.
- Soporta análisis de forma-sombra, operación interferométrica con dos antenas para un mapeo en tres dimensiones y análisis de ángulos incidentes de objetos.

Estas ventajas, y el incremento de la investigación del SLR, han llevado a la necesidad de mejorar la geometría de imágenes y de desarrollar tareas de procesamiento precisas, de tal manera que las imágenes de radar pueden compararse con otros datos e imágenes tomadas en otras épocas del año. El interés en la radargrametría crece día a día.

Otra razón considerable para la investigación en imágenes con microondas para aplicaciones geocientíficas se deriva de las imágenes de radar satelital, como resultado de misiones de la NASA. Una motivación aún mayor para la investigación del radar es la exploración del planeta Venus, que se haya cubierto de nubes, en la misión del Magellan de la NASA (Johnson, 1988). La primera imagen satelital del planeta Venus fue obtenida en las misiones *Soviet Venera 16/17* (Barsukov *et al.*, 1986).

Las imágenes aéreas con radar son una realidad comercial desde antes de 1970. El advenimiento de imágenes de radar aéreas digitales se combinó con tecnología de posicionamiento bajo la dirección de las Fuerzas Aéreas de los Estados Unidos, *Global Positioning Systems* (GPS), para ofrecer una nueva herramienta de mapas más poderosa.

1.2 Confiabilidad de la información radargramétrica.

Las mejores aproximaciones geométricas en mapas obtenidas con imágenes de radar son hasta del mismo orden que la resolución geométrica del terreno. Sin embargo, tales aproximaciones han sido obtenidas usualmente en un medio ambiente de laboratorio controlado, utilizando cantidades considerables de datos cuyo origen no es el radar. En un contexto operacional, hasta recientemente, los sistemas SLR han mostrado aproximaciones geométricas de tal vez 5 a 15 veces la resolución del radar, pudiendo tener errores, de alrededor de 150 m. Para aplicar los resultados de laboratorio en prácticas de cada día se requiere estabilización de la plataforma satelital y mejoramiento del diseño del sensor del radar para satisfacer los requerimientos de la radargrametría. Los últimos esfuerzo combinan datos de los satélites GPS con un sensor de radar estabilizado o con compensación de movimiento; así pueden lograrse aproximaciones de 30 m. a 40 m. en altura, en radar estéreo en tamaños de 6 m. por pixel.

1.3 Tópicos en radargrametría.

Es posible agrupar los trabajos de la radargrametría en dos categorías clásicas:

- Coordinar procesamiento.
- Procesamiento de los valores de grises o procesamiento digital de imágenes.

En el pasado, pudieron haberse construido las definiciones de radargrametría y fotogrametría para abarcar procesamiento de coordenadas solamente. Sin embargo, la manipulación de valores de grises para la extracción de información geométrica está avanzando rápida y considerablemente. En efecto, todos los sistemas de imágenes de radar modernos y planeados usan datos digitales, lo cual tiene influencia en el trabajo de la radargrametría. Sin embargo, importantes tópicos en el desarrollo son los siguientes:

1. El desarrollo y mejoramiento en el entendimiento de resolución de imágenes y ruido es importante como lo es el efecto clásico de precisión de un objeto en una imagen de radar de apertura sintética (Synthetic Aperture Radar, SAR) para mediciones sencillas en imágenes y acoplamiento de imágenes.
2. Desarrollo de capacidad para crear imágenes de radar "secundarias", por ejemplo imágenes rectificadas o geocodificadas, además de que la aplicabilidad e interpretabilidad de las imágenes de radar se mejora.
3. Se requiere de capacidad para poder trabajar con cubiertas de imágenes de radar múltiples. Ello permite tener ventajas en los llamados ángulos de incidencia de los objetos: el cambio en las propiedades de reflexión de un objeto con el cambio de los ángulos de incidencia de la radiación electromagnética.
4. Se requieren métodos para combinar medidas de disparidad geométrica, llamadas diferencias *parallax*¹ estéreo, y de disparidad temática, incluyendo diferencias en

¹ Parallax es el aparente desplazamiento de un objeto debido al cambio en la posición del observador.

sombras, migración de contornos y migración de puntos por reflexión, para acoplamiento de imágenes y reconstrucción de la forma de un objeto.

5. También se requieren herramientas para trabajar eficientemente con conjuntos de datos de sensores que actúan entre sí para obtener mejores resultados, que combinan imágenes de *radar de apertura sintética* (*synthetic aperture radar, SAR*), con datos que no son imágenes, tales como mapas y modelos de elevación digital y con imágenes tomadas con luz visible, radiación infrarroja o microondas.

6. Necesita desarrollarse un sistema de entendimiento para el análisis total de imágenes de radar multiparámetro (multifrecuencia, multipolarización, multitemporal, ángulo de multiincidencia) en combinación con procesamiento geométrico (interferometría, estereoscopia, forma-sombra, etc.).

1.4 Imágenes *Side-Looking Radar*.

Existe una pequeña similitud entre el principio de la fotografía convencional y el de éste tipo de imágenes. Las fotografías son tomadas con cámaras con sistemas de lentes que utilizan luz visible y radiación cercana a la infrarroja. Además con el resultado de una exposición instantánea. Las imágenes de radar se forman con microondas en un modo cinemático.² En la figura 1 se muestra el rango de frecuencias y longitudes de onda de la radiación electromagnética usada para crear imágenes de radar. Este rango se extiende de longitudes de onda de menos de 1 cm a longitudes de muchos metros. Se considerarán las longitudes de onda mayores para usos donde la capacidad de penetración de la radiación electromagnética es de valor particular y la resolución geométrica además de la imagen de ruido son de concurrencia menor.

² Cinemática se define como movimiento que excluye fuerza.

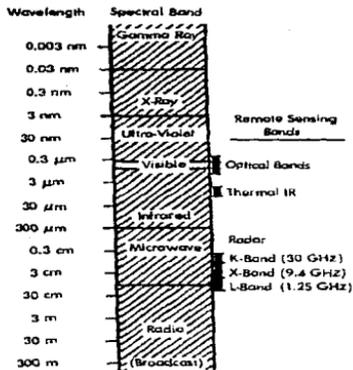


Figura 1.1 Frecuencia vs. wl.

El elemento "óptico" de un sistema de radar es una antena. Una lente no puede enfocar radiaciones con longitudes de onda de microondas, pero una antena sí. De manera similar a los lentes, se trabajará con la energía transmitida o recibida con la propiedad de la forma de la antena.

Existen dos tipos principales de imágenes de radar en este caso: las de escaneo circular *plan position indicator* (PPI) y las imágenes *side-looking*. Para aplicaciones de percepción remota la forma más usada es la *side-looking*. Las imágenes PPI limitan sus aplicaciones al monitoreo de aeropuertos y tráfico marino o aéreo

Entre las *side-looking* existe una división principal en dos diferentes principios de operación. De gran interés es el radar de apertura sintética (synthetic aperture radar, SAR), debido a su habilidad de crear imágenes de mayor resolución que los menos complejos radares de apertura real o de "fuerza bruta". Este simple sistema se denota

usualmente como SLAR por sus siglas en ingles de *side-looking airborne radar*, o SLR, omitiendo "*airbone*". A continuación se hará una breve descripción de cada uno de estos sistemas.

1.5 Radar de apertura real o de fuerza bruta.

El nombre SLAR o SLR contiene una descripción del modo de trabajo del sistema. Aquí, una antena rectilínea se monta en el cuerpo de un avión, paralela a su eje longitudinal. La antena emite en forma de abanico, esencialmente, pulsos planos de energía electromagnética en una dirección normal al eje longitudinal de la antena. En la figura 2 se muestra lo anterior. El pulso viaja a lo largo de este plano hasta iluminar una banda angosta de la tierra, del lado trasero del avión. El pulso se refleja. La antena del SLAR se diseña o modela de tal manera que emite una "hoja" de radiación.

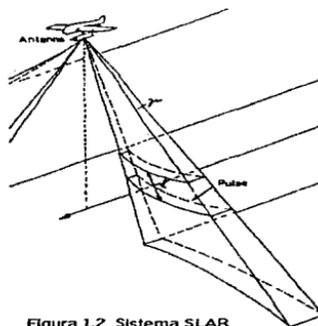


Figura 1.2 Sistema SLAR

Debido a que la reflexión desde la tierra es más difusa, ésta se dispersa en varias direcciones, incluyendo la dirección de la antena. Sólo una pequeña parte de la señal emitida vuelve a la antena, donde las reflexiones arriban consecutivamente de todos los objetos que fueron iluminados, de acuerdo con su distancia a la antena. La antena de tipo teleelentes se conmuta para recibir la radiación y es sensible sólo a la radiación que viaja en la "hoja" definida por la transmisión. La radiación se recibe por la antena y es transformada por un receptor a una señal análoga, la cuál requiere ser grabada.

La radiación se propaga a la velocidad de la luz, esto es, aproximadamente a 300,000 km./s. El tiempo transcurrido entre un pulso transmitido y uno recibido desde un objeto a una distancia de, por ejemplo, 50 km es de alrededor de 1/3000 s. Ello significa que, en teoría, pueden transmitirse y recibirse 3000 pulsos por segundo, si se consideran objetos no más distantes de 50 km.

Por otro lado, los pulsos iluminan sólo una parte finita de la tierra de un ancho de, por ejemplo, 10 m. y una longitud de 20 km. o más. La frecuencia de repetición de 3000 pulsos por segundo significa que cada objeto sería "retratado" por muchos pulsos; el aeroplano solo se mueve unos pocos centímetros durante el tiempo entre pulsos consecutivos. Así, un gran número de líneas de imagen se superponen e integran a una imagen real continua. La frecuencia de repetición de pulsos (FRP) de sistemas existentes es de un orden de magnitud de unos pocos miles.

La resolución geométrica de tierra de un sistema SLR o "radar de fuerza bruta" se define por la forma del pulso transmitido. Esta forma determina el área que es iluminada en un cierto momento además de la duración de la iluminación. La resolución se define entonces como la mínima distancia de la tierra a la cuál dos puntos objeto pueden, todavía, ser "retratados" de manera separada.

La intensidad de radiación reflejada por un objeto (eco del radar) esencialmente depende de las siguientes características:

1. Las propiedades eléctricas del objeto;

2. La rugosidad del objeto;
3. La forma geométrica del objeto;
4. La dirección de la radiación de iluminación.

Los factores 3 y 4 son de gran importancia. La forma geométrica de un objeto determina su imagen de radar. Los objetos pueden aparecer muy diferentes cuando son vistos de direcciones distintas. Por lo tanto, se procura tomar imágenes de un área por muchos lados durante el vuelo del SLR. También se toma el mismo objeto desde diferentes ángulos de apreciación.

La rugosidad del objeto es el siguiente factor en importancia. Dada un área de topografía uniforme (plana), las diferencias en el radar vuelven dependiendo de la rugosidad del terreno. Suponiendo que se toman imágenes en un área plana con rugosidad uniforme, la diferencia de las intensidades de eco del radar son causadas por las diferencias en las propiedades eléctricas del material (constante dieléctrica). Comúnmente, eso está directamente relacionado con la vegetación y diversas cubiertas del suelo en un área.

1.6 Radar de Apertura Sintética (SAR).

El *radar de apertura sintética* difiere del radar de apertura real principalmente en el hecho que "se usa una antena de longitud efectiva, sólo que se sintetiza al usar procesamiento de señales en vez de usar una antena físicamente grande" (Cutrona, 1962). El propósito es mejorar la resolución en la dirección de vuelo.

Para lograr esto, es necesario producir la imagen de radar en dos pasos por separado. A continuación se hace una explicación geométrica del proceso, asumiendo procesamiento y grabación análogos. Primero se genera una grabación fotográfica durante la adquisición de datos. La grabación es parecida a una fotografía convencional. Un segundo paso, un proceso de transformación, sustituye la grabación preliminar, el cuál se conoce como

filme de datos, filme de señal o filme de la historia de fase, dentro de un producto fotográfico final, llamado filme de imagen o filme de mapa.

1.6.1 El primer paso: generación del filme de la señal.

En el primer paso (adquisición de datos) la antena transmite y recibe pulsos que son necesariamente coherentes (esto es, las crestas o valles de una onda son predecibles) en contraste con el sistema SLR. Cada pulso produce una línea de imagen a lo largo de la dirección de movimiento del filme, de la misma forma que con el sistema de apertura real.

En el sistema SAR, siempre está presente una onda coherente de referencia. Cada señal transmitida o recibida se compara con esta señal de referencia sumándose a ella. A lo anterior se le llama patrón de interferencia. El grabado producido en la película durante la adquisición de datos, la película de señal o historia de datos, difiere del sistema de imágenes de radar de "fuerza bruta" en dos aspectos:

1. Los pulsos de radar transmitidos no se enfocan tan cercanamente sino fielmente extendidos.
2. El grabado incluye no sólo a los ecos de radar en si, sino la suma de los ecos y de una onda de referencia coherente. Este es el por qué de que un radar sea llamado coherente.

Para el intérprete de fotografía convencional, los resultados de la película de señal representan una masa de grises sin significado. Es útil recordar que el ancho de la señal en dirección de rango es simplemente el resultado de la longitud del pulso. El rango no es afectado por este proceso.

Además, la antena es objeto de movimiento, claramente no es en cada posición pero existe el movimiento. Como resultado de ello, los ecos recibidos tienen una frecuencia diferente a la onda de referencia.

1.6.2 El segundo paso: transformación de la señal en una imagen de mapa-correlación de la imagen SAR.

La luz normal emitida de un bulbo eléctrico está compuesta de muchas ondas con longitud de onda de alrededor de 30 cm. La relación existente entre las diferentes fases de cada componente no puede predecirse. En luz coherente, sin embargo, la relación entre las fases de dos ondas es constante. La fase concierne el estado de la onda, esto es, una cresta o un valle ocurren en la onda en un determinado momento y lugar. Si se hace incidir luz coherente a través de la película de datos la difracción de la luz en las señales grabadas enfocaría la luz en una imagen única apilada detrás de la película de datos.

1.6.3 Otros puntos de vista del SAR.

Existe un número variado de puntos de vista, pero esencialmente equivalentes que explican el procesamiento de la fase de historia para el sistema SAR. Tres de ellos son:

- Adición de vectores.
- Correlación.
- Filtrado de frecuencia.

La adición de vectores caracteriza la vista geométrica en la aproximación de la antena científica. Matemáticamente, esta aproximación se describe como la aplicación de la funciones de peso de retardo de fase en la señal recibida en cada "nodo" de la antena sintética que coherentemente enlista todos los regresos para cada elemento con resolución particular en cada uno de los nodos.

Correlación, la segunda aproximación, puede usarse en los datos recibidos usando una función de referencia de historia de fase para cada elemento de resolución.

1.8 SLR en un satélite.

Hasta ahora se ha dicho que un sistema de radar puede operar a bordo de un aeroplano. Pero, ¿qué hay con respecto a uno de estos radares montado en un satélite?. El primer sistema de éste tipo montado en un satélite estuvo en órbita alrededor de la luna. Las imágenes fueron producidas en 1972 en la misión del Apollo 17 como una parte del *Apollo Lunar Soudner Experiment* (ALSE).

No sería práctico usar un sistema de apertura real a bordo de un satélite debido a que la resolución sería muy pobre desde las altura orbitales de 300 a 1000 km. La resolución de un radar de apertura sintética es independiente del rango. Por lo tanto, un sistema SAR puede operar muy bien a bordo de un satélite, incluso a altitudes de 800 km, o posiblemente desde una altitud geostacionaria de 36,000 km. En principio, un satélite SAR opera de la misma manera que un sistema aéreo. La diferencia principal radica en el diseño del sistema de radar debido a que, desde un satélite los requerimientos de energía son mucho mayores y a que no hay tiempo para esperar que un primer pulso dé un viaje redondo para poder enviar un segundo.

Actualmente los satélites SAR son una realidad y existen muchos proyectos en operación y preparación.

1.9 Caracterización y Restauración de imágenes SAR.

La supresión de ruido es una tarea de preprocesamiento de imágenes SAR muy importante. En principio, la caracterización de imágenes SAR, involucra modelar los efectos de muchos parámetros de sistemas SAR. Entre ellos se encuentran los niveles de potencia de señal y ruido, longitud de onda, geometría del terreno, geometría de los objetos hechos por el hombre, estadísticas de ruido, efectos de propagación atmosférica y polarización transmitida y recibida. También se incluyen las operaciones debidas al

procesamiento y compensaciones por error de fase en el procesador de *historia de fase* (PHP) o correlador de imágenes SAR, tal como los errores por movimiento en la plataforma satelital

El terreno varía en el macrorelieve, rugosidad o microrelieve y en las constantes dieléctricas correspondientes. Los objetos hechos por el hombre pueden tener formas complejas que además son construidas con una gran variedad de materiales de diferentes constantes dieléctricas. En ambos casos, las propiedades geométricas y eléctricas afectan la reflectividad y por lo tanto la imagen captada por el radar del objeto.

Las estadísticas de señal a ruido son importantes en el contraste de la imagen; por otro lado, la longitud de onda y polarización afectan la reflectividad y transmitividad del objeto. El *speckle* es un efecto coherente que es una consecuencia de la presencia de dispersiones severas múltiples dentro de la misma zona tomada, resultando así un efecto acumulativo. Generalmente este efecto existe en radares de apertura real y sintética. En sistemas SAR el uso de sistemas de luz incoherente reduce el efecto de *speckle*, pero a costa de reducir la resolución. Este mismo proceso reduce otros efectos de ruido diferentes al *speckle*. Los efectos atmosféricos pueden reducir la coherencia de las señales en un sistema SAR, desenfocando y algunas veces creando falsos detalles.

1.10 Aplicaciones del sistema SAR.

1.10.1 Interferometría SAR.

La primera implantación de interferometría con radar aéreo fue descrita en la literatura por Graham (1974). Mucho del trabajo ha sido simulado gracias al advenimiento de datos SAR digitales y por lo tanto es relativamente reciente (Li y Goldstein, 1987). La interferometría es un concepto exacto para la reconstrucción de altitudes en terrenos. Dentro del espectro óptico y bajo condiciones de laboratorio controladas, estos métodos

han sido usados por muchos años para hacer mediciones de alturas precisas usando diferencias de fase medidas en dos lugares con sensores.

El más simple escenario de interferometría SAR se muestra en la figura 3, la cuál aparece en "The Manual of Photogrammetry" (1966) y por Ulaby *et al.* (1982), Zebker and Goldstein (1986) and Hug, *et al.* (1986). Esta simple situación muestra un aparato volante con dos antenas separadas horizontales o verticales. Sólo una de las antenas transmite pero ambas reciben. Las señales recibidas de ambas antenas se suman coherentemente en un receptor. Aquí se crean dos imágenes en el escenario.

La primera imagen se crea usando las señales recibidas desde una de las dos antenas. La otra imagen es el resultado de las señales recibidas en ambas antenas y sumadas coherentemente con un receptor.

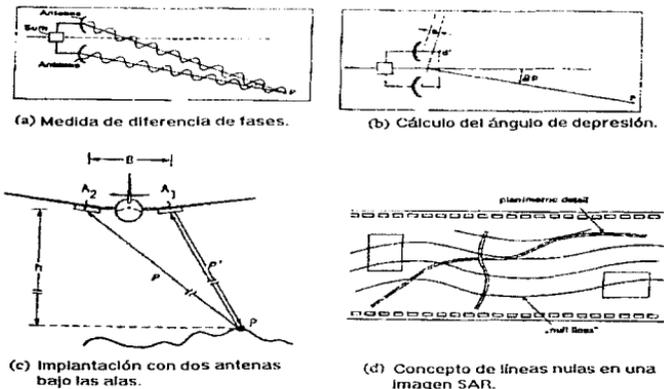


Figura 3. Principio de la interferometría.

1.10.2 Imágenes de radar planetarias tomadas desde la Tierra.

Independientemente del desarrollo de la tecnología de imágenes de radar desde aeroplanos se encuentra el desarrollo de la tecnología de imágenes planetarias de radar de superficies planetarias. En la literatura se encuentran tres centros de excelencia para esta herramienta de la exploración planetaria; el grupo del MIT (por ejemplo, Pettengill, 1978), originalmente simulado por el Observatorio de Haystack en Massachusetts; el grupo del Laboratorio de Propulsión de Jets en la NASA usando en gran medida la antena Goldstone en California (Goldstein, 1965), y como tercero, el trabajo con la antena en Arecibo en Puerto Rico, operado por la Universidad de Cornell (Campbell y Burns, 1980). Las antenas utilizadas son muy largas. Haystack tiene un diámetro de 43 metros y opera con una longitud de onda de 3.8 cm. (Banda X), Goldstone tiene un diámetro de 70 m., y opera en longitudes de onda de 3.8 y 12.5 cm.. Arecibo es una antena de 300 m., operando a 12.5 y 70 cm. en longitud de onda. La antena de Arecibo está localizada en un valle que puede ser direccionado sólo a través del movimiento de un reflector parásito.

Los primeros mapas planetarios de radar obtenidos pertenecen a la superficie de Marte (Goldstein y Gillmore, 1963) y al planeta Venus en 1965 y 1967 (Goldstein, 1965, 1967) y desde entonces se han dado considerables desarrollos en este tópico. Los datos del radar no son solamente obtenidos mediante la forma convencional de mapas de brillo, sino también mediante mapas de altitudes de las superficies. Las imágenes de la superficie del planeta Venus que se obtienen dependen directamente del radar debido a que una capa de nubes cubre el planeta. Sin embargo, también se han obtenido imágenes de otros cuerpos celestes tales como la luna (Shapiro *et al.*, 1972), asteroides (Ostro, Campbell y Shapiro, 1985), Marte (Downs *et al.*, 1975) y Mercurio (Harmon *et al.*, 1986).

El interés a esto se originó por la sensibilidad del sistema a la rugosidad de la superficie, polarización y la habilidad de desarrollar mapas de altitudes de observación interferométrica usando simultáneamente dos antenas. Así pues, pueden obtenerse imágenes de radar y mapas de alturas de objetos celestes que están a más de 100 millones de kilómetros.

Se han obtenido resultados impresionantes con procesos de imágenes de radar usando antenas localizadas en la superficie terrestre, que miran hacia Mercurio, Venus, Marte, los asteroides y la luna. Se han obtenido resoluciones horizontales de hasta 1 ó 2 km. a distancias de millones de kilómetros, mientras que el relieve de la superficie topográfica ha sido mapeado con métodos interferométricos con errores de 100 metros; similarmente los mapas de altitudes se obtuvieron con errores de 50 metros. Los orbitadores planetarios sobre Venus han confirmado las anteriores observaciones. El Pioneer Venus desarrolló un modelo de superficie digital desde un "altímetro orbitador". Los satélites Soviet Venera 15/16 crearon una cubierta de imagen de radar con una resolución de 1 kilómetro. La misión Maguellan de la NASA a Venus (lanzada en Mayo de 1989) permite una mejor comparación con las imágenes obtenidas desde la Tierra y con las observaciones de los orbitadores desde 1990.

1.10.3 Rastreo de capas de hielos árticos con imágenes SAR.

En años recientes ha surgido interés en el uso de métodos SAR para estudiar los movimientos de las hojas de los hielos árticos, el cual nace debido a que permite cubrir el territorio a través de las nubes que prevalecen en el Ártico, así como en los oscuros meses de invierno. El movimiento de las hojas de hielo es de interés para la navegación, extracción de petróleo y operaciones militares. Por otro lado, el movimiento de las hojas de hielo juega un papel muy importante en el clima del mundo, debido a que este movimiento expone extensiones grandes de agua no helada a los más fríos aires polares que, por lo tanto, es responsable de mucha de la transferencia de calor entre el océano y la atmósfera.

Ya ha habido experimentos en el pasado que han utilizado imágenes SAR para cuantificar el movimiento del hielo en el mar. Por ejemplo, como parte del "*Arctic Ice Dynamics Joint Experiment*", Lebert *et al.* (1979) se determinó el movimiento del hielo del mar de Beaufort con dos cubiertas consecutivas mediante aviones equipados con equipos SAR. La exactitud de los resultados tomados desde el aire depende de los datos de la navegación o los puntos de control en tierra. Por otro lado, la exactitud se ve afectada por la técnica

que se usa para combinar imágenes SAR individuales en una sola, eliminando discrepancias entre ambas

El monitoreo SAR aéreo de hielos es muy usado en la exploración petrolera y recientemente está tomando un carácter operacional en el trabajo del "Canadian Ice Center", parte del "Canada's Atmospheric and Environmental Services (AES)". En estos tiempos se está haciendo especial énfasis en la clasificación del hielo y su posicionamiento "vulgar" o simple, mientras que el posicionamiento exacto es secundario. Curlander et al. (1985) discute varias técnicas de preprocesamiento para movimiento de hielos.

Hasta ahora la investigación en el tema se ha centrado mayormente en la identificación manual de puntos en imágenes secuenciales, de hielo en el mar. Esto puede ser impráctico cuando se usan imágenes obtenidas vía satélite. Por lo tanto, la pretensión actual es automatizar la medición del movimiento del hielo en el mar usando datos de satélite-radar de Japón, Europa y Canadá (Japanese-ERS-1, European-ERS-1, RADARSAT) y en el futuro imágenes del "Earth Observing Satellite (EOS). Puede, también, adaptarse y ser benéfica en sistemas aéreos.

1.10.4 Mapeo de imágenes de radar a una escala de 1:50,000.

Las imágenes aéreas de radar con apertura real y sintética (por ejemplo SLR) han sido utilizados desde finales de los años 60 en la producción de mapas sobre extensas regiones a escalas de 1:250,000-1:500,000. El contenido temático contrario al mapeo convencional ha sido la plenitud racional para desarrollar pruebas de radar en zonas de temperatura. En los puntos, donde las nubes y bruma inhiben la fotografía aérea y la toma en la banda óptica de los satélites, el SLR provee también información de mapeo primaria (Azevedo, 1971). A pesar de que esos mapas fueron y son valiables, no han conseguido los requerimientos para escalas medias, o sea, 1:50,000 (productos de mapeo topográficos) además de que tampoco consideraron los diferentes niveles de altitud sino que asumieron a la Tierra como plana.

- Rectificando o geocodificando una imagen de radar dada a fin de generar un "maplike orthoradar image".
- Explorando y desarrollando capacidades óptimas de radar estéreo para incrementar la interpretación de imágenes y para la reconstrucción en tercera dimensión de superficies de terreno.
- Combinando "images parallax detection" con forma y lados, altitud de sombras e interferometría a fin de refinar la reconstrucción de la forma de la superficie del terreno.
- Asistiendo en la cobertura sistemática y repetida de extensas áreas para crear sistemas de monitoreo reales en tiempo o muy cercanos a estos de fenómenos de cambio rápido, tales como hielos en los mares y tráfico de costas. Fusionamiento de imágenes de radar con otras imágenes y datos para crear conjuntos de datos multisensor sinérgicos e imágenes basadas en sistemas de información.
- Automatizando tareas de análisis a fin de lograr más resultados con costos menores y creando datos de tierra en un sistema de "todo-clima".

1.11.1 Progreso con Datos SAR.

El trabajo requerido depende del papel que las imágenes de radar jugarán en la observación de la superficie de la Tierra y de otros planetas. Se espera que las misiones satelitales realmente obtendrán el mayor beneficio de los sistemas SAR: capacidad para todos los climas y para día y noche. Los muchos sistemas satelitales incluyen el SIR-C, el RADARSAT canadiense, el ERS-1 y ERS-2 de la Agencia Espacial Europea, el LANDSAT de la NASA, el ERS-1 de la Agencia Espacial Japonesa, la misión de mapeo con radar de Venus, Maguellan de la NASA y el sistema de observación de la Tierra de la NASA. También los sistemas aéreos prometen su miniaturización, multifrecuencia, multipolarización, sistemas completamente digitales, tal vez, doce canales de imágenes de 1.5 metros de resolución. Estos desarrollos conducen a la tecnología por los datos en vez de por aplicación.

1.11.2 Progreso radargramétrico.

La radargrametría digital requiere de modelos matemáticos rigurosos y complejos, ya que en vez de apuntar a una rápidamente disponible y frecuentemente improvisada solución, apunta al desarrollo radargramétrico óptimo. Las herramientas del análisis digital desarrolladas en software eliminan todas las excusas por aproximaciones radargramétricas preliminares, no sofisticadas e inexactas.

La perspectiva actual apunta a un sistema radargramétrico completamente digital basado en las herramientas de un Sistema de Posicionamiento Global. Los datos se presentan al observador y analista de muchas maneras proveyendo longitud de onda, polarización, ángulo de vista y señales de variación de tiempo. Los análisis y medidas se obtienen de manera digital mediante computadora. Los radares sensores serán más caros y mucho más complejos que las cámaras. Ciertamente ellos complementarán los sensores de imágenes en longitudes de onda ópticas, aún cuando la cámara de perspectiva central estará disponible.

La radargrametría digital puede jugar un papel en la industria de los mapas del futuro pudiendo llegar a ser de mayor importancia de lo que es ahora, si se crea la habilidad de combinar cubiertas repetidamente en altas resoluciones a fin de mejorar los contenidos relevantes de la imagen y eliminar el notorio efecto de "no mostrado" para ciertos objetos de geometrías no favorables. Esto necesita apuntar específicamente a la interpretabilidad de las características de tierra construidas. La cubierta repetida con parámetros de imágenes variables será necesario a fin de alcanzar esta meta. Esto en cambio, refuerza la confianza en la incorporación de tecnología digital de procesamiento de imágenes dentro del análisis de imágenes y el repertorio de la radargrametría. El mejoramiento de resoluciones geométricas a 1.5 m. por pixel y la alta disponibilidad de datos SAR de futuros satélites y proyectos aéreos necesitarán ser combinados para una aplicación más extensa y la utilización de imágenes SAR en el campo de los mapas. Los métodos radargramétricos serán herramientas esenciales para el progreso y uso óptimo de

imágenes SAR. Lo último ha sido mostrado en actuales aplicaciones SAR operacionales de mapeo de reconocimiento.

Un avance aún mayor, será la combinación de análisis geométrico y análisis temático. El acoplamiento de imágenes múltiples, la rectificación, análisis de rebote de ondas esparcidas, etc., necesitarán ser consideradas en el contexto.

1.11.3 Radar para cartografía.

En el campo de propósito general de mapeo y cartografía se encuentra que las imágenes de radar no juegan ningún papel. El tipo de reconocimiento de mapas a pequeña escala fue enfocado hacia desarrollo de recursos prioritarios específicos, por ejemplo, la búsqueda de petróleo. La percepción remota cartográfica es totalmente dominada por la fotografía aérea a la alta resolución de 0.15 m. a 0.6 m. (escalas de fotografía de 1:10,000 a 1:40,000). Sin embargo, están surgiendo nuevas tareas de mapeo, todas ellas relacionadas con la necesidad de monitorear fenómenos cambiantes y obtener bases de datos actuales de la tierra. El advenimiento de sistemas de información geográfica está llevando esta necesidad al foco. El mapeo por radar tiene potencial al contribuir al mantenimiento de bases de datos digitales existentes.

Los avances en la precisión en la radargrametría se derivarán de la interferometría (a tal vez, 5 m. en altura), y del mejoramiento en la resolución (a alrededor de 1 m.). El efecto de estos avances en el campo de mapeo debe ser impuesto cuando llegue a ser una realidad.

1.11.4 Iconometría de sensor independiente.

El advenimiento de percepción no fotográfica ha ensanchado la perspectiva de la fotogrametría, y la radargrametría es una de las muchas adiciones. Las fuentes de imágenes digitales y actuales tecnologías de análisis están empujando la tecnología

fotogramétrica adelante desde su nicho especializado hasta la variedad de trabajos computarizados desarrollados por una estación de trabajo. En efecto, todo el hardware fotogramétrico especializado está cambiando o está siendo cambiado por estaciones de trabajo gráficas de propósitos generales, a fin de manejar todas las variedades de imágenes, incluyendo mapas, tierra y otros datos de dos o tres dimensiones.

La fotogrametría, radargrametría y análisis de imágenes electroópticas serán o se están convirtiendo en simples especializaciones de un amplio rango de imágenes y software de procesamiento. La especialización puede expresar en si misma la implantación de muy específicos modelos de sensores describiendo la geometría y radiometría de un sistema especializado. En este ambiente, el objetivo común será almacenamiento de imagen y datos, recuperación, utilización, interfaz con el usuario, transformación de coordenadas, reconocimiento de patrones, automatización, compresión de datos, detección de cambio y manejo de información espacial. La función del multisensor, análisis de series de tiempo y otras multidirecciones de datos de imágenes se combinarán con descripciones de escena simbólica en sistemas de información geográfica lo que significa la transición radical de la fotogrametría a lo que puede ser llamado iconometría, una especialización en el campo de la ingeniería en computación.

CAPÍTULO 2.

SISTEMAS SATELITALES.

2.1 ERS-1 (ESA Remote-Sensing Satellite 1).

2.1.1 Introducción.

En Julio de 1991 la Agencia Espacial Europea lanzó el ERS-1, el más grande y más sofisticado satélite de vuelo libre construido a lo largo y ancho de Europa llevando con él un centro de sensores activos de microondas, apoyado de instrumentos complementarios adicionales, como son:

- Instrumento activo de microondas (Active Microwave Instrument, AMI¹). Capaz de operar como un Radar de Apertura Sintética (en modos de onda o imagen) o un "wind scatterometer".

¹ Consistente en dos radares separados, operando a frecuencias de 5.3 GHz. (banda C), con tres modos de operación -un radar de apertura sintética (SAR) para modo imagen y onda y un "wind scatterometer" de tres antenas.

- Radar de altitudes².
- Radiómetro de escaneo de pista (Along Track Scanning Radiometer³). Combina un radiómetro infrarrojo y un sondaador de microondas ("microwave sounder").
- Equipo de tasa de rango y rango preciso (Precise Range and Range-rate Equipement⁴).
- Retro-reflectores láser (Laser Retro-reflectors⁵).

El programa ERS-1 fue diseñado para servir a una gran variedad de usuarios con un amplio rango de productos y servicios. En respuesta a esto y otros objetivos de misiones muy cambiantes, las instalaciones de tierra del ERS-1 combinan facilidades distribuidas y centralizadas. La pieza clave entre el usuario y la parte de cobro por los servicios se encuentra en facultad de la ESA (European Space Agency), ESRIN en Italia, mientras que el monitoreo y control del satélite son responsabilidad del European Space Operation Center (ESOC) en Alemania. Tomando ventaja de los centros especialistas existentes, las ESA Processing and Archiving Facilities han sido establecidos en Francia, Alemania, Italia y el Reino Unido, los cuales manejarán los datos recibidos por las estaciones terrenas de la ESA y la red de otras estaciones distribuidas a lo largo del mundo.

²Un sensor de microondas activo apuntando, al nadir en la banda Ku (13.8 GHz), diseñado para medir los tiempos de retorno de los ecos (u ondas rebotadas) desde los océanos y superficies de hielo, proveyendo información sobre la altitud de olas significativas, velocidad del viento en la superficie, elevación de la superficie del mar y varios parámetros sobre los hielos del mar y hojas de hielo.

³Consiste de dos instrumentos pasivos -un radiómetro infrarrojo de cuatro canales (1.6, 3.7, 10.8 y 12 micrómetros) para medir temperaturas en la superficie del mar y en la parte superior de las nubes y un sondaador de microondas (microwave sounder) de dos canales (23.8 y 36.5 GHz) que provee información del contenido total del vapor de agua.

⁴Un sistema de rango de microondas de muy alta exactitud usado para la determinación de órbita a niveles decimétrales de precisión y para aplicaciones geodésicas.

⁵Instrumentos ópticos pasivos operando en la zona infrarroja que permiten alinear el satélite mediante el uso de estaciones de alineación láser. Utilizados para la medición de altitud del radar de altitud y el mejoramiento de la determinación de la órbita del satélite.

Los principales usos del ESR-1 son el estudio de los océanos, hielo y meteorología. Actualmente se están recolectando datos de las regiones polares del planeta y de los océanos del sur. Además, la capacidad para producir imágenes de alta resolución en todos los climas recolectará información valiosa de áreas continentales y zonas costeras. El ERS-1 es tanto un sistema experimental como un sistema operacional, puesto que ha demostrado los nuevos conceptos y tecnologías de los equipos e instalaciones de espacio y tierra. Esto también ilustrará algunos requerimientos operacionales para la rápida entrega de datos proveedores de contribuciones meteorológicas significativas, pronóstico del estado del mar y monitoreo de la distribución de los hielos oceánicos.

2.1.2 Objetivos de la misión.

En julio de 1991 la Agencia Espacial Europea (ESA) lanzó el primer satélite europeo de percepción remota (ERS-1), precursor de una nueva generación de satélites para monitoreo ambiental. El sistema ERS-1 utiliza tecnología de microondas avanzada para obtener medidas e imágenes independientemente de las nubes existentes en la atmósfera terrestre y de las condiciones de la luz solar. Tales técnicas han sido usadas previamente solo por la misión Seasat en 1978 de corta vida y durante los experimentos "Space Shuttle". En comparación con los sistemas satelitales contemporáneos, ERS-1 es único en la medición de ciertos parámetros, incluyendo aquellos del estado del mar, ondas en la superficie del mar, circulación oceánica y niveles de hielo y del mar, además de imágenes del océano, tierra e hielo bajo cualquier clima. También mide la temperatura de la superficie del mar con mayor exactitud que cualquiera de los sistemas espaciales actuales. Han sido reunidos muchos datos de áreas remotas tales como las regiones polares y los océanos del sur, donde previamente ha sido recolectada muy poca información.

La naturaleza de la órbita del satélite y su complemento de sensores, facilita una misión global proveyendo una cubierta geográfica y repetitiva de todo el mundo, principalmente orientado al monitoreo de hielo y océanos, pero con capacidad para tomar imágenes con microondas a alta resolución en todos los climas sobre tierra y zonas costeras.

El ERS-1 fue un experimento y un sistema preoperacional, puesto que tuvo que demostrar que el concepto y la tecnología para los segmentos de espacio y tierra tenían los comportamientos requeridos. El sistema ERS-1 fue diseñado, también, para satisfacer algunos requerimientos operacionales para productos de datos⁶, requeridos pocas horas después de que la observación es hecha, contribuyendo significativamente en la meteorología, estado del mar y pronóstico y monitoreo de distribuciones de hielo en el mar. Aquí, se tiene, no sólo adquisición de datos y procesamiento, sino también validación de datos, control de calidad de datos y distribución y almacenamiento de datos.

2.1.3 El satélite.

El programa ERS-1 está compuesto de un satélite, con su equipo de soporte de tierra, un vehículo de lanzamiento y un segmento de tierra consistente de un centro de control y facilidades para adquisición, procesamiento, almacenamiento y diseminación de datos. Este segmento de tierra engloba facilidades controladas por la ESA, y por organizaciones francesas.

El concepto del satélite se basa en la reutilización de una plataforma multimisión desarrollada dentro del programa francés SPOT. Esta plataforma provee la mayoría de los servicios para la operación del satélite y la operación del pago, en particular, altitud y control de órbita, suministro de potencia, monitoreo y control del status de pago y telecomunicaciones con el segmento de tierra.

El ERS-1 transporta instrumentación compuesta por un conjunto de sensores de microondas activos soportados por instrumentos complementarios, como son:

⁶ 1) Un conjunto homogéneo de información proveniente del procesamiento de datos "raw": incluye anotación, transcripción o "desconmutación" (decommutated) de datos raw. 2) Término general para indicar datos raw, validación de datos, datos auxiliares o productos de rápida entrega, regenerados o de precisión. 3) Un conjunto de datos uniformemente procesados y formateados, porción de un conjunto de datos o representación transformada de datos (por ejemplo fotografía y "ploteo"); puede ser producido por o para un proyecto o por un centro de datos.

- **Instrumento de microondas activo (AMI) combina la función de un radar de apertura sintética (SAR) con un "wind scatterometer".** El SAR opera en modo de imágenes para la adquisición de imágenes bajo cualquier clima en el océano, regiones polares, zonas costeras y tierra. En el modo de ondas el SAR produce "imágenes" (alrededor de 5 km. x 5 km.) en intervalos regulares para la derivación de la longitud y dirección de las ondas oceánicas. El "wind scatterometer" usa tres antenas para la medición de la velocidad y dirección del viento en la superficie del mar.
- **Radar de altitudes (RA).** Provee medidas exactas de la elevación de la superficie del mar, altura de olas significativas, varios parámetros de hielos y una estimación de la velocidad del viento en la superficie del mar.
- **Radiómetro de escaneo (Along Track Scanning Radiometer, ATSR).** Combina un radiómetro infrarrojo y un sondeador de microondas para la medición de la temperatura de la superficie del mar, temperatura en la tapa de las nubes, contenido del vapor de agua atmosférico y de la cubierta de nubes.
- **Equipo de tasa de rango y rango preciso (Precise Range and Range-rate Equipment, PRARE).** Un sistema que abarca el rango de microondas en todos los climas, diseñado para desarrollar mediciones de tasa de rango y rango en las dos direcciones de alta precisión usando estaciones transpondedoras con base en tierra. Esas mediciones solían ser usadas para determinación de órbita y aplicaciones geodésicas. Desafortunadamente el PRARE sufrió daños debidos a radiación fatal en los inicios de la misión.
- **Retroreflectores láser (Laser Retro-reflectors, LRR).** Permiten mediciones de la posición del satélite y de la vía orbital con el uso de estaciones terrenas láser.

Los componentes mencionados anteriormente se muestran en la figura 2.1.

El ATSR y el PRARE son conocidos en conjunto como "el paquete de anuncio de oportunidades", el cual resultó de propósitos para instrumentación adicional de la comunidad científica.

2.1.4 Segmento de tierra (Ground segment).

El segmento de tierra del ERS-1 incluye facultades para el control y operación del satélite, para recepción, almacenamiento y procesamiento de datos y prevé servicios para satisfacer requerimientos de los usuarios mediante productos. Consiste de las siguientes partes:

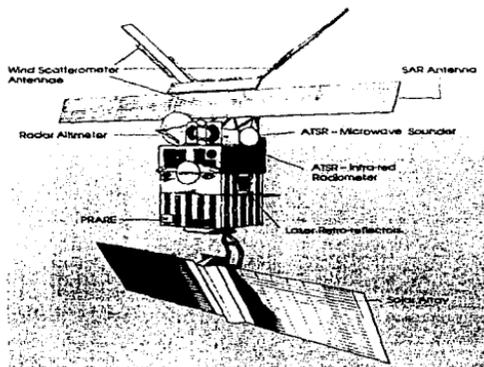


Figura 2.1 El satélite y sus componentes. © esa.

- Facilidades de la central de red (Earthnet ERS-1 Central Facility, EECF) en Italia. Aquí se concentran todas las funciones de interfaz con el usuario, incluyendo catalogación, manejo de preguntas de usuarios, operaciones de pago, calendarización de procesamiento y disseminación de datos, control de calidad de los productos de datos y monitoreo del comportamiento de sistemas.

- **Centro de control y de manejo de la misión (Mission Management and Control Centre, MMCC) en Alemania.** Lleva a cabo el control de las operaciones del satélite y manejo funcional, incluyendo cubierta del satélite y calendarización operacional del pago. También controla la estación terrena Kiruna.
- **Estaciones terrenas de la ESA.** En Kiruna (Suecia), Fucino (Italia), Gatineau y Prince Albert (Canadá) y Maspalomas (Islas Canarias, España), proveen la principal red para la adquisición de datos y el procesamiento/diseminación de productos de rápida entrega.
- **Estaciones terrenas nacionales (National Ground Stations)** distribuidas a lo largo del mundo reciben altas tasas de datos del ERS-1 por acuerdo con la ESA, extendiéndose así el potencial de cubierta de la misión de imágenes SAR.
- **Facilidades de procesamiento y almacenamiento (Processing and Archiving Facilities, PAFs).** Localizadas en Alemania, Francia, Italia y el Reino Unido, son los principales centros para la generación de productos de precisión "off-line" y la distribución y almacenamiento de productos y datos ERS-1.
- **Centros de usuarios (User Centers and Individuals),** tales como los servicios meteorológicos nacionales e internacionales, varios centros de investigación y usuarios individuales.



Figura 2.2 Instalaciones de tierra del ERS. © esa.

2.1.5 Capacidades operacionales.

La misión ERS-1 es global, sin embargo, su naturaleza preoperacional y algunas consideraciones técnicas y prácticas, por ejemplo, la capacidad de suministro de potencia y la cobertura de la estación terrena, imponen límites en el ciclo de vida y, por lo tanto, la flexibilidad es un requerimiento esencial en el establecimiento de los modos de operación de pago.

La disponibilidad del satélite se define como la proporción de tiempo para la cuál las mediciones validas son hechas por el satélite y el dato correspondiente es transmitido. Causas de no disponibilidad incluyen disturbios del enlace, tales como lluvia y algunos manejos operacionales como son, el sombreado, reconfiguraciones planeadas, maniobras para corrección de altitud y cambios del ciclo de repetición. Con la exclusión del satélite y falla de instrumentos y la ejecución de modos experimentales, la disponibilidad del satélite no fue menor de 95% durante los tres años después del despegue.

Los instrumentos de tasa baja de bits (LBR) -Radar de altitudes, "wind scatterometer", el SAR en modo onda y el ATSR-, fueron operados para proveer tanta cobertura global como sea posible con prioridad en los océanos, luego en las hojas de hielo y finalmente en áreas terrestres. Sobre el océano se operó el radar de altitudes y el "wind scatterometer" continuamente con un sistema SAR en modo de onda cada 200 km.. El ATSR opera ininterrumpidamente por períodos largos (al menos de varios días, nominalmente en bases permanentes) sobre el océano, hielo y superficies de tierra. La adquisición de datos para los instrumentos LBR puede verse limitada por los cortos de energía, capacidad de grabado a bordo y conflictos entre el modo viento/onda y el modo de imágenes SAR en áreas costeras.

La misión SAR se construye alrededor de las peticiones de los usuarios y un plan para obtener un conjunto de coberturas regionales de superficies específicas de tierra/hielo y áreas costeras de interés. Los objetivos de la adquisición de imágenes son los siguientes:

- Colección anual de conjuntos de datos completos para superficies terrestres, áreas costeras y hojas permanentes de hielo para cada área de cobertura de la estación terrena.
- Revistas regulares de áreas seleccionadas para el monitoreo de recursos renovables, áreas costeras y zonas marginales de mar/hielo e identificar efectos de las estaciones del año.

Se asume que el SAR puede operar por 12 minutos por órbita (arriba de 4 minutos durante un eclipse), ya sea sin interrupción o partido para facilitar la cobertura en pequeños segmentos (arriba de un máximo de 6 píxeles por órbita y no excediendo un promedio de cuatro sobre el tiempo de vida del satélite). Cada segmento tiene una longitud mínima de al menos un minuto, y los segmentos consecutivos están separados por al menos 30 segundos.

2.1.6 Fases de la misión.

La misión ERS-1 está dividida en seis fases principales:

- **Adquisición de órbita "Orbit Acquisition".**
- **"Commissioning Phase".**
- **Primera fase de hielo.**
- **Fase multidisciplinaria.**
- **Segunda fase de hielo.**
- **Fase geodésica.**

Cada fase es un periodo de tiempo donde los parámetros y características principales de la misión son incambiables, particularmente las características orbitales y las prioridades para operaciones de sensor. El logro de los objetivos de cada fase de la misión incrementa el conocimiento de los océanos, zonas de hielo, regiones costeras y áreas de tierra.

2.1.6.1 Adquisición de órbita (Orbit Acquisition).

El lanzamiento y la fase de órbita temprana (LEOP) comenzó con el conteo de lanzamiento y finalizó con la adquisición de altitud nominal del satélite y órbita. Esto llevó dos semanas (17 de julio al 30 de julio de 1991) e incluyó encendido y chequeo funcional del satélite. El ciclo repetitivo de tres días proveyó de revistas a sitios de calibración dedicados bajo condiciones geométricas y de iluminación constantes.

2.1.6.2 "Commissioning Phase".

La "Commissioning Phase" comenzó inmediatamente después de la adquisición de la órbita nominal, encendido inicial y chequeo funcional del satélite. Su duración fue de 4.5 meses con un ciclo de repetición de tres días con máxima prioridad dada a la ejecución

de la calibración de ingeniería y tareas de validación geofísicas. Terminó el 12 de diciembre de 1991 con el chequeo de la capacidad de la nave para girar y para inclinarse.

2.1.6.3 Primera fase de hielo.

La primera fase de hielo (Diciembre 28, 1991 a Marzo 30, 1992) con tres días de ciclo de repetición fue optimado para los requerimientos específicos de los experimentos del hielo Ártico. El objetivo de la misión era observar, con una alta repetición de observaciones, todos los experimentos en las zonas de hielo polar y marginal las cuales requieren datos SAR. Las siguientes actividades predominaron en la fase:

- Experimentos científicos y de aplicación sobre los hielos árticos y antárticos y otros mares de hielo.
- Proyectos piloto y otras actividades a las que frecuentemente se vuelve (por ejemplo, monitoreo de contaminación).
- Proyectos e investigaciones relacionadas a hielos sobre tierra y áreas cubiertas de nieve.

2.1.6.4 Fase multidisciplinaria.

Las limitaciones principales del ciclo de tres días son la cobertura global restringida para las imágenes SAR y la gran separación de las pistas del radar de altitudes. El ciclo de repetición de 35 días de la fase multidisciplinaria (Abril 14, 1992 a Diciembre 15, 1993) provee imágenes SAR de cada parte de la superficie de la tierra con al menos, dos veces la frecuencia de cobertura en latitudes medias y altas. Además, la densidad de pistas del altímetro se incrementa para dar una separación entre las pistas de tierra de sólo 39 km. a 60 grados de latitud.

Los objetivos de esta gran fase fueron:

- **Determinación de la referencia media de la superficie del mar con el radar de altitudes.**
- **Estudio de la variabilidad del océano a varias escalas con los instrumentos LBR.**
- **Mapeo sistemático de superficies de tierra dentro de la cubierta de visibilidad de las estaciones de tierra, en apoyo de todas las aplicaciones de tierra.**

Esta fase incluye las siguientes aplicaciones:

- **"Announcement of Opportunity Experiments".**
- **Proyectos de mapeo.**
- **Proyectos de agricultura.**
- **Proyectos de monitoreo de bosques.**
- **Mapeo de bosques tropicales cada seis meses.**
- **Revistas regulares de puntos prueba.**
- **Otras áreas críticas desde un punto de vista ambiental.**
- **Aplicaciones marítimas.**

El ERS-1 fue operado en el modo experimental de giro-inclinación dentro de una ventana de diez días en el inicio de ésta fase, del 4 al 13 de abril de 1992.

2.1.6.5 Segunda fase de hielo.

La segunda fase de hielo comenzó en marzo de 1994, con las mismas características orbitales que la primera fase de hielo.

2.1.6.6 Fase geodésica.

Con un ciclo de repetición de 176 días, la fase geodésica (abril de 1994 hasta el fin de la misión) facilita la adquisición de una alta densidad de mediciones del altímetro y así el objetivo principal de la fase es mejorar la determinación del geoide con el Radar-altímetro. Los otros instrumentos LBR operan nominalmente, mientras que las operaciones SAR continúan un perfil similar a las de la fase multidisciplinaria.

2.2 ERS-2 (ESA Remote-Sensing Satellite 2).

La misión y satélite ERS-2 comprende segmentos de espacio y tierra similares a los del ERS-1 con mejoras/adhesiones a fin de proveer imágenes ópticas, medidas de la concentración de ozono en la estratosfera y troposfera y determinación exacta de la posición orbital del satélite y la posición de los puntos de referencia en tierra (fijamente geodésico).

El satélite ERS-2 fue lanzado el 21 de abril de 1995 del Centro Espacial Guyana. Adquirió una órbita polar en sincronía con el sol (heliosíncrona), similar a la del ERS-1, pero recorrida en fase de tal manera que el ERS-2 sobrevuela el mismo punto sobre la superficie de la Tierra 24 horas después del ERS-1.

2.2.1 Fases de la misión.

- Commissioning of platform/instruments.
- Operaciones "tandem"⁷ con el ERS-1.
- Misión multidisciplinaria.

⁷ Tandem: uno detrás de otro.

Durante la segunda fase, se llevan a cabo mediciones interferométricas de la superficie de la Tierra usando el Radar de Apertura Sintética de cada satélite.

2.2.2 Desarrollo de las misiones.

Hasta Agosto 19 de 1997 el ERS-1 habia completado 23390 órbitas alrededor de la Tierra y el ERS-2 3700.

Ambos sistemas ERS continúan el desarrollo de sus misiones con una disponibilidad promedio de 98-99%.

El ERS-2 continúa en su órbita de 35 días con un día de separación del ERS-1. Se han hecho maniobras finas de control en ambos a fin de mantener sus órbitas dentro de los 200 metros una de otra. El ERS-1 continúa en su órbita de 35 días de ciclo de repetición. Se han llevado a cabo pequeñas maniobras de corrección. Existe suficiente potencia para mantener las operaciones de las misiones completas.

2.3 Programa Landsat.

El Landsat es el programa en funcionamiento más grande respecto a sus equivalentes en lo que se refiere a la adquisición de datos de la Tierra desde el espacio. Es un programa apoyado por la NASA. El primer satélite Landsat fue lanzado en 1972. El siguiente lanzamiento en la serie está programado para mayo de 1998 y será el Landsat 7. Los instrumentos de los satélites Landsat han grabado millones de imágenes que son almacenadas en los Estados Unidos y en las estaciones receptoras Landsat alrededor del mundo. Los datos adquiridos son usados ampliamente en agricultura y geología, educación y seguridad nacional.

El valor del Programa Landsat fue reconocido por el Congreso de los Estados Unidos en Octubre de 1992 cuando pasó el "Land Remote Sensing Policy Act". Esta ley (ley pública 102-155) autorizó el proyecto Landsat 7 y tomó las medidas necesarias para asegurar la disponibilidad, a los menores costos posibles de las imágenes y datos digitales del Landsat a usuarios estadounidenses y extranjeros.

Este programa constituirá el de mayor grabado de imágenes de zonas continentales del planeta. El Landsat 7 tendrá un papel único y esencial en la campo de los satélites de observación terrestre en órbita para el fin de esta década. Ningún otro sistema acoplará combinaciones de cobertura sinóptica, alta resolución espacial, rango espectral y calibración radiométrica. Arrojará datos digitales a la comunidad de usuarios en mayores cantidades, más rápidamente y a menores costos que en cualquier tiempo previo en la historia del programa.

El instrumento de observación de la tierra en la Landsat, el "Enhanced Thematic Mapper Plus" (ETM+), replica las capacidades de los altamente prósperos instrumentos "Thematic Mapper" en el Landsat 4 y 5. El ETM+ incluye también nuevos artefactos que lo hacen un instrumento más eficiente y versátil para estudios de cambio global, evaluación y monitoreo de cobertura de tierra y un amplia área de mapeo que sus diseños anteriores. Los principales artefactos nuevos en el Landsat 7 son:

- Una banda pancromática con 15 m. de resolución espacial.
- A bordo, apertura total, 5% de calibración radiométrica absoluta.
- Un canal IR termal con 60 m. de resolución espacial.

El instrumento estará apoyado por una red terrena que recibirá los datos ETM+ vía enlace de transmisión satélite-tierra en banda X a una tasa de 150 Mbps. La estación receptora principal estará en el Centro de datos EROS (EDC) del US Geological Survey (USGS) en Sioux Falls, Dakota del Sur. Substancialmente escenas libres de nubes, costeras y terrestres serán adquiridas por el EDC a través del enlace en tiempo real y por playback desde el satélite. Las capacidades del satélite, instrumentos y sistemas de tierra serán suficientes para permitir la adquisición continua de todas las escenas libres de nubes en la estación receptora principal. Sumadas a ésta, una red de estaciones receptoras

distribuidas en todo el mundo podrá recibir información directamente del satélite en tiempo real en la banda X. Cada estación será capaz de recibir datos sólo en la parte de la huella en la que el satélite sea capaz de ver a la estación receptora.

El sistema Landsat 7 asegurará la continuidad de datos tipo Thematic Mapper en el siguiente siglo. Estos datos estarán disponibles a todos los usuarios a través del EDC. "Browse data" (un tipo de imagen de menor resolución para determinar localización de la imagen y contenido de calidad e información) y "metadata" (información descriptiva de la imagen) estarán disponibles a los usuarios dentro de las 24 horas de adquisición de la imagen por la estación de tierra principal. El EDC procesará todos los datos Landsat 7 recibidos en "nivel 0R" (por ejemplo, corregido por examen de dirección y alineamiento de banda pero sin corrección radiométrica o geométrica) y almacenará los datos en ese formato. Un producto corregido sistemáticamente (nivel 1G) será generado y distribuido a usuarios que lo soliciten.

CAPÍTULO 3.

TRANSFORMADA POLINOMIAL.

TEORÍA.

3.1 Introducción.

Para muchas aplicaciones en codificación de imágenes y visión en computadora, así como en el caso de percepción visual humana, se requiere que los datos que componen la imagen, que son una matriz de valores de intensidades, sean interpretados dentro de un marco visual con significado. Generalmente se está de acuerdo en que se requiere alguna forma de procesamiento espacio-temporal local de los datos originales para tal propósito. Este tipo de procesamiento involucra dos decisiones importantes. Primero, para llevar a cabo el procesamiento local, usualmente la imagen se multiplica por una ventana. El tamaño de la ventana establece el tamaño del conjunto de puntos imagen que contribuyen en este primer paso de procesamiento. La forma de la ventana determina el peso relativo de cada punto contribuyente de la imagen. A fin de describir

completamente la imagen, éste procesamiento local debe ser representado por un número suficiente de posiciones de la ventana. La forma, tamaño y espaciamiento de la ventana deben seleccionarse. Segundo, para cada posición de la ventana debe llevarse a cabo el procesamiento. Como cada elección específica de procesamiento implica la búsqueda de patrones específicos, seleccionar este proceso es equivalente a fijar los patrones visuales que sean considerados más relevantes a priori.

Es muy difícil hacer elecciones óptimas para la ventana y procesamiento basados únicamente en argumentos teóricos. En este contexto, el sistema visual humano se utiliza frecuentemente como referencia. Así pues, es interesante revisar rápidamente técnicas de procesamiento de imágenes disponibles con respecto a la elección que ha sido hecha para la ventana y el procesamiento.

Una clase de ventana muy frecuentemente usada es el cuadrado, que es un tipo de ventana que no se traslapa. Son usadas, por ejemplo, en *transform coding* (TC), y cuantización de vector de imagen (VQ) y representa la forma más simple de subdividir una imagen. Una desventaja importante es que a bajas tasas, el efecto de bloques aparece (molesto a un observador humano). "Difference pulse code modulation" (DPCM), por otro lado, utiliza alguna forma de patrón de escaneo junto con una ventana de predicción que sólo incluye píxeles precedentes. De aquí, que sólo parte de la información vecina se incluye en el análisis de la imagen. Las ventanas anteriores representan fielmente las subdivisiones artificiales del dominio del píxel y tienen relevancia perceptual pequeña. Muchas de las técnicas de codificación de imágenes de la segunda generación, tales como los codificadores de pirámide (PC), codificadores de sub-banda (SBC), la transformada cortex y las expansiones de Gabor, usan ventanas que se superponen.

Un parámetro importante de la ventana es su tamaño (o escala). La selección del tamaño apropiado de una ventana es en sí un problema fundamental. Por otro lado, a fin de facilitar altas reducciones de datos el tamaño de la ventana debe ser suficientemente grande. Pero, a su vez, la complejidad del análisis dentro de cada ventana se incrementa con el tamaño de ésta. Existen dos aproximaciones posibles al problema, primero, puede seleccionarse una ventana de tamaño fijo y hacer un análisis dentro de cada ventana que incluya todos los patrones visuales de interés; segundo, se puede limitar la complejidad

del análisis que se desarrollará en cada ventana y subsecuentemente determinar el tamaño necesario de la ventana para describir a la imagen localmente con suficiente exactitud. Aquí, en lugar de restringir el procesamiento a una escala, se repite el mismo procesamiento a escalas múltiples y subsecuentemente usa las salidas de esta etapa para seleccionar la escala óptima en cada posición. Existe evidencia de que el sistema visual humano utiliza este principio "escala-espacio" [8].

Si se usan ventanas de diferentes tamaños, entonces el espaciamiento de éstas, se toma usualmente proporcional a su tamaño. En muchas de las estructuras de pirámide el espaciamiento y tamaño de la ventana se incrementa en pasos de dos. Algunos artículos muestran cómo este incremento exponencial en el tamaño y espaciamiento es no sólo preferible desde el punto de vista de la teoría de la información [1,2] sino también resulta ser computacionalmente eficiente [3].

3.2 Transformada polinomial unidimensional.

La transformada polinomial es una técnica de descomposición de señales, en la cuál éstas son aproximadas localmente por polinomios. En este apartado se introducen las ideas básicas en una dimensión con señales analógicas.

El análisis para la transformada polinomial involucra dos pasos. En el primero la señal original $L(x)$ se estudia de manera local multiplicándola por una ventana $V(x)$. Una descripción completa de la señal requiere que el proceso anterior se repita en un número suficiente de posiciones de la ventana. Se considerará el caso de ventanas equidistantes.

A partir de la función ventana $V(x)$ se puede construir la función de peso

$$W(x) = \sum_k V(x - kT) \quad (1)$$

con repetición periódica. La función de peso es periódica con período T. Considerando que $W(x)$ es diferente de cero para todo x , se obtiene,

$$L(x) = \frac{1}{W(x)} \sum_k L(x) \cdot V(x - kT) \quad (2)$$

tal que se pueda garantizar que las señales locales $L(x) \cdot V(x - kT)$ para todas las posiciones distintas de kT contengan suficiente información de la señal original.

El segundo paso consiste en aproximar la señal localizada dentro de la ventana $V(x - kT)$ mediante una expansión polinomial. Como funciones base para la expansión polinomial, se toman los polinomios $G_n(x)$ de grado n , que son ortonormales con respecto a $V^2(x)$, o sea,

$$\int_{-\infty}^{\infty} V^2(x) G_m(x) G_n(x) dx = \delta_{mn} \quad (3)$$

Estos polinomios son únicos y están determinados por $V^2(x)$. Los polinomios ortonormales para una ventana arbitraria $V(x)$ están dados por

$$G_n(x) = \frac{1}{\sqrt{M_{n-1} M_n}} \begin{pmatrix} c_0 & c_1 & \cdot & \cdot & c_n \\ c_1 & c_2 & \cdot & \cdot & c_{n+1} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ c_{n-1} & c_n & \cdot & \cdot & c_{2n-1} \\ 1 & x & \cdot & \cdot & x^n \end{pmatrix} \quad (4)$$

donde el determinante $M_n(x)$ se define como

$$M_n = \left| c_{i+j} \right|_{i,j=0,\dots,n}, \quad M_{-1} = 1 \quad (5)$$

y

$$c_n = \int_{-\infty}^{\infty} x^n V^2(x) dx \quad (6)$$

es el momento de orden n .

Bajo condiciones muy generales, para la señal $L(x)$ se obtiene:

$$V(x - kT) \left| L(x) - \sum_{m=0}^{\infty} L_m(kT) \cdot C_m(x - kT) \right| = 0 \quad (7)$$

con

$$L_m(kT) = \int_{-\infty}^{\infty} L(x) \cdot C_m(x - kT) V^2(x - kT) dx \quad (8)$$

Por ejemplo, si $L(x)$ es analítica y finita para todo x , queda garantizada la convergencia de la expansión en series en (7) para la mayoría de las ventanas. De aquí, que el error de aproximación entre una señal y un polinomio puede ser hecho arbitrariamente pequeño tomando un grado de la expansión polinomial suficientemente grande. Esto implica que la descripción de la señal local $L(x) \cdot V(x - kT)$ puede reducirse a un número finito de coeficientes polinomiales $L_m(kT)$. La señal de energía dentro de la ventana puede expresarse en términos de los coeficientes de expansión, como se muestra,

$$\int_{-\infty}^{\infty} L^2(x) V^2(x - kT) dx = \sum_{m=0}^{\infty} L_m^2(kT) \quad (9)$$

Esta es la generalización del Teorema de Parseval con polinomios ortonormales. Combinando (2) y (7), se obtiene la siguiente expansión para la señal completa,

$$L(x) = \sum_{m=0}^{\infty} \sum_k L_n(kT) \cdot P_n(x - kT) \quad (10)$$

donde,

$$P_n(x) = \frac{G_n(x)F'(x)}{W(x)} \quad (11)$$

La ecuación (8) implica que los coeficientes $L_n(kT)$ pueden derivarse de la convolución de la señal $L(x)$ con las funciones de filtrado.

$$D_n(x) = G_n(x)F'^{-2}(x) \quad (12)$$

seguido por muestras en múltiplos de T.

A este mapeo de la señal original $L(x)$ en coeficientes polinomiales $L_n(kT)$ se le llama transformada polinomial "directa". La reconstrucción de la señal a partir de esos coeficientes está dada por (10) y se le llama transformada polinomial inversa, la cual consiste en interpolar los coeficientes $\{L_n(kT)\}$, k entero con la función patrón $F_n(x)$ y sumar sobre todos los órdenes de n.

3.3 Transformada hermitiana unidimensional.

A fin de ilustrar las propiedades de la transformada polinomial, se hará el análisis sobre un caso especial muy importante de ventana que es la gaussiana, dada por,

$$V(x) = \frac{1}{\sqrt{\pi}\sigma} \exp(-x^2 / 2\sigma^2) \quad (13)$$

donde el factor de normalización es tal que $V^{-2}(x)$ tiene energía unitaria. Los polinomios ortogonales asociados con $V^{-2}(x)$ son conocidos como polinomios hermitianos y de aquí el nombre de transformada hermitiana

Las razones para utilizar este tipo de ventana son muchas. Primero, la teoría matemática es conocida y por lo tanto las propiedades de la transformada pueden derivarse fácilmente. Segundo, las ventanas gaussianas separadas por dos veces la desviación estándar σ son un buen modelo para los campos receptivos encontrados en experimentos psicológicos. Tercero, la transformada hermitiana involucra filtros derivados de gaussianas. Han sido ya muy utilizadas en modelado psicológico del sistema visual humano. Además, las ventanas gaussianas minimizan el producto de incertidumbres en los dominios espacial y de la frecuencia, lo que es una propiedad interesante en el análisis de imágenes.

La función de peso es periódica, a continuación se muestra el desarrollo y el resultado.

$$\begin{aligned} w(x) &= \frac{T}{\sqrt{2\pi}\sigma} \sum_k \int_{-x}^x \exp\left[-\frac{(x-kT)^2}{2\sigma^2} - j\omega x\right] dx \\ &= T \sum_k e^{-j\omega kT} e^{-\frac{1}{2}(\omega\sigma)^2} \end{aligned} \quad (14)$$

$$W(x) = \frac{\sqrt{2\pi}\sigma}{T} w(x) \quad (15)$$

con,

$$w(x) = 1 + 2 \sum_{k=1}^{\infty} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(k \frac{2\pi\sigma}{T}\right)^2\right] \cdot \cos\left(k \frac{2\pi\sigma}{T}\right) \quad (16)$$

El contraste de esta función viene determinado por el parámetro de muestreo $r = T / \sigma$. Generalmente se desea limitar el número de descomposiciones locales, especialmente en codificación. Así pues, es conveniente hacer al parámetro de muestreo tan grande como sea posible.

Los filtros determinan que información será expresada en los coeficientes de la transformada hermitiana. Por lo tanto, las propiedades principales de la transformada hermitiana están determinadas por estas funciones. De la expresión general se obtiene:

$$I_n(x) = \frac{(-1)^n}{\sqrt{2^n n!}} \cdot \frac{1}{\sigma \sqrt{\pi}} H_n\left(\frac{x}{\sigma}\right) e^{-x^2 / 2\sigma^2} \quad (17)$$

Las funciones patrón $I_n^*(x)$ son necesarias para resintetizar la señal original a partir de los coeficientes hermitianos. Están dados por la siguiente expresión,

$$I_n^*(x) = \frac{f}{\sqrt{2^n n!}} \cdot \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} H_n\left(\frac{x}{\sigma}\right) e^{-x^2 / 2\sigma^2} / w(x) \quad (18)$$

3.4 Transformada polinomial en dos dimensiones.

La transformada polinomial puede generalizarse fácilmente a dos dimensiones. Dada una ventana $V(x, y)$, los polinomios ortonormales $G_{m,n-m}(x, y)$, donde m y $n-m$ son los grados con respecto a x y y , respectivamente, están dados por,

$$\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} V^2(x, y) G_{i,m} G_{j,n-m}(x, y) dx dy = \delta_{ij} \delta_{mn} \quad (19)$$

donde $n, i = 0, 1, \dots, \alpha$; $m = 0, \dots, n$; $j = 0, \dots, y$.

La descomposición de señales 2D en polinomios locales es:

$$I(x, y) = \sum_{n=0}^{\alpha} \sum_{m=0}^n \sum_{(p,q) \in S} I_{m,n,m}(p, q) \cdot P_{m,n-m}(x-p, y-q) \quad (20)$$

donde (p, q) varía sobre todo el conjunto de coordenadas de la rejilla S. La única condición para la red de muestreo es que la función de peso

$$W(x, y) = \sum_{(p,q) \in S} I^2(x-p, y-q) \quad (21)$$

sea diferente de cero para todas las coordenadas (x, y) .

Los coeficientes polinomiales $I_{m,n,m}(p, q)$ se obtienen de la convolución de la imagen con las funciones de filtrado

$$D_{m,n-m}(x, y) = G_{m,n-m}(-x, -y) I^2(-x, -y) \quad (22)$$

seguidas del muestreo de la salida en (p, q) sobre S.

Las funciones patrón usadas para interpolar los coeficientes polinomiales se define como

$$P_{m,n-m}(x, y) = G_{m,n-m}(x, y) I^2(x, y) / W(x, y) \quad (23)$$

para $n = 0, 1, \dots, \alpha$ y $m = 0, \dots, n$.

En la introducción se mencionó que el análisis de una imagen tendría como objetivo descomponer la señal en patrones que son perceptualmente importantes. Es bien conocido, especialmente en percepción visual y en computación visual que los patrones

locales de una dimensión tales como los lados y líneas juegan un papel central en la visión. A continuación se mencionará cómo se pueden encontrar los mejores patrones locales óptimos con ayuda de la transformada polinomial. Usando el criterio del error cuadrático medio se desea minimizar

$$E^2 = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} [K(x \cos \theta + y \operatorname{sen} \theta) - L(x, y)]^2 V^2(x, y) dx dy \quad (24)$$

sobre todos los patrones 1D K y ángulos θ .

Defínase la ventana 1D

$$V_{\theta}^2(u) = \int_{-\infty}^{\infty} V^2(u \cos \theta - v \operatorname{sen} \theta, u \operatorname{sen} \theta + v \cos \theta) dv \quad (25)$$

como la proyección de la función $V^2(x, y)$ sobre el eje que forma un ángulo θ con el eje x . La ventana es independiente de la orientación si $V^2(x, y)$ es rotacionalmente simétrica. Se puede expandir el patrón $K(u)$ sobre la base $\{F_{n,\theta}(u); n = 0, 1, \dots\}$ de polinomios ortonormales sobre $V_{\theta}^2(u)$

$$V_{\theta}(u) \left[K(u) - \sum_{n=0}^{\infty} K_{n,\theta} \cdot F_{n,\theta}(u) \right] = 0 \quad (26)$$

Sustituyendo las expansiones polinomiales 2D y 1D para $L(x, y)$ y $K(u)$, respectivamente en E^2 y tomando la derivada parcial respecto a $K_{n,\theta}$, se obtiene la solución óptima

$$K_{n,\theta} = \sum_{k=0}^{\infty} \sum_{l=0}^{\infty} I_{l,k-l} \cdot h_{n,\theta}(l, k-l) \quad (27)$$

para los coeficientes patrón 1D, donde

$$h_{n,\theta}(l, k-l) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} F'_{n,\theta}(x \cos \theta + y \operatorname{sen} \theta) \cdot (j_{l,k-l}(x, y) V^2(x, y) dx dy \quad (28)$$

es una función ángulo completamente determinada por $V^2(x, y)$.

Los polinomios ortonormales $L'_{n,\theta}(u)$ y la función ángulo pueden determinarse sin conocimiento explícito de $V_\theta(u)$. En realidad, la ecuación (4) implica que sólo los momentos

$$c_{n,\theta} = \int_{-\infty}^{\infty} u^n V_\theta^2(u) du \quad (29)$$

son necesarios para describir completamente los polinomios ortonormales.

El error de aproximación 1D

$$E^2 = \sum_{k=0}^{\infty} \sum_{l=0}^{\infty} L_{l,k,l}^2 - \sum_{n=0}^{\infty} K_{n,\theta}^2 \quad (30)$$

puede minimizarse sobre el ángulo θ minimizando la energía direccional

$$\sum_{n=0}^{\infty} K_{n,\theta}^2 \quad (31)$$

donde $K_{n,\theta}$ se determina por los coeficientes 2D. En la práctica, los primeros términos en ésta medida de energía direccional son suficientes para hacer una buena estimación de la dirección óptima. Hay que hacer notar que la energía direccional se encuentra mediante una simple combinación de los coeficientes polinómicos 2D. Computacionalmente esto es más eficiente que usar filtros para calcular la energía en cada dirección, especialmente si se hace con un gran número de direcciones.

Posteriormente, se localiza la orientación óptima de los contornos maximizando el contraste direccional de la imagen, C_θ definida como,

$$C_{in} = \log \left[1 + \sum_{n=1}^N K_{n,m}^2 \right] \quad (32)$$

En cada posición donde es encontrado un contorno, sólo los coeficientes 1D con mayor contraste se almacenan en el vector $K_{n,m,m}$.

El proceso de discriminación por orientación es por sí mismo un proceso de restauración de contornos, puesto que sólo los patrones unidimensionales que conforman un contorno se preservan. Todos los demás patrones orientados en diferentes direcciones, tales como el ruido, son descartados. La restauración se lleva a cabo mediante la transformada polinomial inversa.

El proceso anterior se describe en la figura 3.1.

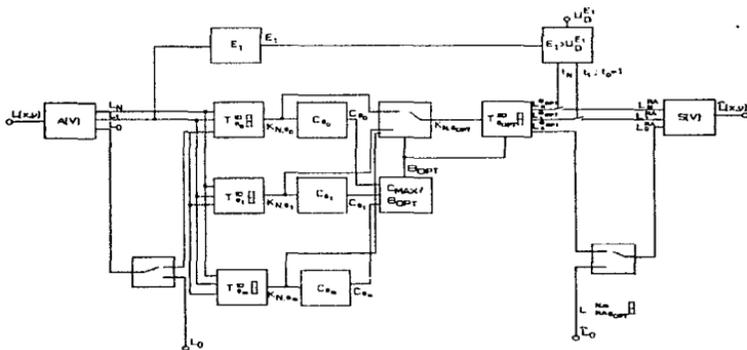


Figura 3.1 Algoritmo para detección de contornos basado en la sensibilidad direccional.

3.5 Transformada hermitiana en dos dimensiones.

Un caso especial interesante de la transformada polinomial de dos dimensiones aparece cuando la función ventana es separable, esto es $V(x,y)=V(x)V(y)$ y la rejilla de muestreo es cuadrada. Las funciones de filtrado y patrón son, también, separables y, por lo tanto, su implantación es muy eficiente. Por ejemplo, los coeficientes polinomiales se encuentran al realizar la convolución de la imagen con las funciones de filtrado $D_m(x)D_{n-m}(y)$ donde $D_m(x)$ es la función de filtrado 1D para la ventana $V(x)$ seguida por un muestreo de la salida en direcciones horizontal y vertical en múltiplos del espaciamiento de las muestras T.

Las ventanas gaussianas de dos dimensiones tienen la propiedad única de que ambas variables pueden separarse y además existe simetría rotacional. Las funciones de filtrado son separables tanto de manera polar como espacial. La transformada de Fourier de $D_m(x)D_{n-m}(y)$ expresada en coordenadas polares $\omega_x = \omega \cos \theta$ y $\omega_y = \omega \sin \theta$, es

$$d_m(\omega_x) d_{n-m}(\omega_y) = g_{m,n-m}(\theta) \cdot d_n(\omega) \quad (33)$$

donde $d_n(\omega)$ es la transformada de Fourier de la función de filtrado hermitiana 1D $D_n(r)$ con r la coordenada radial y

$$g_{m,n-m}(\theta) = \sqrt{\frac{n!}{m!(n-m)!}} \cos^m(\theta) \cdot \sin^{n-m}(\theta) \quad (34)$$

expresa la sensibilidad direccional del filtro. De aquí, que al incrementar n , el análisis de las frecuencias radiales superiores es mejor, esto es, resolución espacial mayor de manera similar al caso 1D.

3.6 Conclusiones.

Una ventaja importante de la transformada polinomial es que utiliza operadores con buen desempeño en la interpretación de imágenes. Especialmente el caso de detección local de patrones 1D por medio de la transformada polinomial es considerado muy importante. La incorporación del caso multiescala es necesario a fin de completar la analogía con la percepción visual humana además de permitir una comparación con muchos esquemas de codificación/análisis de imágenes actuales. Los resultados de la aplicación de la transformada polinomial en el presente trabajo se muestran en el capítulo V.

CAPÍTULO IV.

CAMPOS ALEATORIOS DE MARKOV.

4.1 Sistemas de vecindad y cliques.

Muchos problemas de visión pueden ser catalogados como problemas de etiquetado, en los cuáles la solución a un problema es un conjunto de etiquetas asignadas de acuerdo a las características de los pixeles de una imagen. El etiquetado es también la representación natural para el estudio de los campos de Markov.

El problema de etiquetado se especifica en términos de un conjunto de "sites" y un conjunto de etiquetas. Un "site" se define como un punto o una región en el espacio euclidiano, por ejemplo, un punto o una región de la imagen tal como una esquina, un segmento de línea, etc..

Definase S como el conjunto de sites existentes en una imagen determinada. Los sites en S están relacionados por un sistema de vecindades. Un sistema de vecindades en S se define como

$$N = \{N_i | \forall i \in S\} \quad (1)$$

Donde N_i es el conjunto de sites vecinos a i . La relación de vecindades tiene las siguientes propiedades:

- Un site no es vecino de si mismo: $i \notin N_i$.
- La relación de vecindad es mutua: $i \in N_j \Leftrightarrow j \in N_i$.

Para una rejilla regular, S , el conjunto de vecinos de i se define como el conjunto de sites más cercanos contenidos en un radio r . Un sistema homogéneo se define como:

$$N_i = \left\{ i' \in S \left[\text{dist}(pixel_{i'}, pixel_i) \right]^2 \leq r, i' \neq i \right\} \quad (2)$$

donde $\text{dist}(A,B)$ denota la distancia euclidiana entre los puntos A y B y r define el orden de la vecindad. El parámetro r toma valores enteros solamente. Nótese que los sites sobre o cerca de la frontera tienen menos vecinos.

En el sistema de vecindades de primer orden, también llamado sistema de 4 vecinos, cada site (interior) tiene cuatro vecinos como se muestra en la figura 4.1. En el sistema de vecindades de segundo orden, también llamado sistema de 8 vecinos cada site (interior) tiene 8 vecinos. También se muestra en la figura 4.1.

Un subconjunto C incluido en I , (I es la matriz de la imagen) constituye un clique si C contiene un pixel o un grupo de pixeles de tal manera que dos pixeles cualesquiera en éste son vecinos, con respecto a un sistema de vecindad particular.

En la figura 4.1 se muestran los cliques asociados a cada sistema de vecindad.

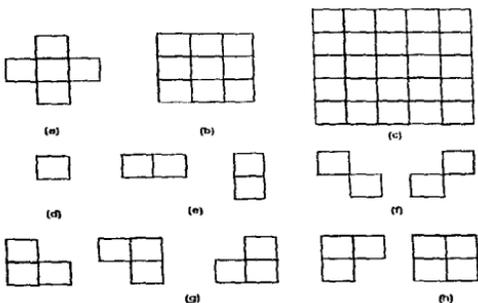


Figura 4.1. Cliques y vecindad en una rejilla de "sites" regular.

La figura 4.1.a muestra el sistema de vecindad de primer orden, mientras que los incisos b y c muestran los sistemas de segundo y tercer orden. Las figuras 4.1.d y 4.1.e muestran los cliques asociados al sistema de primer orden. Las figuras 4.1.d-h muestran los cliques asociados al sistema de segundo orden.

4.2 Campos aleatorios de Markov y la distribución de Gibbs.

Sea $F = \{F_1, \dots, F_m\}$ una familia de variables aleatorias definidas sobre el conjunto S donde cada F_i toma el valor f en L . A la familia F se le conoce como campo aleatorio.

Se dice que F es un campo aleatorio de Markov en S con respecto a un sistema de vecindades N si y solo si se satisfacen las siguientes dos condiciones.

$$P(f) > 0, \forall f \in F \quad (\text{positividad}) \quad (3)$$

$$P(f_i | f_{S-(i)}) = P(f_i | f_{N_i}) \quad (\text{Propiedad de Markov}), \text{ o bien} \quad (4)$$

$$P(X_{ij} = x_{ij} | X_{mn} = x_{mn}, (m, n) \neq (i, j)) = P(X_{ij} = x_{ij} | X_{mn} = x_{mn}, (m, n) \in \eta_{ij})$$

Donde $S - \{i\}$ es el conjunto de diferencia, $f_{S-(i)}$ denota el conjunto de etiquetas en los sites en $S - \{i\}$, $f_{N_i} = \{f_i | i' \in N_i\}$, η_{ij} es la vecindad del pixel (i, j) , Q es el conjunto de sites y x_{ij} está contenido en Q .

Esto es, un campo de Markov X tiene la propiedad de que la distribución condicional de X en un pixel particular, dados los valores de todos los demás pixeles en la imagen completa, es igual a la distribución condicional dados sólo los valores de sus vecinos.

La propiedad de positividad también es muy importante. Bajo esta propiedad el campo de Markov X puede tener una distribución de Gibbs. La distribución de Gibbs es una medida de probabilidad de una propiedad de un pixel en particular, derivada de las propiedades de sus vecinos y tiene la siguiente forma:

$$P(x_{ij} = x) = \frac{1}{Z} \exp\left\{-\frac{1}{T} \sum_{c \in \mathcal{C}} V_c(x)\right\} \quad (5)$$

$$\begin{aligned}
 V_C(x)|_{x=q_k} &= -\beta && \text{si } x_{mn} = q_k \text{ y } (m, n) \in C \\
 V_C(x)|_{x=q_k} &= \beta && \text{en cualquier otro caso}
 \end{aligned}$$

$$P(x_y = x)|_{x=q_k} = \frac{1}{Z} \exp\left\{-\frac{1}{T} \sum_{C \ni x} V_C(x)|_{x=q_k}\right\} \quad (7)$$

con

$$Z = \sum_{k=1}^K \exp\left\{-\frac{1}{T} \sum_{C \ni x} V_C(x)|_{x=q_k}\right\} \quad (8)$$

4.3 El modelo.

Como se mencionó anteriormente, para los propósitos de segmentación de imágenes, las características de la imagen deben modelarse de tal manera que ésta pueda dividirse en K regiones diferentes, cada una siguiendo una distribución normal caracterizada por una media μ_k y una varianza σ_k^2 . Teniendo en cuenta la distribución de Gibbs del proceso región y haciendo $T = 1$, se tiene una nueva medida de probabilidad de que el pixel (i, j) caiga en la región q_k y es como sigue.

$$P(X_y = q_k | Y_y) \propto \exp\left\{-\frac{1}{2\sigma_k^2} (Y_y - \mu_k)^2 - \sum_{C \ni x} V_C(x)|_{x=q_k}\right\} \quad (9)$$

Este modelo se compone de dos partes. La primera depende de las estadísticas de los datos y de lo cerca que la intensidad de la región se encuentra de los datos. La segunda

depende de las propiedades de los pixeles vecinos y el central. De acuerdo con la definición de potencial, es claro que si el número de pixeles pertenecientes a los K tipos de regiones en la vecindad es exactamente el mismo, el segundo término en la ecuación anterior tomará el mismo valor para todos los tipos de regiones. Esto no cambiará el orden relativo de los valores de probabilidad y los atributos del pixel bajo consideración serán determinados solamente por los datos. En contraste, si éstos números son diferentes entre ellos, el valor de probabilidad correspondiente al máximo ganará el mayor incremento y entonces el pixel central tendrá más probabilidad de ser asignado al tipo de región relacionado. Si el valor del término dependiente de los datos llegara a ser despreciable, por ejemplo si β tomara valores muy grandes, entonces, el atributo del pixel será determinado principalmente por el atributo de sus vecinos. En otras palabras, el primer término tomará efecto sólo cuando el número de pixeles pertenecientes a los K tipos de regiones en la vecindad del pixel central, difieran uno de otro y harán el atributo de cada pixel en la segmentación de la imagen más consistente con la mayoría de sus vecinos. Finalmente, tomando la probabilidad logarítmica de la ecuación anterior puede obtenerse fácilmente una clasificación de tipo de máxima probabilidad.

4.4 Modelo de Ising.

El modelo de más bajo orden utilizado para transmitir información es el que utiliza dos etiquetas solamente. Es muy empleado debido a su simplicidad y bajo costo computacional. Se codifican en la energía de Gibbs como potenciales de cliques de parejas de sites. Con los potenciales de cliques de hasta dos sites, la energía toma la siguiente forma,

$$U(f) = \sum_{i \in S} V_1(f_i) + \sum_{i \in S} \sum_{l \in N_i} V_2(f_i, f_l) \quad (10)$$

donde $\sum_{i \in S}$ es equivalente a $\sum_{\{i\} \in C_1}$ y $\sum_{i \in S} \sum_{l \in N_i}$ a $\sum_{\{i,l\} \in C_2}$.

Cuando $V_1(f_i) = f_i G_i(f_i)$ y $V_2(f_i, f_l) = \beta_{i,l} f_i f_l$, donde $G_i(\cdot)$ son funciones arbitrarias y $\beta_{i,l}$

son constantes que reflejan la interacción entre el par de sites i e i' , la energía es,

$$U(f) = \sum_{\{i\} \in C_1} f_i \epsilon_i(f_i) + \sum_{\{i,i'\} \in C_2} \beta_{i,i'} f_i f_{i'}$$

La ecuación anterior es conocida como auto-modelo. Las funciones de auto-modelo pueden clasificarse de acuerdo a las suposiciones hechas en las funciones individuales f_i 's.

Se dice que un auto-modelo es un modelo autologístico, si las f_i 's toman valores en el conjunto de etiquetas discreto $L = \{0,1\}$. La energía correspondiente toma entonces la siguiente forma,

$$U(f) = \sum_{\{i\} \in C_1} \alpha_i f_i + \sum_{\{i,i'\} \in C_2} \beta_{i,i'} f_i f_{i'} \quad (11)$$

Cuando N es el sistema de vecindad más cercano en una red (los cuatro vecinos más cercanos en dos dimensiones o los dos vecinos más cercanos en una dimensión), el modelo autologístico se reduce al modelo de Ising.

4.5 Modelo de Potts.

En el caso de imágenes a varios niveles de grises, es posible modelar las interacciones entre los píxeles a efectos de segmentar en varias clases:

siendo a y b son sites de una vecindad en 4 conectividad:

$$\begin{aligned} V(a,b) &= -\beta & \text{si } f_a = f_b. \\ V(a,b) &= \beta & \text{si } f_a \neq f_b. \end{aligned}$$

o lo que es lo mismo:

$$V(u, b) = -2\beta\delta(f_u, f_b) + \beta \quad (12)$$

donde δ representa el símbolo de Kronecker.

Así, el modelo de Potts puede expresarse como:

$$V(u, b) = -K\delta(f_u, f_b) \quad \text{donde } K = 2\beta$$

4.6 Algoritmo de simulación y de optimización.

4.6.1 Algoritmo de simulación.

- * Síntesis de un campo de Gibbs.
- * Muestreador de Gibbs.

Se trata de un algoritmo iterativo basado en la construcción a partir de un estado inicial cualquiera, por ejemplo una cadena de Markov $\Pi(0)$ de configuraciones sucesivas en las cuáles se espera encontrar "buenas" propiedades de convergencia. Para los casos de los algoritmos de simulación y de optimización se considera una serie de sites $S^{(n)}$, donde,

$S^{(n)} \quad n \in N$ tal que $\forall s \in S \quad s$ es "visitado" frecuentemente en un número infinito de veces.

El procedimiento es el siguiente:

1. Barrido de la imagen.
2. En cada uno de los pixeles/sites se calculan las probabilidades locales en función de la vecindad y de la estructura markoviana del campo.

3. En función de las probabilidades condicionales locales, efectuar un sorteo aleatorio de estado, por ejemplo del nivel de grises de la etiqueta, etc.

4. El procedimiento es repetido en todos los pixeles de todas las líneas de la imagen, esto es, para todos los sites del campo de Markov.

El barrido de toda la imagen (de la totalidad del campo de Markov) debe ser repetido un gran número de veces para obtener buenos resultados.

4.6.1.1 Muestreador de Gibbs.

Algoritmo:

- Inicialización de la simulación: $x^{(0)}$.

- En cada etapa (n):

• Escoger el site $r = s^{(n)}$. Su valor es $x_r^{(n)}$ y su configuración de vecindad es $V_r^{(n)}$.

• Sortear aleatoriamente su nuevo valor $x_r^{(n+1)}$ según una probabilidad de transición "Gibbsiana":

$$\Pi(x_r^{(n)} \rightarrow x_r^{(n+1)}) = P(x_r = x_r^{(n+1)} | V_r^{(n)})$$

Para toda configuración inicial $\eta \in \Omega$ y toda configuración $\omega \in \Omega$ se tiene:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} P(x^{(n)} = \omega | x^{(0)} = \eta) = \Pi(\omega) \quad (13)$$

La expresión anterior se identifica como el teorema de relajación o muestreador de Gibbs, donde,

η = configuración inicial

ω = configuración n .

Ω = conjunto de configuraciones.

esto es, cuando n tiende al infinito la configuración ω sigue siendo una cadena de Markov.

$\Pi(\omega)$ corresponde a la medida de probabilidad definida por una cadena de Markov. Con ello, existe una convergencia hacia una realización dada, con una probabilidad que sigue la distribución de Gibbs global.

En teoría, para asegurar muestrear (generar) la imagen siguiendo la buena ley de probabilidad, es necesario efectuar un número infinito de barridos. En la práctica, pueden emplearse dos criterios para detener el algoritmo:

- a) Por el aspecto visual del resultado.
- b) Por la variación de la tasa de cambio entre la imagen n y la $n-1$.

4.6.1.2 Algoritmo de metrópolis a temperatura constante.

Se trata también de un método de relajación en el que se efectúan barridos sobre la imagen y en cada pixel se tiene la posibilidad de efectuar cambios en el estado del pixel. Estos cambios involucran una variación de la energía del campo $U(x)$.

Algoritmo:

- Inicialización de la solución $x^{(0)}$.
- En cada etapa (n):
 - * Escoger al site $r = x^{(n)}$. Su valor es $x_r^{(n)}$ y su configuración de vecindad es $V_r^{(n)}$.
 - * Efectuar el sorteo de una variable de distribución uniforme $\xi \in \Omega$.
 - * Calcular la variación de la energía local asociada

$$\Delta U = U(\xi | V_r^{(n)}, Y) - U(x_r^{(n)} | V_r^{(n)}, Y) \quad (14)$$

en este último paso existen dos eventualidades:

a) $\Delta U \leq 0$: puesto que la energía disminuye, el cambio es aceptado incondicionalmente, entonces $x_r^{(n+1)} = \xi$.

b) $\Delta U > 0$: el cambio es aceptado o rechazado efectuando un sorteo aleatorio con las probabilidades respectivas,

$$p = \Pi(x_r^{(n+1)} = \xi) = \exp(-\Delta U) \quad \text{aceptado}$$

$$1 - p \quad \text{rechazado}$$

donde X es la imagen original y Y la imagen de clases.

Sea ξ_2 la variable obtenida en el sorteo aleatorio, entonces $x_r^{(n+1)} = \xi$ si $\xi_2 < p$.

Comentarios:

Se observa que para toda $\eta \in \Omega$ y toda $\omega \in \Omega$,

$$\lim_{n \rightarrow \infty} P(x^{(n)} = \omega | x^{(0)} = \eta) = \Pi(\omega) \quad (15)$$

ΔU corresponde a la variación tanto de la energía local como de la energía global asociada a la transición $x_r^{(n)} = \xi$. Tal caso resulta de la estructura markoviana de la distribución a posteriori $P\{Y = y | X = x\}$ y de la estructura de $V(y|x)$ bajo forma de la suma de los potenciales y cliques.

4.6.2 Algoritmo de optimización.

Habiendo definido ya una distribución de probabilidad a posteriori $U(y|x)$ existe un algoritmo de optimización, es decir para la estimación de y .

4.6.2.1 Algoritmo Máximo a Posteriori (Maximum a posteriori MAP).

Uno de los grandes intereses de los métodos markovianos reside en la posibilidad que ellos ofrecen de poder efectuar estimaciones en el sentido MAP. Aquí, interesa maximizar la ley de probabilidad de la función buscada (segmentación, restauración, etc.), condicionada a las medidas hechas (en la imagen).

Por Bayes

$$P(X|Y) = \frac{P(Y|X)P(X)}{P(Y)} \quad (16)$$

$P(Y|X)$ describe enteramente al proceso de adquisición de la imagen.

$P(X)$ es el modelo markoviano, puede ser, en este caso de Potts o de Ising.

El método de MAP consiste efectivamente en encontrar la configuración x que maximice la distribución a posteriori:

$$x = \arg \max P(X=x|Y=y) = \arg \min U(x|y) \quad (17)$$

En la práctica, se utiliza un algoritmo de Metrópolis a temperatura variable a fin de minimizar la energía $U(x|y)$. El algoritmo general es el siguiente:

- Inicialización de la solución: $x^{(0)}$.
- Dar un conjunto de temperaturas tendientes a cero:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} T_n = 0$$

- Para cada iteración (n):

Escoger el site: $r = s^{(n)}$. Su valor es $x_r^{(n)}$ y su configuración de vecindad es $V_r^{(n)}$.

Crear una variable aleatoria uniforme $\xi \in \Omega$.

Calcular la variación de energía local asociada:

$$\Delta U = U(\xi | V_r^{(n)}, Y) - U(x_r^{(n)} | V_r^{(n)}, Y) \quad (18)$$

$x_r^{(n+1)} = x_r^{(n)}$ si $\Delta U \leq 0$

$x_r^{(n+1)} = \xi$ con la probabilidad:

$$\pi(x_r^{(n)} \rightarrow \xi) = \exp\left(-\frac{\Delta U}{T_n}\right) \text{ si } \Delta U > 0 \quad (19)$$

En la práctica se simula la probabilidad $\pi = \exp\left(-\frac{\Delta U(\eta)}{T}\right)$ efectuando el "tiraje" aleatorio de una variable $\eta \in [0, 1]$. Si $0 \leq \eta \leq p$, se efectúa la transición $x_r^{(n+1)} = \xi$. En caso contrario $x_r^{(n+1)} = x_r^{(n)}$.

4.6.2.2 El recocido simulado (simulated annealing).

Los campos de Markov, además de ser un conjunto de metodologías para el análisis y la representación de imágenes, están ligados a un método específico de optimización: el recocido simulado. Este algoritmo permite resolver el problema de estimación en el sentido del MAP. Además, el recocido simulado asegura la convergencia hacia un *óptimo global* del problema.

En la práctica se utiliza un algoritmo de Metrópolis de temperatura variable con el fin de minimizar la energía $U(x|Y)$. El objetivo del problema de optimización consiste en encontrar un elemento de Ω_0 , donde:

$$\Omega_0 = \{\omega \in \Omega \text{ donde } \omega \text{ es de energía mínima.}\}$$

a) Si U^* es la energía máxima en todas las configuraciones y U_* es la energía mínima, la desviación entre las dos energías es $\Delta U = U^* - U_*$.

b) Al emplear un muestreador de Gibbs con una temperatura T_n que varía después de cada barrido, la variación de la temperatura deberá seguir el esquema:

- $T_n \rightarrow 0$ cuando $n \rightarrow \infty$.
- $T_n \geq \frac{N\Delta U}{\log(n)}$ para $n \geq 2$ donde N es el número de sites en la imagen.

c) Para toda configuración inicial η (de la imagen) y para toda configuración ω , se tiene,

$$\lim_{n \rightarrow \infty} P(x^{(n)} = \omega | x^{(0)} = \eta) = \Pi(\omega) \quad (20)$$

Algoritmo:

1. Inicialización aleatoria de la solución: $x^{(0)}$.

Escojer una temperatura inicial $T^{(0)}$ suficientemente elevada.

2. En cada etapa (n):

- escoger el site $r = x_r^{(n)}$, su valor es $x_r^{(n)}$ y su configuración de vecindad es $V_r^{(n)}$.
- efectuar el sorteo aleatorio uniforme de una variable $\xi \in \Omega$.

3. Criterio Metrópolis: calcular la variación de energía local asociada:

$$\Delta U = U(\xi | V_r^{(n)}, Y) - U(x_r^{(n)} | V_r^{(n)}, Y) \quad (21)$$

dos eventualidades:

- si $\Delta U \leq 0$, $x_r^{(n+1)} = \xi$
- si $\Delta U > 0$, $x_r^{(n+1)} = \xi$ con probabilidad

$$\Pi(x_r^{(n+1)} \rightarrow \xi) = \exp\left(-\frac{\Delta U}{T_n}\right) \quad (22)$$

4. Serie de temperaturas decrecientes hacia 0: $\lim_{n \rightarrow \infty} T_n = 0$.

Comentarios:

* Como precedentemente, $\Delta U = U(\xi | V_r^{(n)}, Y) - U(x_r^{(n)} | V_r^{(n)}, Y)$ representa tanto la variación local de energía, como la variación global de la energía asociada a la transición $x_r^{(n+1)} \approx \xi$.

* La convergencia del algoritmo hacia el mínimo global de la función de energía, independientemente de la configuración inicial se da cuando:

$$T_n > \frac{c}{\log(n+1)} \quad (23)$$

para n grande, donde c es una constante que depende de la expresión de la función de la energía a minimizar $U(x|y)$.

* En la práctica, se simula la probabilidad $p = \exp\left(-\frac{\Delta U^{(n)}}{T}\right)$ efectuando el sorteo aleatorio uniforme de una variable $\eta \in [0,1]$.

Entonces, si $0 \leq \eta \leq p$, $x_r^{(n+1)} = \xi$, $x_r^{(n+1)} = \xi$, en caso contrario, $x_r^{(n+1)} = x_r^{(n)}$.

* En la práctica, los esquemas de descenso de temperatura son del tipo $T^{(n)} = \frac{c}{\log(n+1)}$,

e incluso $T^{(n+1)} = \alpha \cdot T^{(n)}$.

Cuando T es mayor a un valor determinado entonces del paso 4 volver al paso 2.

Decremento en temperatura.

Temperatura inicial: $T^{(0)}$ debe ser tan alta que virtualmente todas las transiciones propuestas son aceptadas. Tal valor no es fácil de determinar ya que está relacionado con los valores máximos y mínimos de la función de energía a minimizar. Teóricamente

$T_k \rightarrow 0$ no más rápido que $\frac{c}{\ln(k)}$ para una constante c independiente de k. Sin embargo, en este esquema el descenso resulta demasiado lento.

4.7 Conclusiones.

La teoría de los campos aleatorios de Markov ha sido ampliamente utilizada en la segmentación de imágenes. En el caso del presente trabajo la teoría anteriormente mencionada se usó para tratar de separar el mar de la zona terrestre obteniéndose buenos resultados. Sin embargo, fue necesaria una gran cantidad de experimentos para obtener los resultados deseados. En los experimentos fueron variados parámetros tales como el número de iteraciones y las medias. Los resultados son mostrados en el siguiente capítulo.

CAPÍTULO V.

DETECCIÓN DE LÍNEAS DE COSTA EN IMÁGENES SAR MEDIANTE EL EMPLEO DE LA TRANSFORMADA POLINOMIAL Y CAMPOS DE MARKOV.

5.1 Introducción.

La detección de líneas de costa es crucial cuando se está en busca de la descripción de zonas costeras. La cartografía, los estudios de evolución geográfica y la navegación automática requieren información adecuada sobre las líneas de costa. Por otro lado, el

uso de radares de apertura sintética se está haciendo más popular que las imágenes tomadas en el rango visible de luz (por ejemplo fotografías), debido a su capacidad de captación incluso bajo condiciones meteorológicas adversas.

Sin embargo, la baja calidad de las imágenes SAR hace muy difícil el poder extraer información de ellas y conjuntamente garantizar una buena detección. Lee y Jurkevich [4] proponen lograr una separación entre mar y tierra antes de aplicar un algoritmo de detección de línea de costa en imágenes SAR. Utilizan una secuencia de procedimientos de baja resolución así como un algoritmo de rastreo de contornos. Pero en general, el filtrar y el usar procedimientos de baja resolución se traduce en pérdidas en la precisión de la detección. Wu [5] propone una combinación de una aproximación piramidal con una propagación dinámica para la detección de líneas de costa. Comenzando en una muy baja resolución se detecta la frontera costera y se propaga a través de las escalas de resolución. Una limitante importante de la programación dinámica es el costo computacional. Aún en representaciones de baja resolución el tiempo de procesamiento es muy considerable. Al usar campos aleatorios de Markov (MRF), las propiedades de la imagen son controladas por las propiedades locales solamente. Modelar las interacciones entre los píxeles adyacentes se ha convertido en una herramienta muy usada en el procesamiento de imágenes. En este contexto, Zhang [6] procede a la separación entre el mar y la tierra por medio de la distribución de Gibbs. Sin embargo, como no existe compensación para la correlación del ruido, este método puede arrojar segmentaciones erróneas cuando se aplica a imágenes moderadamente contaminadas por ruido.

El ruido complica las propiedades estadísticas de la imagen. Así pues, el poder de discriminación de los estimadores clásicos se ve reducido drásticamente. Los modelos de filtrado de ruido basados en modelos de ruido independientes fallan debido a la correlación y las características del ruido dependientes de la imagen.

En este capítulo se propone un método con el cual se pueden obtener resultados confiables en la detección de las líneas de costa. El algoritmo empleado se resume a continuación:

- Primeramente se construye una pirámide derivada de la imagen original, que en este caso es de 1024X1024 píxeles, hasta un nivel de 256X256 píxeles.
- Posteriormente, tanto la imagen de 256X256 píxeles como la de 1024X1024 píxeles se restauran empleando el esquema de la transformada polinomial.
- Seguido de ello se trabaja con la imagen restaurada de baja resolución y se clasifica mediante el empleo del modelo de Potts de campos aleatorios de Markov para después obtener la línea de costa en baja resolución.
- Después de esto, se proyecta la línea a una matriz de 1024X1024 píxeles y se amplifica su ancho a 12 ó 20 píxeles en alta resolución.
- Ya a esta resolución y con la imagen restaurada a resolución original, se aplica el modelo de Ising de campos de Markov para extraer la línea de costa en alta resolución que finalmente se superpone sobre la imagen original.

Este método es aplicado a dos imágenes de la Guyana francesa adquiridas mediante el sistema SAR del Satélite de Percepción Remota ERS-1 durante la misma época del año pero con un año de diferencia. Las imágenes se muestran en las figuras 5.1.a y 5.1.b. Lo anterior se describirá a lo largo del capítulo.

5.2 Pirámide gaussiana.

Las pirámides en el procesamiento de imágenes han encontrado una variada gama de aplicaciones en el procesamiento de imágenes. Su principal ventaja es que al pasar a un nivel inferior el tiempo de procesamiento se reduce considerablemente. En el presente trabajo se procesan imágenes cuadradas de dimensiones de 1024X1024 píxeles, que serán llamadas "de alta resolución" o "de resolución original". Se llega a un nivel de 256X256 píxeles mediante el empleo de la pirámide y que será llamado en adelante "de baja resolución". Así pues, el empleo de pirámides representa ventajas en el ahorro de tiempo y recursos durante el procesamiento.

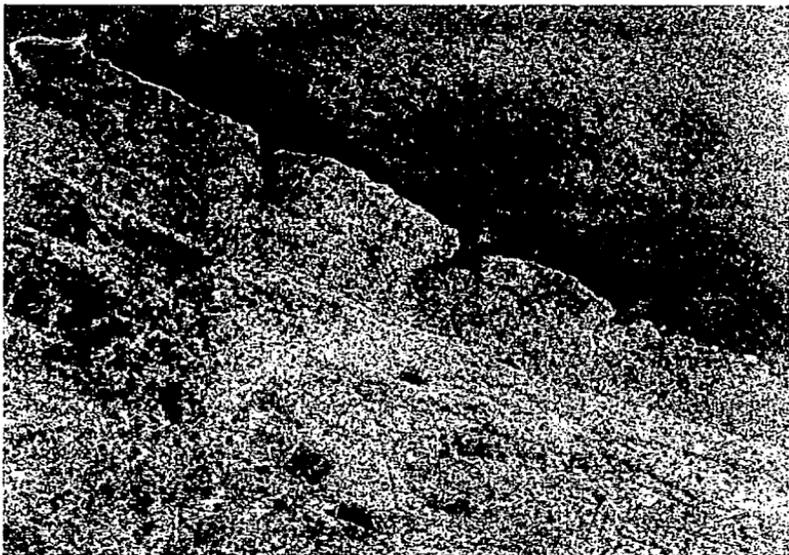


Figura 5.1 a Escena tomada por el satélite ERS-1 en 1992 Dimensiones. 1024X1024 pixeles



Figura 5.1 b. Escena tomada por el satélite ERS-1. Dimensiones: 1024X1024 pixeles

En baja resolución se calcula una aproximación de la línea de costa y después se proyecta en alta resolución para hacer una extracción más precisa. Al trabajar en baja resolución se ahorran tiempo y recursos de procesamiento siendo esto de gran ayuda debido a la cantidad de experimentos que es necesario llevar a cabo a fin de obtener los resultados óptimos. A continuación se describirá el funcionamiento y algoritmo de la pirámide gaussiana.

Sea G_k una imagen de dimensiones $R_k \times C_k$ donde R representa renglones y C columnas. Definase como G_{k+1} una imagen a escala de G_k de la mitad de tamaño, es decir, de dimensiones $\frac{R_k}{2} \times \frac{C_k}{2}$. A las G de orden k y k+1 se les denomina pirámide. Se puede pasar de la resolución k a la resolución k+1, mediante el promedio local ponderado de los píxeles en la resolución k, usando una función ventana W que para objeto de estudio es de forma Gaussiana. Una ventana de 5x5 píxeles es suficiente para transmitir la información relevante de un nivel a otro y así, el paso de la resolución k-1 a la resolución k queda como,

$$G_k(i, j) = \sum_{m=-2}^2 \sum_{n=-2}^2 W(m, n) G_{k+1}(2i + m, 2j + n) \quad (5.1)$$

para $i=1, 2, \dots, R_k/2$. La función W , por simplicidad se supone separable, esto es, $W(m, n) = W_1(m)W_2(n)$ y debe cumplir con las siguientes condiciones:

1. La función unidimensional, W_1 , debe estar normalizada, o sea,

$$\sum_{m=-2}^2 W_1(m) = 1 \quad (5.2)$$

2. Debe ser simétrica,

$$W_1(m) = W_1(n) \quad (5.3)$$

3. Debe satisfacerse la condición de igual contribución, que establece que todos los nodos de un nivel dado deben contribuir con el mismo peso total para generar los nodos en el siguiente nivel superior. Esto implica que si $W(0)=a$, $W(1)=W(-1)=b$ y $W(2)=W(-2)=c$, se requiere que $a+2c=2b$. Así, si se fija $b=0.25$, entonces,

$$W(0) = a$$

$$W(1) = W(-1) = 0.25$$

$$W(2) = W(-2) = 0.25 - a/2$$

El valor de a utilizado para lograr las imágenes en baja resolución de 512×512 píxeles y de 256×256 píxeles a partir de la de 1024×1024 fue $a=0.3$, lo que implica que $c=0.1$, puesto que con estos valores se obtuvieron los mejores resultados en las imágenes, respecto a otros que se discuten, además de dar ya un cierto grado de filtrado, de gran utilidad para el siguiente paso, la restauración mediante la transformada polinomial.

El motivo de utilizar el valor de a anterior es el siguiente: un píxel en baja resolución debe depender en gran medida de su equivalente en alta resolución, o sea que éste debe ser el píxel que más contribuya a la imagen de baja resolución. Pero si se desea suavizar la imagen contaminada deben tenerse en cuenta sus vecinos los más posibles. Sin embargo, una ventana de 5 píxeles es suficiente para definir las propiedades de un píxel determinado en baja resolución. Con $a=0.3$, los píxeles de los extremos de la ventana, todavía pueden contribuir relativamente (0.1 ó 10% del valor final), lo que hace que la imagen se suavice. Si se utilizan valores de a menores a 0.25 entonces los píxeles "medios" de la ventana contribuirán más al valor del píxel en baja resolución y no el central. Si se usan valores superiores o iguales a 0.5 entonces la ponderación de los píxeles de los extremos de la ventana será negativa o cero respectivamente. Con $a=0.4$ la contribución de los píxeles de los extremos se reduce a 5%, lo que hace al valor del píxel en baja resolución más dependiente de los píxeles del centro de la ventana.

El filtrado gaussiano tiene la característica de presentar una alta atenuación en los componentes de las altas frecuencias, que están más allá de la banda de paso en cada uno de los niveles de la pirámide. Cada uno de los niveles superiores, representa una

estimación del nivel anterior donde se tienen solamente una cuarta parte de los coeficientes estimados.

Los resultados de la aplicación de la pirámide a las imágenes de las figuras 5.1.a. y 5.1.b. se muestran respectivamente en las figuras 5.2.a y 5.2.b.

5.3 La transformada polinomial.

El ruido que figura en las imágenes SAR como pequeñas manchas es debido a la interferencia de ondas esparcidas de otros lugares o regiones. Desde una célula a otra, las ondas transmitidas debidas al esparcimiento pueden interferir constructivamente o, de manera contraria, destruirse unas a otras. La presencia de éste ruido crea problemas en la interpretación de la imagen.

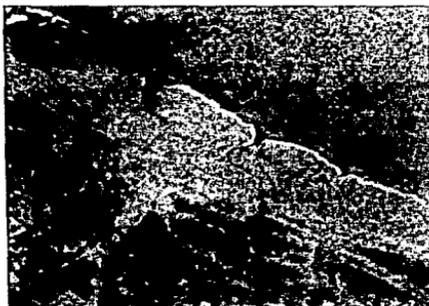
El empleo de la transformada polinomial puede ser de gran ayuda en el filtrado de la imagen. En el caso del presente trabajo es de utilidad para rescatar el contorno de la línea de costa. En el capítulo 3 se discutieron las propiedades de la transformada polinomial, así como un algoritmo para eliminar ruido y detectar los contornos relevantes. En la presente sección se aplica el método anterior y se presentan los resultados obtenidos.

Las imágenes de entrada para este apartado son las obtenidas de la pirámide gaussiana del punto anterior, es decir, las que se muestran en las figuras 5.2.a y 5.2.b y las imágenes originales en alta resolución mostradas en las figuras 5.1.a y 5.1.b.

Los resultados que pueden obtenerse del empleo de la transformada polinomial en la restauración de imágenes dependen mucho de los valores que tomen los parámetros implícitos, por ejemplo, el tamaño de la ventana y el valor de los umbrales de energía. Por ejemplo, al utilizar una ventana de tamaño 4 se obtienen mejores resultados que al usar una ventana de tamaño 2, si se mantienen iguales los umbrales de energía en ambos casos. El ampliar la ventana trae consigo la consecuencia de que se incrementa considerablemente el tiempo de procesamiento.



(a)



(b)

Figuras 5.2. Pirámide gaussiana. (a) Correspondiente a 5.1.a, (b) correspondiente a 5.1.b.

El otro parámetro importante es el referente a los umbrales de energía. Variando éste parámetro se pueden obtener diferentes filtrados para una misma imagen de entrada. El filtrado que se obtiene con un cierto valor de umbral depende mucho de las características de la imagen de entrada. Por ejemplo, en imágenes con alto índice de ruido, como es el caso de las imágenes originales de 1024X1024 pixeles, los valores de los parámetros de umbrales utilizados a fin de obtener resultados aceptables fueron 80 y 90. Para las imágenes de baja resolución el valor del umbral de energía fue 65, arrojando muy buenos resultados. La reducción en el valor del parámetro se debe a que la imagen de 256X256 pixeles de entrada está ya previamente filtrada a causa de la pirámide gaussiana, como se explicó anteriormente.

La figura 5.3 muestra los resultados de experimentos hechos sobre la imagen mostrada en la figura 5.2.a., variando la longitud de la ventana y el umbral de energía. Sea M el tamaño de la ventana y T el umbral de energía. Entonces, en la figura 5.3.a. M=2, T=65; 5.3.b. M=4, T=0; 5.3.c. M=4, T=50. 5.3.d., M=4, T=65. Es posible notar la diferencia entre cada una de las figuras. La figura 5.3.a. muestra una imagen efectivamente suavizada pero en cierto modo "borrosa" y con los contornos ligeramente difuminados, esto es debido a que el tamaño de la ventana usado fue 2. Las figuras 5.3.b, c y d, utilizan ventanas de tamaño 4, pero el umbral de energía es diferente. Entre más grande es el umbral de energía usado, más se suavizará la imagen, esto es, más se suprimirá el ruido, pero llega un punto en que se comienzan a perder los contornos.

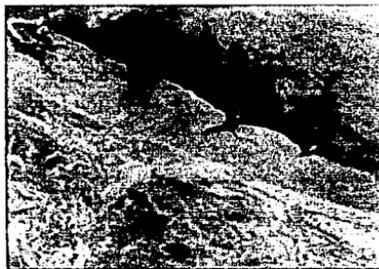
Así pues, es necesario encontrar un punto de equilibrio entre el filtrado de ruido y la conservación de los contornos. Por ejemplo, en este caso, para el caso de la figura b, donde el umbral de energía fue cero, la imagen está efectivamente filtrada pero todavía presenta un cierto grado de irregularidad en sus regiones (esto significa que si se toma una región cualquiera de la imagen la diferencia de valores entre los pixeles en ella todavía es muy grande, por ejemplo, aquí los valores podían ir desde 40 hasta 190, donde el rango máximo es 0 y 255). Lo anterior causaba problemas en el siguiente paso que es la clasificación empleando el modelo de Potts de Campos de Markov, puesto que conducía a "falsas" clasificaciones.



(a) $M=2$ $T=65$



(b) $M=4$ $T=0$



(c) $M=4$ $T=50$



(d) $M=4$ $T=65$

Figura 5.3 Resultados del empleo de la Transformada Polinomial

La figura c. utiliza un umbral de energía de 50, y como puede observarse, es ya una imagen más suave que la mostrada en la figura b, pero presenta aún diferencias grandes entre los píxeles en una región dada. La figura d. muestra el resultado de aplicar un umbral de energía igual a 65 y como puede observarse, es la imagen más suave de las cuatro mostradas, presentando diferencias entre valores de píxeles menores también a las anteriores. Con ello, la figura del inciso d fue la que se tomó para continuar con el siguiente paso, que es la clasificación. La figura 5.4 muestra las imágenes escogidas, tanto la 5.3.d como su equivalente deriva de la figura 5.2.b. que utilizó también un umbral de energía igual a 65 y una ventana de tamaño 4. La última se muestra en la figura 5.4.b.

La reconstrucción fue también aplicada a las imágenes originales en alta resolución, mostradas en las figuras 5.1.a y 5.1.b. Al igual que en el caso de baja resolución fueron realizados varios experimentos variando los parámetros. Los resultados mostrados en las figuras 5.5.a y 5.5.b son los derivados de utilizar una ventana $M=4$ y umbrales de energía igual a 90. Comparando con las originales puede observarse que la imagen obtenida después del algoritmo está bastante filtrada, pero aún los píxeles presentan una gran diferencia en valor respecto a vecinos cercanos. Sin embargo, el utilizar un valor de umbral de energía más alto se traducía en pérdidas en la definición de los contornos entre el mar y la tierra. Las imágenes mostradas en la figura 5.5 son las que se utilizarán en alta resolución en la aplicación del modelo de Ising.

5.4 Algoritmo de K-Means.

Es aquí donde se realiza la primera aproximación para obtener los umbrales que determinarán los clusters en la clasificación de la imagen para después aplicar el modelo de Potts de campos de Markov en la imagen de baja resolución. El modelo de K-means se describe a continuación.

Función criterio:



(a)



(b)

Figuras 5.4 Imágenes restauradas correspondientes a las imágenes de 5.2. $M=4$, $T=65$

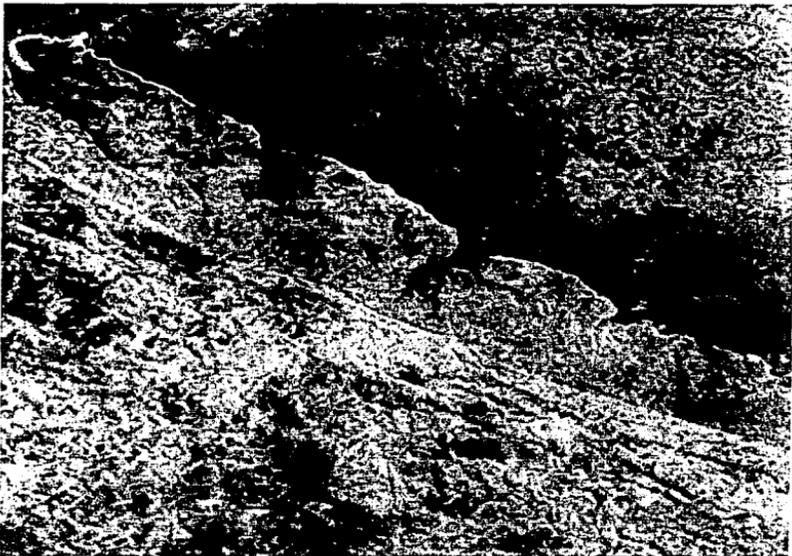


Figura 5.5 a Imagen restaurada correspondiente a la figura 5.1 a $M=4$, $E=90$. Dimensiones 1024X1024 pixeles.



Figura 5 5 b Imagen restaurada correspondiente a la figura 5 1 b. $M=4$, $E=90$ Dimensiones 1024X1024 pixeles

$$J = \sum_{j=1}^K \sum_{x \in X_j} \|x - x_j\|^2 \quad (5.4)$$

donde,

K = número de clusters.

x_j = centro para el cluster j .

X_j = subconjunto de muestras asignadas al cluster j .

Algoritmo:

1) Escoger los **K** centros iniciales para los **K** clusters $x_1(1), x_2(1), \dots, x_K(1)$.

2) En la iteración l asignar las muestras a los clusters:

Asignar x a $X_j(l)$ si $\|x - z_i(l)\| \leq \|x - z_j(l)\|$ para $j=1, 2, \dots, K$ e i diferente de j .

3) Calcular los nuevos centros de los clusters:

$$z_i(l+1) = \frac{1}{N_i} \sum_{x \in X_i(l)} x \quad (5.5)$$

con $i = 1, 2, \dots, K$,

donde N_i es el número de muestras asignadas a $X_i(l)$.

4) Si $z_i(l+1) = z_i(l)$ para $i = 1, 2, \dots, K$, el algoritmo ha convergido y debe terminar. En caso contrario debe volverse al paso 2.

El comportamiento está influenciado por:

Número de centroides escogidos (**K**).

Elección de los centroides iniciales.

Orden en el cual las muestras se toman.

Propiedades geométricas de los datos.

5.5 Aplicación del modelo de Potts de campos aleatorios de Markov y extracción de la línea de costa en baja resolución.

El objetivo de la aplicación del modelo de Potts a la imagen restaurada es el obtener una clasificación de la imagen en la que puedan ser separadas las zonas de mar y tierra para, de esa manera, poder extraer la línea de costa en baja resolución. Un parámetro requerido en el modelo de Potts es el número de clases a emplear. Aquí fueron usadas cuatro clases. Otro parámetro importante lo constituyen los centroides de los clusters de cada clase (que varían entre los valores 0 y 255 en niveles de grises) obtenidos mediante el algoritmo de K-means en el apartado anterior. Se requieren también los valores de α y β . Finalmente, el otro parámetro es el número de iteraciones deseadas.

Los valores de centroides que mejores resultados arrojaron en los experimentos fueron 60, 115, 140 y 168. Las figuras 5.6.a. y 5.6.b. muestran los resultados obtenidos con ellos. Es importante hacer varias observaciones al respecto. Las clasificaciones obtenidas diferencian ya las zonas terrestres de las zonas marinas. Sin embargo, existen aún pequeños "lagos" e "islas" en las zonas terrestres y marinas que pueden ser debidos a características especiales de la superficie en tierra o en mar. Pero asumiendo que sólo las fronteras entre el océano y la tierra son de interés esencial, los falsos lagos o islas pueden eliminarse.

Para descartar pequeñas regiones no importantes para este estudio se crea una nueva imagen llamada de etiquetas. Tomando como inicio la imagen de clases, todas aquellas regiones que no representen más de un porcentaje predeterminado en el área total de la imagen son fusionadas con regiones vecinas mayores. En éste caso el porcentaje escogido fue 0.5%. Posteriormente, a cada región en esta nueva imagen se le asigna un número. Existen tantos números como regiones en la imagen. Esta nueva imagen es la imagen de etiquetas.

El siguiente paso es la extracción de la línea de costa empleando las imágenes de clases y de etiquetas. Tanto en la imagen de clases como en la de etiquetas pueden extraerse



(a)



(b)

Figuras 5.6. Segmentación de las imágenes correspondientes a la figura 5.4, usando el modelo de Poitls de campos aleatorios de Markov

un gran número de fronteras, incluyendo la línea de costa. Se observa que los valores del gradiente en las fronteras entre el mar y tierra son altos comparados con los valores del mismo en otras regiones. Así pues, el gradiente puede constituir una referencia para la extracción de la línea de costa. El gradiente en un punto (pixel) se obtiene como:

$$\text{grad} = \sum_{j=1}^4 |I - k_j| \quad (5.6)$$

donde k_j son los vecinos del pixel i en ambas diagonales. Pero el valor del gradiente de un pixel por sí sólo resulta ser engañoso debido a que pueden existir puntos aislados con un valor alto de gradiente y puntos sobre la frontera del mar con valor bajo de gradiente. Para evitar confusiones puede trabajarse con el mismo concepto de gradiente pero en un conjunto determinado de puntos, es decir, sobre las fronteras, calculando un gradiente "ponderado" o "promediado" en cada frontera. El gradiente ponderado se obtiene de sumar todos los gradientes en una frontera y dividir este resultado entre el número total de píxeles en esa frontera.

Considérese la imagen de etiquetas, donde las pequeñas regiones han sido absorbidas por las regiones mayores, e identifíquense las fronteras (que es simplemente verificar el cambio de valor de un punto con su vecino). Ahora, sobre las coordenadas de los píxeles de las fronteras extraídas de la imagen de etiquetas, usando los valores de la imagen restaurada se obtiene el gradiente. Finalmente se obtienen los valores ponderados. Los gradientes "ponderados" son un resultado más confiable para definir que fronteras pertenecen a la línea de costa.

Realizado el proceso anterior se procede a la extracción de las fronteras con alto valor de gradiente "ponderado"¹, pero agregando a cada pixel o frontera un código relacionado con su correspondiente en la imagen de clases. Este código se determina de la siguiente manera: dado un pixel "i" frontera, considérense los valores "j" y "k" en la imagen de

¹ El hablar de valores altos de gradiente es relativo al marco de referencia. En los experimentos realizados pudo observarse que los valores del gradiente "ponderado" se dividen en dos grandes grupos, superiores e inferiores. Las fronteras que fueron extraídas correspondieron a aquellas que presentaban valores de gradiente "ponderado" altos, o sea a los que se encontraban en el grupo superior.

clases que corresponde a las clases que está dividiendo. El valor asignado a la banda de costa en ese pixel es igual a $10j+k$ ó $10k+j$ siempre y cuando el valor obtenido sea mayor a 9. Por ejemplo, si "i" es pixel frontera entre las clases 2 y 3 el código del pixel en la línea de costa será 23 ó 32 indiferentemente, pero todos los puntos sobre esa frontera deben tener el mismo 23 ó 32. Si se trata de $j=0$ y $k=1$, entonces el código del pixel en la línea de costa debe ser 10 y no 01 debido a que 01 es menor a 9. El valor de la consideración anterior será discutido más adelante, en la parte correspondiente a la aplicación del método de Ising (binario) de campos de Markov.

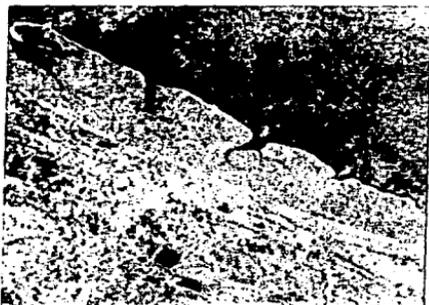
Las figuras 5.7.a y 5.7.b muestran la línea de costa extraída superpuesta sobre las imágenes originales en baja resolución mostradas en las figuras 5.2.a y 5.2.b.

El siguiente paso es la proyección de la línea de costa en baja resolución a alta resolución. Si el pixel A de coordenadas (i,j) está contenido en la línea de costa en baja resolución los valores correspondientes en alta resolución son todos los contenidos en el siguiente rango:

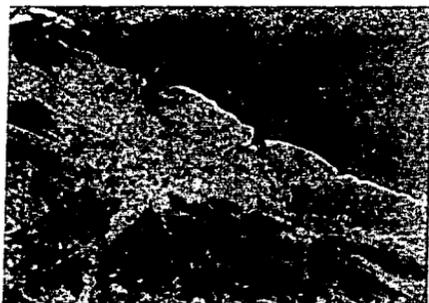
$$(4i+k, 4j+l) \text{ donde } k = 1, 2, 3, 4 \text{ y } l = 1, 2, 3, 4$$

esto es, simplemente una proyección de un pixel de 1X1 a un cuadrado de 4X4 correspondiente en alta resolución. Así pues, puede observarse que la línea proyectada en alta resolución es en realidad una banda de 4 pixeles de ancho.

La proyección anterior representa lo que podría ser la primera aproximación de la línea de costa en la imagen de 1024X1024. Sin embargo, ésta primera aproximación puede contener errores debidos a que en baja resolución se pierde información en la exactitud. Lo que en alta resolución es un cuadrado de 4X4 pixeles en baja resolución es sólo uno de 1X1 pixeles lo que acarrea pérdidas en la información. Por otro lado, al momento de decidir que puntos son frontera se tiene que escoger entre un pixel perteneciente a una clase y un pixel vecino correspondiente a otra clase distinta, porque realmente no existe un criterio que determine cuál deba tomarse o si los dos deben tomarse. Entonces, podría llegar a existir a este nivel un error de un pixel de diferencia. Lo conveniente entonces es



(a)



(b)

Figuras 5.7. Línea de costa superpuesta en imagen original en baja resolución.

usar una banda centrada en la línea de costa con dos "líneas paralelas" a la primera para así trabajar sobre ella en la extracción.

Se maneja entonces, una línea de tres píxeles de ancho en baja resolución. Así, al proyectarla en alta resolución, la banda resultante es de 12 píxeles de ancho. En teoría lo anterior sería suficiente para garantizar la localización exacta de la línea de costa en alta resolución. Sin embargo pueden utilizarse niveles de seguridad aún mayores a fin de asegurar completamente la contención de la línea en la banda. Por ejemplo, puede usarse una banda de cinco píxeles de ancho en baja resolución lo que en alta resolución equivale a 20 píxeles de ancho.

En los experimentos realizados en esta parte del proceso fueron usadas bandas de 12 y 20 píxeles de ancho obteniéndose los mejores resultados con la banda de 20 píxeles de ancho. Las bandas en alta resolución se muestran en la figura 5.8.a y 5.8.b correspondientes a sus respectivas en 5.7.a y 5.7.b.

5.6 Aplicación de modelo de Ising y detección final de la línea de costa en alta resolución.

En el apartado anterior se expuso el método para extraer la línea de costa en baja resolución y proyectar a alta resolución una banda que en teoría contiene la línea en alta resolución. Ahora, el siguiente paso es extraer la línea de costa en esta resolución. El análisis se lleva a cabo sólo sobre la banda proyectada. El tiempo de procesamiento es menor que al analizar la totalidad de la imagen.

La banda proyectada se segmenta en dos bandas más delgadas, cada una dividida en diferentes clases dependiendo de sus equivalentes en baja resolución. Por ejemplo, si un píxel de la banda obtenida en el apartado anterior tiene un valor de 32, su equivalente en alta resolución evoluciona a alguna de las dos clases (2 ó 3). Este proceso se repite sobre todos los puntos de la banda.

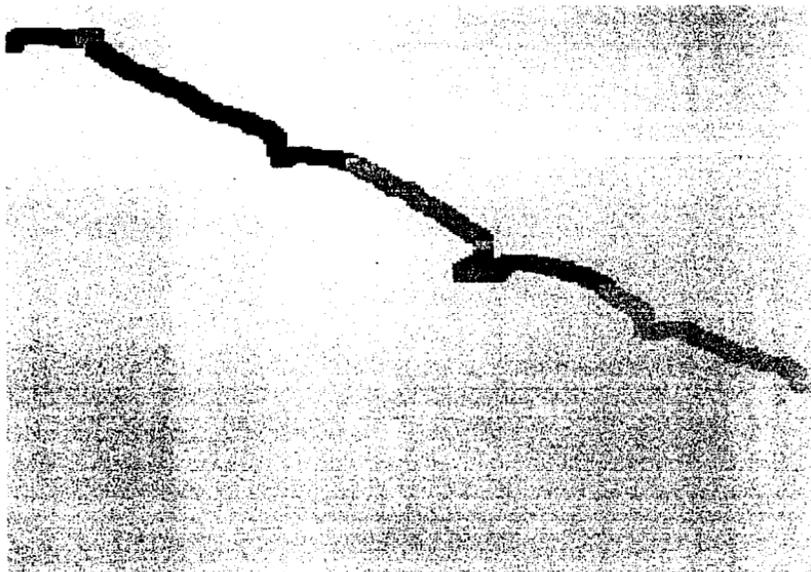


Figura 5.8 a Banda de costa en alta resolución correspondiente a la figura 5.7.a

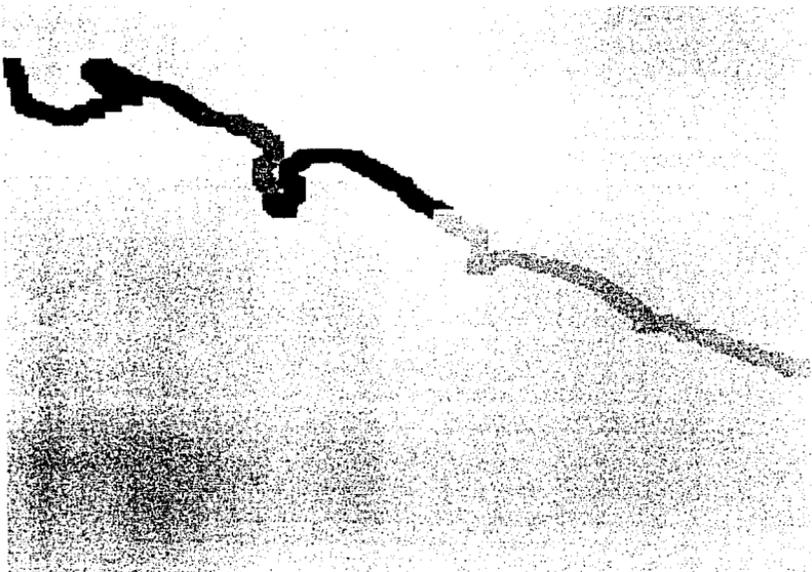


Figura 5.8 b Banda de costa en alta resolución correspondiente a la figura 5.7. b.

Es precisamente la frontera entre ambas bandas la que debería ser la línea de costa de la imagen original. En ocasiones se presenta el problema de que una de las bandas va haciéndose cada vez más delgada en una región determinada e incluso llega a desaparecer, con lo que la otra banda llega a abarcar todo el ancho de la banda principal. Ello puede ocasionar detecciones erróneas de la línea y puede evitarse colocando dos bandas laterales a la banda principal, una a cada lado, de 1 píxel de ancho con valores iguales a los de las bandas obtenidas. De un lado, la banda debe tener el valor de la clase a la que evoluciona, mientras que del otro debe tener el valor de la otra clase. Esto puede verse mejor en la figura 5.9. De esta manera, el problema de extracción de la línea final se reduce simplemente a la detección de las fronteras entre las dos bandas. La figura 5.10 muestra los resultados obtenidos de la aplicación del método a la imagen de la figura 5.8 b usando las medias 70, 100, 125 y 200 con 200 iteraciones.

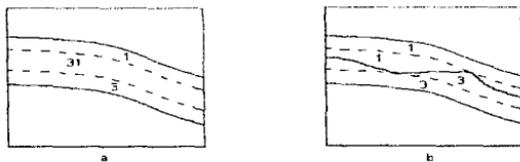


Figura 5.9. Separación de clases.

Extraída la línea de costa, el paso final es superponerla en la imagen original. Ello se muestra en las figuras 5.11.a y 5.11.b. Las imágenes originales se muestran en las figuras 5.1.a y 5.1.b.

La discusión de los resultados se presenta en el siguiente capítulo.

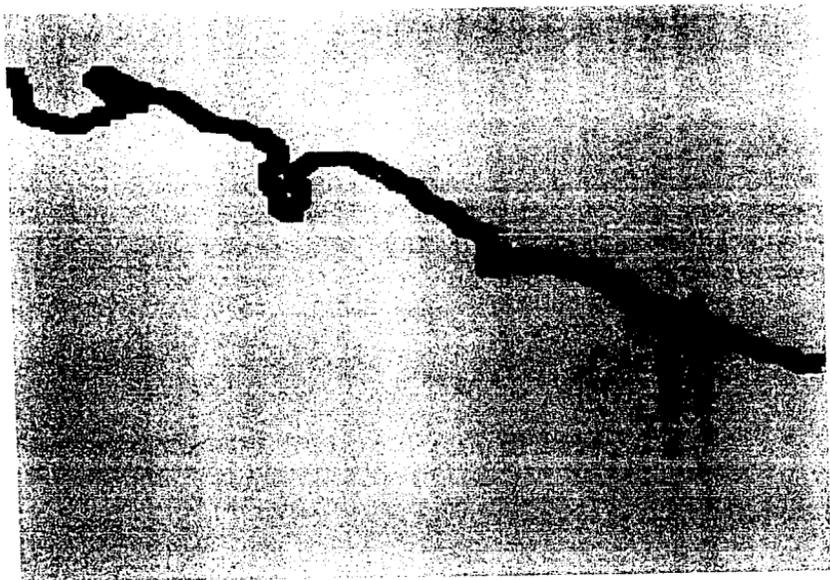


Figura 5.10 Banda de costa dividida en clases. Imagen correspondiente a la figura 5.8 b.

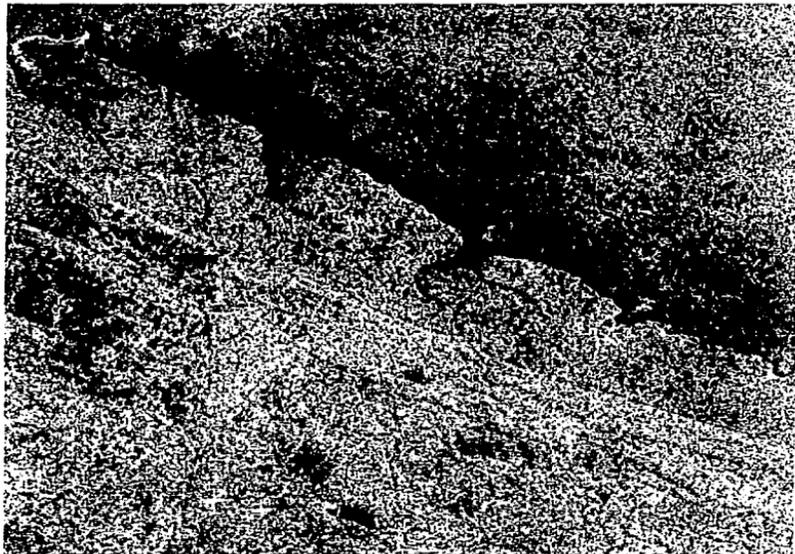


Figura 5.11 Línea de costa superpuesta sobre imagen original en alta resolución

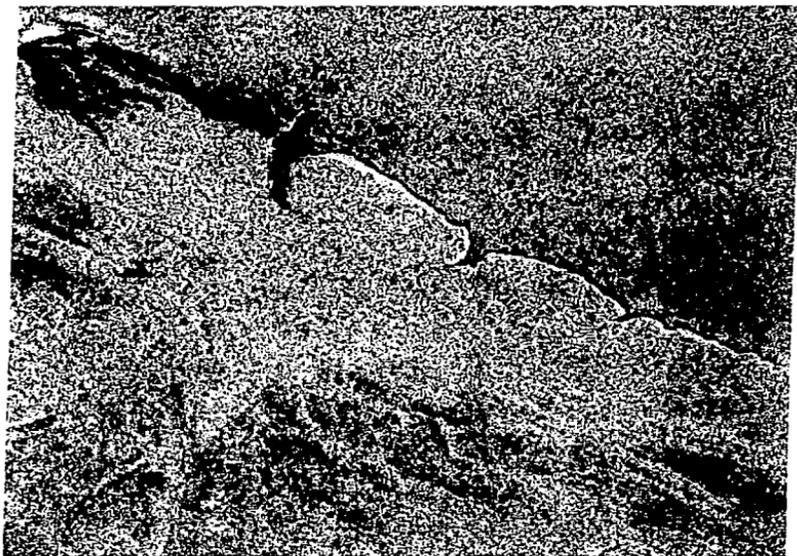


Figura 5 11.b. Línea de costa superpuesta sobre imagen original en alta resolución.

CAPÍTULO VI.

CONCLUSIONES Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.

6.1 Discusión de los resultados.

Los resultados mostrados en el capítulo anterior muestran una gran exactitud en la detección de la línea de costa. Esto demuestra que es efectivo el empleo de una técnica de restauración previa a la clasificación de la imagen, que en este caso son respectivamente, la Transformada Polinomial y los Campos Aleatorios de Markov. Además, el empleo de la pirámide gaussiana representó un ahorro en tiempo y recursos de procesamiento. El ahorro de recursos es de gran importancia sobre todo si se trata de imágenes de grandes dimensiones.

El método de restauración utilizado aquí representa un avance sobre técnicas previas, también basadas en la Transformada Polinomial en lo que se refiere a la restauración de imágenes, debido a la inclusión de una selección sensible a la dirección de los polinomios que representan a los lados o contornos relevantes, operadores muy similares a los presentes en el sistema visual humano.

Sin embargo, existen algunas regiones de las imágenes donde la línea no es muy exacta o tal vez no se sabría distinguir si esa posición es efectivamente la línea divisoria entre el mar y la tierra. Lo anterior se debe a que a pesar de que se llevo a cabo un filtrado previo, la imagen es ruidosa o bien el contorno no está bien definido provocando difuminación y mezcla de clases entre el mar y la tierra. Esto puede observarse en la figura 5.1.a y 5.5.a en su zona derecha donde la división entre el mar y la tierra no es muy clara. El problema radica en que la imagen original no es lo suficientemente clara. Mejores resultados fueron obtenidos con la imagen 5.1.b donde la línea de costa es bastante contrastada.

En general, cuando se está empleando la Transformada Polinomial para obtener imágenes más planas y suaves que sus originales se tiene que escoger entre la supresión de ruido y el salvar los contornos que para cada aplicación sean considerados relevantes. Para el caso de estudio del presente trabajo, el único contorno importante lo constituía la línea de costa que es bastante contrastante respecto a los demás contornos. Al ir incrementando los valores del umbral de energía en la Transformada Polinomial los contornos poco a poco van siendo absorbidos, lo que se traduce en pérdidas de información.

En otro punto, los campos de Markov deberían arrojar una segmentación adecuada a las necesidades de cada aplicación con parámetros adecuados para cada una de ellas. Sin embargo, el que el método arroje buenos resultados depende mucho de las características estadísticas de la imagen. Si en la franja de la línea de costa se tienen valores de pixeles muy dispares unos respecto a sus vecinos, entonces el algoritmo podría confundirse conduciendo a "falsas" segmentaciones. Más aún, en una imagen dada, donde las propiedades estadísticas de la imagen no cambian, al emplear el algoritmo de campos aleatorios de Markov en alguno de sus modelos dos veces con

exactamente los mismos parámetros (medias y número de iteraciones), se obtienen resultados diferentes, acarreándose así problemas en la interpretación.

En lo referente a las medias de las clases para el modelo de Potts de los campos aleatorios de Markov se utilizó el algoritmo de K-means para obtenerlas. Sin embargo ésta es sólo una primera aproximación y los valores de las medias deben mejorarse experimentalmente o de acuerdo a la experiencia. Como se mencionó en la discusión del algoritmo de K-means, los resultados de los centroides arrojados dependen de factores tales como la elección inicial de los centroides, orden en el que se toman y las propiedades geométricas de los datos.

En lo referente al gradiente "ponderado", éste funciona como referencia en la determinación de las fronteras pertenecientes a la línea de costa. Sin embargo, fue observado que había fronteras que no pertenecían a la línea de costa y cuyo gradiente "ponderado" tenía un valor elevado, es decir, se encontraba en la parte superior. Esto podría representar un problema en la elección de fronteras pertenecientes a la línea de costa si el método fuera más automático.

Finalmente para un trabajo posterior podrían considerarse varios aspectos como es el automatizar en la medida de lo posible el método y considerar los siguientes puntos:

- Para obtener mayor exactitud podría pensarse el empleo de más niveles en la pirámide gaussiana siguiendo el mismo procedimiento. Pueden considerarse niveles de hasta 128X128 pixeles partiendo de una imagen de 1024X1024 pixeles, siempre y cuando no haya pérdida de información relevante, pasando por los niveles de 256X256, 512X512 y 1024X1024 pixeles. Se tendría una aproximación cada vez más precisa en cada uno de los niveles.
- Puede trabajarse sólo sobre una banda que tentativamente contenga a la línea de costa inclusive desde la imagen original. Así se procesaría sólo una franja de la imagen durante todo el algoritmo ahorrando una cantidad muy considerable de tiempo y de recursos. Es necesario analizar si lo anterior no se traduciría en pérdidas de información.

Bibliografía.

Artículos.

- [1]. J. Koenderink. "The structure of images". *Biolog. Cybern.*, vol 50, pp. 363-370, 1984.
- [2]. H. Asada, M. Brady. "The curvature primal sketch". *IEEE Trans. Pattern Analysis Mach. Intel.*, vol 8, pp. 2-14, Enero 1986.
- [3]. P. Burt, G. van der Wal, "Iconic Image analysis with the pyramid vision machine". *IEEE*, 1987.
- [4]. Lee, J., Jurkevich, I., "Coastline detection and tracing in SAR images", *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, Vol. 28, Julio, 1990, pp. 662-668.
- [5]. Wu, Y., Maitre, H., "Registration of a SPOT image and a SAR image using multiresolution representation of a coastline", *Proc. 10th ICPR, Atlantic City, NJ.*, 1990, pp. 913-917.
- [6]. Zhang, D., Gool, V., Oosterlinck, A., "Coastline detection from SAR images", *Proc. IGARSS'94, Pasadena, CA, Vol. IV, 1994*, pp. 2134-2136.
- [7]. Descombes, X., Moctezuma, M., Maître, H., Rudant, J., "Coastline detection by a Markovian segmentation on SAR images". *Signal Processing*, publicación de la European Association for Signal Processing (EURASIP). Marzo, 1996.

- [8]. Martens, Jean Bernard. "The Hermite Transform-Theory". IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing, Vol 38. No. 9. pp. 1595-1606. Septiembre de 1990.
- [9]. Martens, Jean Bernard. "The Hermite Transform-Applications". IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing, Vol 38. No. 9. pp. 1607-1618. Septiembre de 1990.
- [10]. Escalante, Boris., Martens, Jean., de Ridder, Huib.. "Perceptually-based digital processing techniques for noise reduction in Computed Tomography images". SPIE Vol. 1666 Human Vision, Visual Processing, and Digital Display III (1992). pp 288-299.
- [11]. Escalante Ramírez, Boris., López Miranda, Juan.. "Edge-orientation-based noise-reduction with polynomial transforms". SPIE-The International Society for Optical Engineering, Vol. 2847, Applications of Digital Image Processing XIX (1996). pp. 281-291.
- [12]. P. Carnevalli, L. Colletti, S. Patarnello. "Image Processing by simulated annealing". IBM Journal of Research and Development, pp. 29, 1995.
- [13]. Derin, H., Elliott, H.. "Modeling and segmentation of noisy and textured images using Gibbs Random Fields", IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence, 9 (1987), pp. 39-55.
- [14]. Descombes, X., Sigelle, M., Prêteux F.. "Champs markoviens gaussiens: deux méthodes d'estimation des paramètres". Reporte técnico., ENST, D009. Agosto 1992.
- [15]. Descombes, X., Prêteux, F.. "Topology and parameters estimation in MRF modeling", in Symp. SPIE, San Diego, vol. 2032, 1993, pp. 156-166.
- [16]. Descombes, X., Founder, J.C.. "A fission and fusion markovian approach for multi-channel segmentation". IGARSS'95. Florencia, Italia, 1995.

[17]. Fondeur, J.C.. "Approche markovienne pour la fusion de données en imagerie satellitaire". Memoria de fin de estudios, ENST, Dep. Imágenes, Julio, 1993.

[18]. Montiel, M., Aguado, A., Garza-Jinich, M., Alarcón, J.. "Image Manipulation Using M-filters in a Pyramidal Computer Model". IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 17, No. 11, Noviembre de 1995.

[19]. Perona, P., Malik, Jitendra. "Scale-Space and Edge Detection Using Anisotropic Diffusion". IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol.12, No. 7, Julio, 1990.

[20]. Zhenghao Shi, Ko B. Fung. "A Comparison of Digital Speckle Filters". Canada Center for Remote Sensing. IGARSS'94. 1994.

[21]. Nordström, K Niklas. "Biased Anisotropic Diffusion: A Unified Regularization and Diffusion Approach to Edge Detection. Department of Electrical Engineering and Computer Sciences. University of California, Berkeley, CA.

Libros:

[22]. Radargrammetric Image Processing.
Franz W. Leberl.
Artech House.

[23]. ERS-1.
System.
esa SP-1146.

[24]. ERS-1.
User Handbook.
esa SP-1148.

[25]. **The ERS-1 Satellite. What's it about?**

Eurimage, Roma, Italia, 1994

[26]. **Champs de Gibbs et Champs Markoviens.**

Marc Bernard, Marc Sigelle.

Telecom Paris.

Département Images.

Groupe image.

Mayo 1992.

[27]. **Champs de Markov en traitement d'images.**

Marc Sigelle.

Module CMT/.

Telecom Paris Département IMAGES.

Enero 24, 1995.

[28]. **Markov Random Field. Modeling in Computer Vision.**

S.Z. Li.

Springer.

[29]. **Markov Random Fields: theory and applications.**

R. Chellappa, J. Jain.

Academic Press, Inc., 1993

[30]. **Thèse:**

Modélisations markoviennes multirésolutions en vision par ordinateur.

Application à la segmentation d'images SPOT.

Zoltan Kato.

L'Université de Nice Sophia Antipolis.

Diciembre 20, 1994.

[31]. Thèse:

Analyse de séquences d'images satellitaires et détermination des modifications géographiques des paysages.

Especialidad: Señales e Imágenes.

Miguel Moctezuma Flores.

Presentada para obtener el grado de Doctor de L'Ecole Nationale Supérieure des Télécommunications.

ENST 95 E 011. 1995.

[32]. Tesis:

Realce y restauración de imágenes con degradación estadística en el dominio de la transformada polinomial hermitiana.

Juan Román López Miranda.

Presentada para obtener el grado de Maestro en Ingeniería Eléctrica (Electrónica)

Universidad Nacional Autónoma de México. División de Estudios de Posgrado. 1996.

[33]. Tesis:

Codificación de imágenes digitales usando una estructura de datos multi-resolución y cuantización vectorial.

Rubisel Tovilla Heredia.

Universidad Nacional Autónoma de México. División de Estudios de Posgrado. Facultad de Ingeniería. 1996.