

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA



**SISTEMAS DE ADQUISICIÓN Y PROCESAMIENTO DE IMÁGENES
SATELITALES APLICADOS A LA METEOROLOGÍA**

INFORME DE SUFICIENCIA

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO ELECTRÓNICO

PRESENTADO POR:

ENRIQUE ADAN HERIZ DIAZ

PROMOCIÓN 1992-II

LIMA-PERÚ
2002

Hae nubila tolunt obstantia solvens
(Disipa nubes y remueve obstáculos)

**SISTEMAS DE ADQUISICIÓN Y PROCESAMIENTO DE IMÁGENES
SATELITALES APLICADOS A LA METEOROLOGÍA**

SUMARIO

La meteorología, en tanto ciencia que estudia la atmósfera y los fenómenos que tienen lugar en ella, tiene como finalidad la previsión del tiempo y producir la información necesaria en forma de pronósticos. El clima ha variado junto con la evolución de la tierra y ha influido notablemente en el desarrollo de las civilizaciones, es por ello que su estudio tiene gran relevancia y los recursos tecnológicos de investigación y predicción han sido perfeccionados progresivamente.

El tratamiento digital de imágenes desarrollado en la última década en cuanto a los algoritmos y programas sobre la morfología de imágenes, el procesamiento de imágenes en color, la compresión y el reconocimiento de imágenes y los sistemas de adquisición a partir de los radiómetros y otros equipos electrónicos satelitales constituyen un gran esfuerzo de modernización que tratamos de presentar en el presente informe.

Como aplicaciones han sido tomados dos programas, uno de propósito general que incluye el procesamiento de señales y específicamente de imágenes conocido como MATLAB; el otro programa es de aplicación al proceso de imágenes adquiridas por teledetección, útil no solo en pronósticos sino también en cartografía y otros requerimientos científicos de la ingeniería, este es el SPRING, de libre disponibilidad para los potenciales usuarios.

Este es sólo un modesto paso en el proceso de investigación sobre adquisición y procesamiento de imágenes satelitales, cuyo horizonte no termina en la importante aplicación meteorológica sino que continúa en muchos campos del conocimiento humano relacionados con los recursos naturales, la ecología y la conservación ambiental.

ÍNDICE

PRÓLOGO	01
CAPÍTULO I	
DESCRIPCIÓN GENERAL DEL PROCESO DE INFORMACIÓN METEOROLÓGICA	06
1.1. El clima, nubosidad y vientos	06
1.2. Investigación y predicción meteorológica	14
CAPÍTULO II	
SISTEMAS DE ADQUISICIÓN Y ALMACENAMIENTO DE IMÁGENES SATELITALES	22
2.1. Satélites e instrumentos para la adquisición de imágenes	22
2.2. Tipos de imágenes satelitales	32
2.3. Almacenamiento de las imágenes satelitales	40
CAPÍTULO III	
PROCESAMIENTO DE IMÁGENES: TÉCNICAS DE INTERPRETACIÓN DE GRÁFICOS Y ALGORITMOS PARA EL TRATAMIENTO DE IMÁGENES	57
3.1.. Técnicas de interpretación de gráficos y codificación de colores	57
3.2. Técnicas y algoritmos para el tratamiento general de imágenes	67
3.3. Matemática de Imágenes	119

CAPÍTULO IV**INTERPRETACIÓN DE IMÁGENES SATELITALES PARA FINES****METEOROLÓGICOS** 131

4.1. Interpretación de las imágenes de nubes sensadas por los satélites 132

4.2. Análisis multiespectral 139

4.3. Realce de imágenes 140

4.4. Identificación de tormentas en imágenes satelitales 143

CAPÍTULO V**APLICACIONES: EVALUACIONES Y PRUEBAS REALIZADAS EN LAS****IMÁGENES SATELITALES** 148

5.1. El MATLAB en el procesamiento de imágenes 148

5.2. Procesamiento de imágenes con el SPRING 158

CONCLUSIONES 167**ANEXO 1:** Informativo del Centro de Predicción Numérica del Instituto Geofísico del Perú (IGP). 169**ANEXO 2:** Lista de satélites de percepción remota. 170**ANEXO 3:** Alternativas a la Transformada de Fourier: La Transformada de Hartley. 176**ANEXO 4:** Información sobre meteorología y géneros de nubes (Paralorzas, Espameteo, España). 178**BIBLIOGRAFÍA** 183

PRÓLOGO

El presente informe de suficiencia tiene como objetivo tratar acerca del procesamiento de imágenes satelitales aplicado en la predicción meteorológica. Desde los primeros satélites meteorológicos en la década de los sesenta hasta el presente la electrónica ha tenido un papel de primera importancia en diversos aspectos tales como los controles satelitales hasta los sistemas de comunicación y procesamiento de la información tierra-espacio-tierra, antes analógicos y ahora digitales.

La meteorología, en tanto ciencia que estudia la atmósfera y los fenómenos que tienen lugar en ella, tiene como finalidad la previsión del tiempo y producir la información necesaria en forma de pronósticos. El clima ha variado junto con la evolución de la tierra y ha influido notablemente en el desarrollo de las civilizaciones, es por ello que su estudio tiene gran relevancia y los recursos tecnológicos de investigación y predicción han sido perfeccionados progresivamente.

Con la evolución de las tecnologías, el procesamiento de la información meteorológica, geográfica, hidrológica, etc., también ha tenido cambios y se han integrado los sistemas de información desarrollándose el procesamiento digital de señales y específicamente de imágenes.

Siendo el objeto de aplicación en nuestro caso la meteorología, el **primer capítulo** contiene algunos conceptos básicos de esta ciencia y los fundamentos de la investigación y predicción meteorológicas basadas en la percepción remota o teledetección, entendida

como la transducción de la radiación electromagnética de los hidrometeoros y toda superficie física en imágenes y la determinación de las variables físicas del clima a partir de la interpretación de éstas.

El proceso de adquisición y almacenamiento de imágenes es el tema del **segundo capítulo** en donde tratamos acerca de los principales sistemas satelitales en órbita polar y geoestacionarios dedicados a la teledetección en general y los instrumentos que emplean para el **sensado** de imágenes de día y de noche empleando diversas técnicas para imágenes visibles, infrarrojas y otras alternativas espectrales.

De la adquisición de estas imágenes pasamos a tratar algunas técnicas importantes de almacenamiento de esta información. El registro de imágenes generalmente requiere de guardar un gran número de archivos. Esto refuerza el requerimiento para grandes cantidades de almacenamiento veloz, pero también significa que tipo de acceso a las imágenes almacenadas será necesario; por ello abordamos el tema de las técnicas de almacenamiento de imágenes con varios formatos en medios magnéticos y ópticos.

En el **tercer capítulo** tratamos acerca del procesamiento de las imágenes de propósito general, encaminándonos hacia las herramientas más apropiadas para extraer mayor información de las imágenes obtenidas por teledetección. El desarrollo de programas para procesar imágenes, requiere conocer como se representa las imágenes dentro del computador. Para un computador una imagen es un conjunto de números, ordenados en forma de matriz bidimensional. Esta información visual es tratada tanto en la escala de grises (Blanco/Negro) como en las diversas técnicas de color.

El tratamiento digital de imágenes desarrollado en la última década en cuanto a los algoritmos y programas sobre la morfología de imágenes, el procesamiento de imágenes en color, la compresión y el reconocimiento de imágenes y los sistemas de adquisición a partir

de los radiómetros y otros equipos electrónicos satelitales constituyen un gran esfuerzo de modernización que tratamos de presentar en el presente capítulo.

Asimismo, hacemos un breve enfoque de los algunos algoritmos importantes para corregir errores de procesamiento, tales como borrones; el uso del filtrado de imágenes referido por ejemplo a los bordes y/o contornos y la matemática de imágenes orientada a operar con dos imágenes para obtener un resultado especial tal como el mayor o menor brillo.

Las imágenes tratadas con diversas técnicas digitales nos proporcionan una información con un *valor agregado*, en el **capítulo cuatro** enfocamos la interpretación de estas imágenes procesadas para darles una *utilidad* de diagnóstico y predicción tal como es el objeto de la meteorología. Por citar un ejemplo, las imágenes infrarrojas deben ser entendidas como un mapa de temperaturas en el que cada color indica un rango de temperatura relacionado con las altitudes de los topes de las nubes. El radiómetro del satélite mide los niveles de radiación, clasificados por rangos, se le asigna un código de colores preestablecido.

Un aspecto interesante es el análisis multiespectral de las imágenes, otro es el realce de ciertos colores y el destaque de ciertas áreas de la imagen para enfatizar e identificar características meteorológicas y separarlas de las provenientes de la tierra y el agua. De ello se puede inferir la temperatura, dirección del viento, probabilidad de lluvias, etc., tal como se ilustra en ese capítulo.

En el **quinto capítulo**, tratamos acerca de las aplicaciones. Hemos tomado dos programas, uno de propósito general para el cómputo científico y técnico en general. Su elemento matemático básico es el cálculo matricial, desarrolla el modelado de diversos sistemas e incluye el procesamiento de señales y específicamente de imágenes conocido

como MATLAB; el otro programa es de aplicación al proceso de imágenes adquiridas por teledetección, útil no solo en pronósticos del tiempo sino también en cartografía y otros requerimientos científicos de la ingeniería, nos referimos al SPRING, de libre disponibilidad para los potenciales usuarios. Este es un sistema de información geográfica y al mismo tiempo un sistema de tratamiento de imágenes obtenidas mediante percepción remota que realiza la integración de las representaciones de datos matriciales y datos con estructura vectorial en un único ambiente.

Como un trabajo de aplicación práctica, se ha realizado una experiencia sobre el cambio de color de las imágenes mediante un programa en MATLAB y luego hemos experimentado técnicas de realce y captura de un área de imágenes satelitales con el programa SPRING, las cuales son ilustradas en el capítulo correspondiente.

Luego del desarrollo del presente estudio y experimentación nos permitimos redactar las conclusiones que consideramos pertinentes a fin de evaluar lo realizado y de darle continuidad a esta tarea de investigación.

En las páginas finales, para no limitarnos a las referencias bibliográficas, hemos adicionado las referencias en la INTERNET debido a la exigencia del tema para indagar en instituciones nacionales tales como CONIDA, IGP y SENAMHI o internacionales como INPE de Brasil, las NASA y NOAA de Estados Unidos y de otros países donde se puede solicitar información.

Este es sólo un modesto paso en el proceso de investigación sobre adquisición y procesamiento de imágenes satelitales, cuyo horizonte no termina en la importante aplicación meteorológica sino que continúa en muchos campos del conocimiento humano relacionados con los recursos naturales, la ecología y la conservación ambiental.

Para finalizar, vale un reconocimiento a todos los docentes de la facultad que han aportado sus conocimientos y ética profesional en nuestra formación, a los profesionales de diversas instituciones que han atendido nuestras consultas, a los compañeros de estudio y graduación con quienes se compartió la vida académica y el trabajo en equipo y a nuestros familiares y amigos como entorno humano imprescindible para todo ser social.

CAPÍTULO I

DESCRIPCIÓN GENERAL DEL PROCESO DE INFORMACIÓN METEOROLÓGICA

La meteorología es una ciencia que estudia la atmósfera y los fenómenos que tienen lugar en ella, denominados meteoros, estos pueden ser aéreos, acuosos, eléctricos o luminosos. Su finalidad es la previsión del tiempo y transmite la información en forma de pronósticos. Actualmente existen muchas ramas especializadas. Toda esta actividad científica requiere de los antecedentes climáticos, estaciones meteorológicas y fundamentalmente de la información satelital. Esta información satelital es procesada por computadores con software basado en algoritmos ad hoc fundamentados en el procesamiento digital de señales y particularmente de imágenes.

1.1. El clima, nubosidad y vientos

Las diferencias climáticas entre una región y otra nacen de varios factores. Uno de los más importantes es la influencia del Sol sobre el agua de los océanos y las capas de la atmósfera. Atribuyese a las manchas solares cierta influencia pues se ha detectado que las grandes lluvias suelen seguir a su aparición. Además, la superficie curva de la tierra y la inclinación de su eje (que varía con el movimiento de traslación elíptica) hacen que el Sol ilumine con rayos perpendiculares solo ciertas regiones cíclicamente presentándose las cuatro estaciones. La diferente nubosidad de la atmósfera hace variar también la influencia

del Sol. En una atmósfera sin nubes, los rayos solares llegan mas directamente a la tierra, sus rayos no son absorbidos y los días resultan más calurosos, pero las noches pueden ser mas frías, pues las nubes impiden que los rayos reflejados por la tierra se pierdan rápidamente en el espacio. Por esa causa en las grandes altitudes, donde el aire es menos denso y conserva menos el calor, las temperaturas son más bajas. En general, hay una confluencia de la temperatura, los vientos y la humedad de la atmósfera para configurar diferentes climas.

1.1.1. Las nubes son masas de vapor de agua condensado, suspendidas en la atmósfera, que presentan distintos aspectos dependientes de la altura a que se encuentran, de cómo incide la luz del Sol sobre ellas y del grado de condensación de sus partículas. El agua de la atmósfera esta sometida continuamente a un proceso cíclico de evaporaciones y condensaciones que es la base de los meteoros acuosos. La existencia de corrientes de aire ascendente, con una velocidad de 4cm./seg. o mayor, las modifica elevándolas hasta zonas mas frías de donde se precipitan, según la temperatura, en forma de lluvia o cristalizada y parte de ellas inicia una nueva ascensión.

Según las alturas y el estado atmosférico, las nubes presentan diversas formas, las mas destacadas son:

- **Cúmulos** o cúmulus, son nubes densas formadas por masas de contornos redondeados que reflejan un color blanco deslumbrante. Ocupan una altura media entre los 1500 y 2000 metros.



Figura 1.1: Nubes tipo estratocúmulos

- **Cirros** o cirrus, son nubes de aspecto fibroso de color claro, formadas por microcristales de hielo suspendidos a alturas entre los 8000 y 12000 metros.



Figura 1.2. Nubes tipo cirros sobre Sudamérica.

- **Nimbos**, son de color gris oscuro, que cierran de manera continua el horizonte, son nubes de lluvia que se desplazan a alturas de unos 1200 metros.
- **Estratos** que tienen el aspecto de capas superpuestas y ocupan las partes bajas de la atmósfera entre los 700 y 800 metros.

- Existen nubes que presentan **características intermedias** entre los tipos anteriores. Así tenemos los altocúmulos y altoestratos situadas a alturas de 8000 metros; los cirro cúmulos y cirroestratos y por ultimo los **cúmulonimbos** que son nubes de gran altura que frecuentemente dan origen al granizo, nieve y lluvia. Este tema lo ampliaremos en el capítulo IV con referencia a la identificación de las nubes desde el satélite.

La siguiente figura 1.3. es la imagen satelital de un tipo intermedio de nubes como las descritas en el párrafo anterior



Figura 1.3. Nubes de tormenta (Allmetsat).

1.1.2. Los vientos son corrientes de aire producidas en la atmósfera por varias causas naturales. Las principales causas son las diferencias de temperatura y de presión en la capa inferior de la atmósfera, que la conocemos como troposfera, tiene un promedio de unos 10 kilómetros de espesor y en ella se acumulan las tres cuartas partes del peso total de los elementos gaseosos de la atmósfera.

La rotación la Tierra en el curso de 24 horas presenta sucesivamente distintas regiones de su superficie a la acción de la radiación solar. Debido a ello, la parte expuesta a los rayos solares eleva su temperatura mientras que la otra parte desciende en su temperatura durante la noche.

Los diferentes relieves de la superficie contribuyen a la diversidad de temperaturas presentes. La figura 1.4 nos muestra el proceso de ascenso y movimiento de los vientos desde la superficie terrestre y del mar hacia las partes altas de la atmósfera.

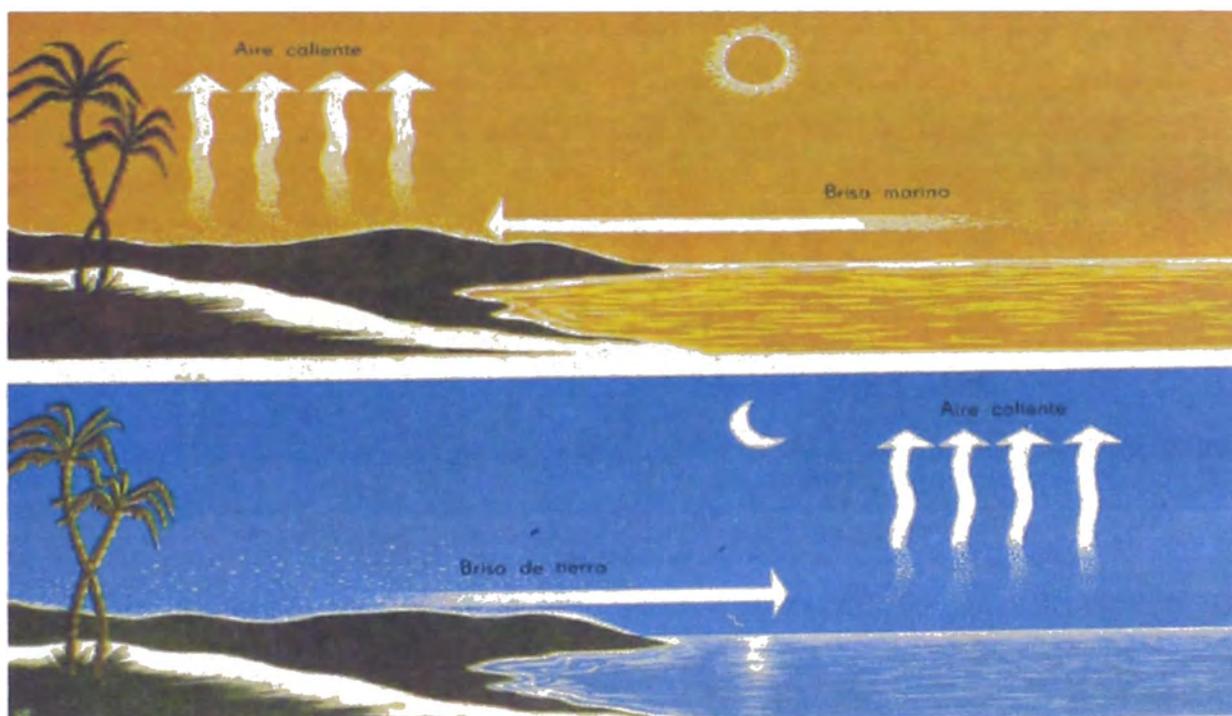


Figura 1.4. En el día el aire caliente se eleva desde la superficie y la brisa marina se dirige a la costa. Durante la noche la circulación se invierte debido al enfriamiento más rápido de la superficie terrestre.

Entre las corrientes aéreas de gran importancia para la meteorología y la navegación están los vientos alisios que en el hemisferio norte se dirigen del Polo Norte al Ecuador y

que en el hemisferio sur proceden en sentido opuesto. También aquí podemos apreciar el efecto rotacional de la Tierra para determinar la dirección de los vientos alisios y contralisios. La figura 1.5.a grafica la diferencia en la circulación de los vientos por efecto de la rotación.

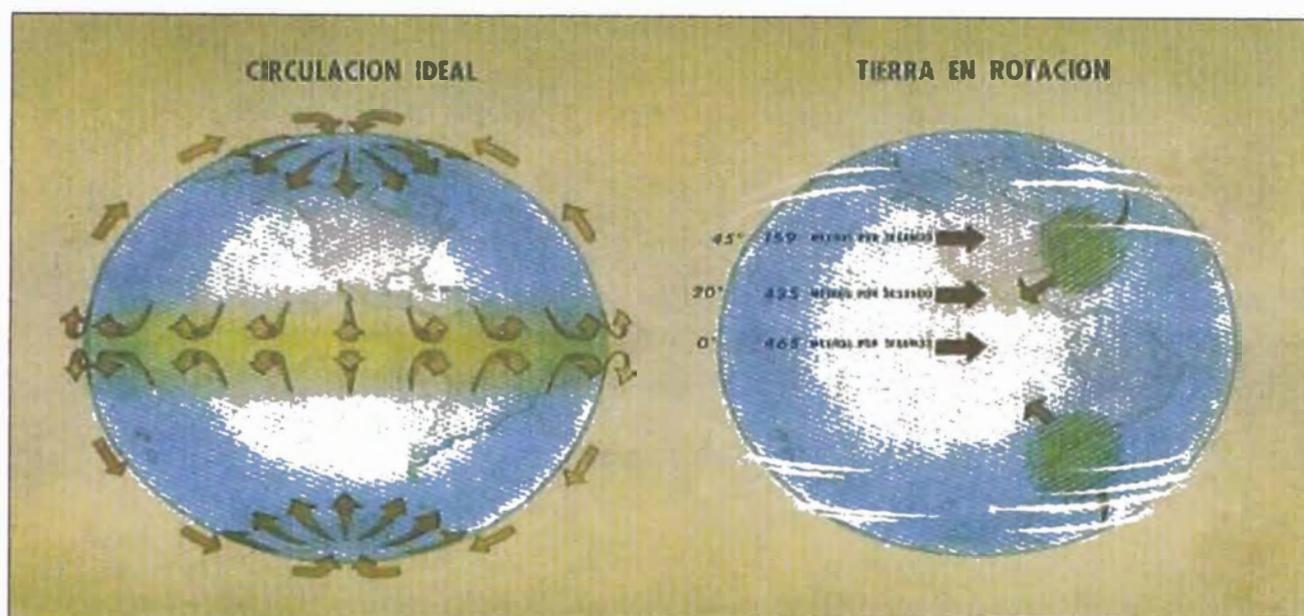


Figura 1.5.a. El aire caliente en las regiones ecuatoriales se eleva por convección y su lugar es ocupado por el aire frío. La rotación de la Tierra, cuya velocidad disminuye del ecuador a los polos, desvía los vientos de la trayectoria ideal resultando en el hemisferio norte vientos procedentes del noreste y en el hemisferio sur del sudeste.

La siguiente figura 1.5.b. nos grafica las trayectorias de los vientos alisios y contralisios de gran importancia para la navegación.

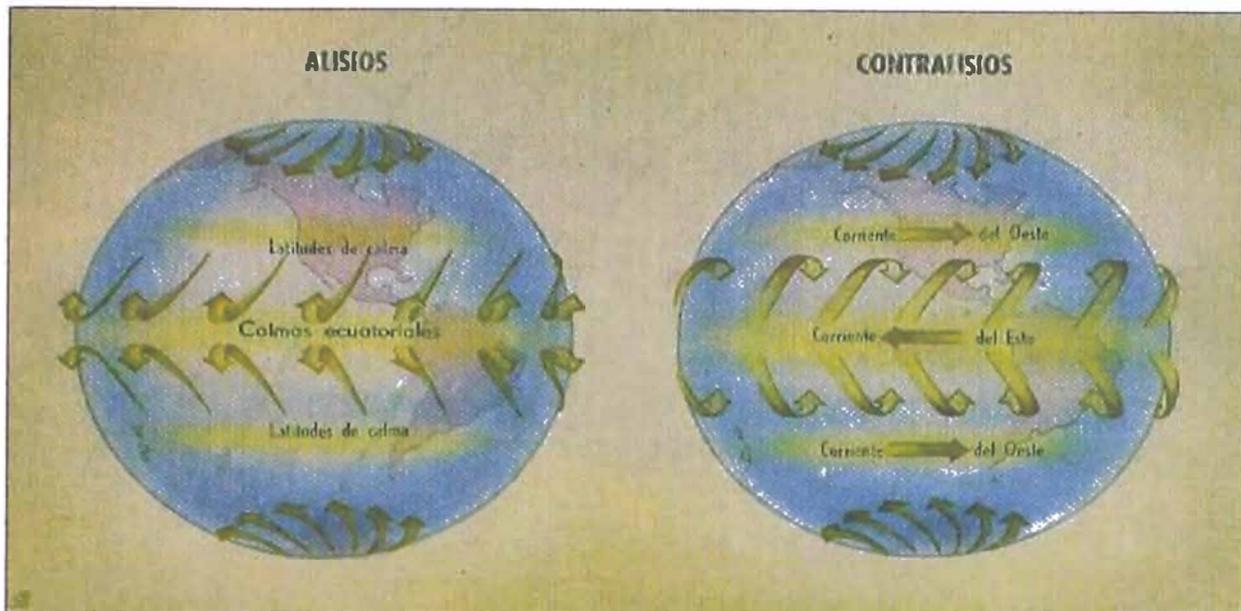


Figura 1.5.b. Desde la línea ecuatorial hasta los paralelos 30 al norte y sur circulan los vientos alisios. En las zonas más alejadas aparecen los contralisios que generan las dos corrientes del Oeste.

Un fenómeno de gran importancia es el huracán tropical o ciclón. En la circulación atmosférica hay que considerar también la existencia de grandes áreas en torno de centros de alta presión barométrica en unas zonas y de centros de baja presión en otras. Las áreas de alta presión se conocen con los nombres de **anticiclones** y las de baja presión con los de **ciclones** o depresiones. En el área de un anticiclón los vientos que giran alrededor de su centro de alta presión, se alejan de él hacia la periferia. En el hemisferio norte el movimiento de los vientos en un anticiclón al girar sobre su centro es de sentido horario y en el hemisferio sur es antihorario. En la figura 1.6.a podemos apreciar el proceso de formación de este fenómeno y en la figura 1.6.b. el giro de los vientos ciclónicos y anticiclónicos.

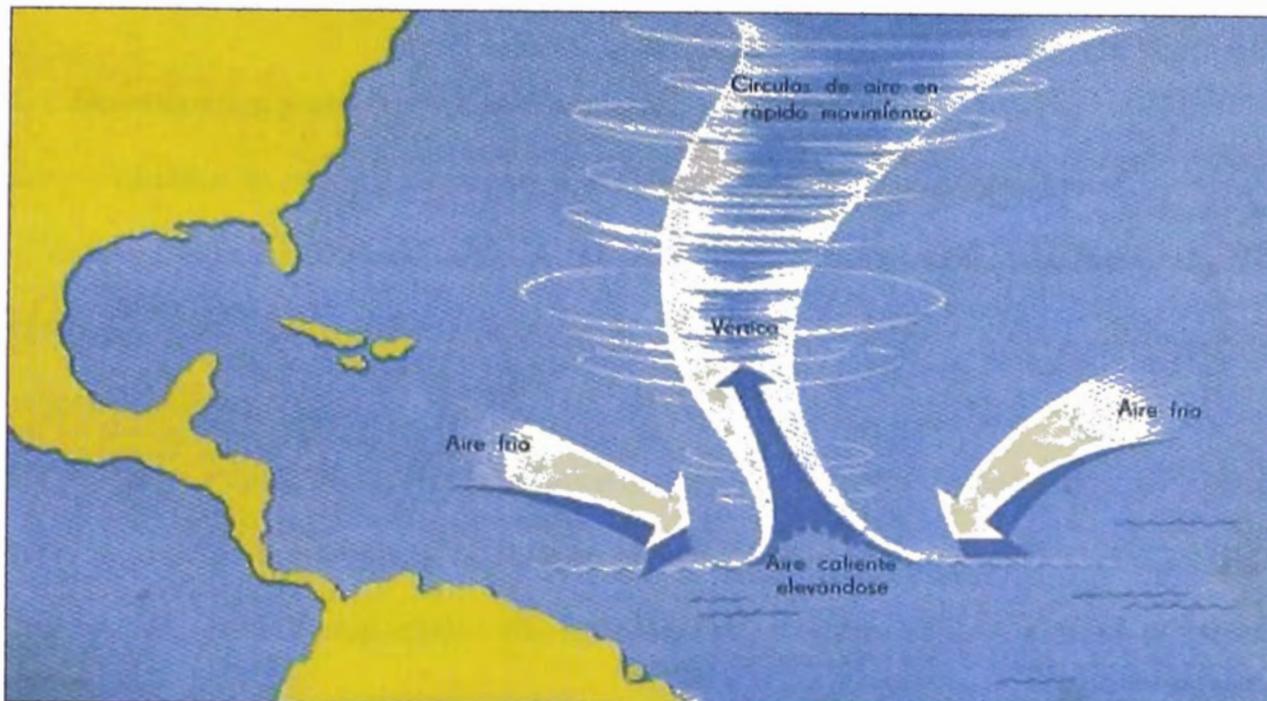


Figura 1.6.a. El contacto tangencial de masas de aire frío y caliente produce este torbellino de forma cónica invertida cuya vortice puede tener desde 10 hasta 50 Km. de diámetro.

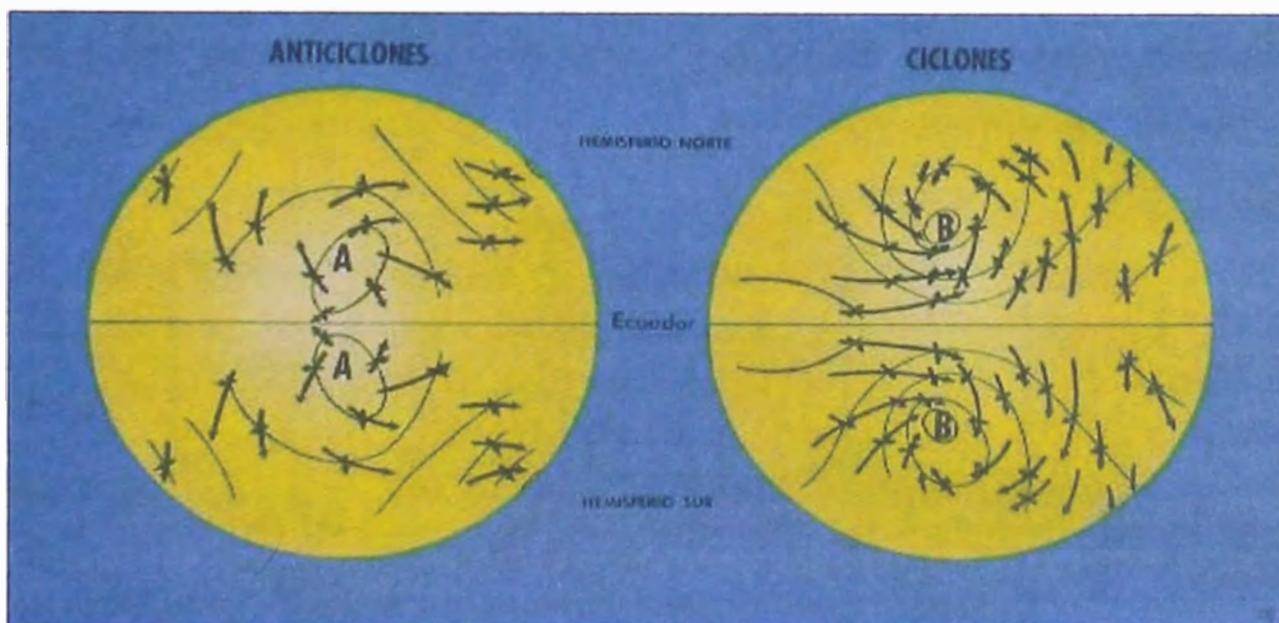


Figura 1.6.b. La dirección de las flechas indica la dirección de los vientos en el caso de alta presión barométrica (A) y baja presión barométrica (B)

1.2. Investigación y predicción meteorológica

El clima ha variado junto con la evolución de la tierra y ha influido notablemente en el desarrollo de las civilizaciones, es por ello que su estudio tiene gran relevancia y los recursos tecnológicos de investigación y predicción han sido perfeccionados progresivamente.

Actualmente, las técnicas de investigación y predicción meteorológica se sustentan en la percepción remota llamada también teledetección o sensoramiento remoto, mediante ésta se describe las propiedades físicas, obtenidas a distancia, de los hidrometeoros así como de la superficie terrestre. Sabemos que todas las sustancias que no están al cero absoluto emiten energía en forma de ondas o radiación electromagnética. El espectro electromagnético es un espectro continuo de todos los tipos de radiación electromagnética. Esta radiación es ordenada de acuerdo a su longitud de onda (λ) o por su frecuencia. A continuación podemos apreciar en la figura 1.7 el espectro electromagnético dividido en regiones de longitud de onda.

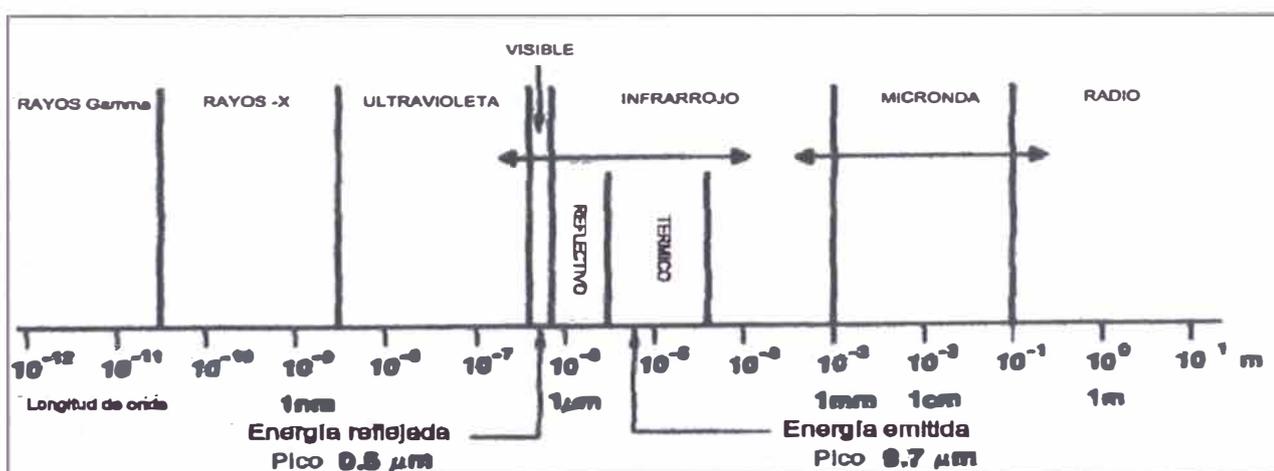


Figura 1.7. Tipos de radiación en el espectro electromagnético

El espectro visible para el observador humano, como vemos, ocupa un lugar limitado que a continuación lo podemos apreciar mejor en la figura 1.8 que nos presenta las longitudes de onda y colores correspondientes a éste.

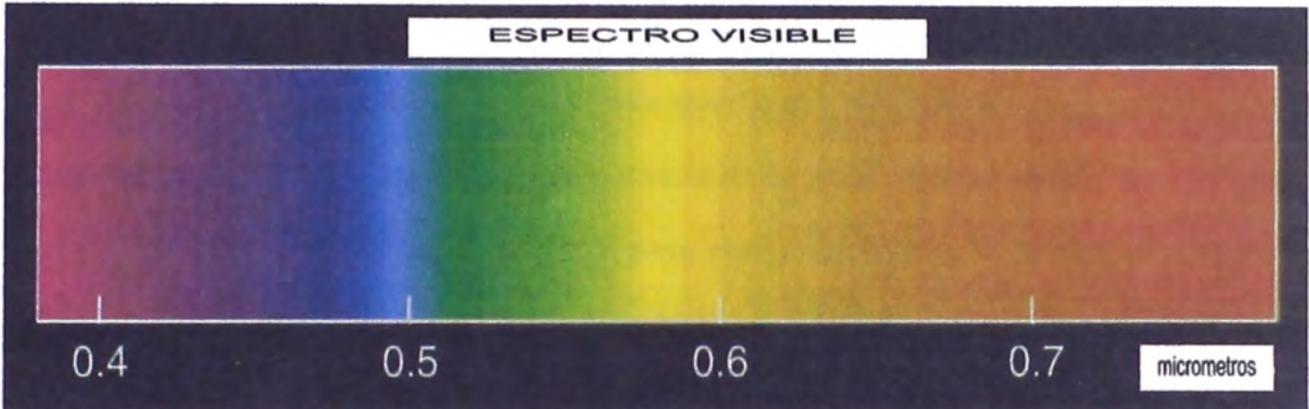


Figura 1.8. El espectro visible ordenado por longitudes de onda en micrómetros

Todos los objetos emiten energía en rangos específicos de longitudes de onda, que son conocidos como espectro del objeto. Esta radiación es interactiva con la materia, es decir que puede ser no solo emitida sino también reflejada, dispersada, absorbida y/o transmitida.

Esta interacción depende del estado de la materia (sólido, coloidal, líquido, gaseoso, etc.) y de la longitud de onda de la radiación emitida. En la figura 1.9 podemos ver los resultados mas probables de estas interacciones.

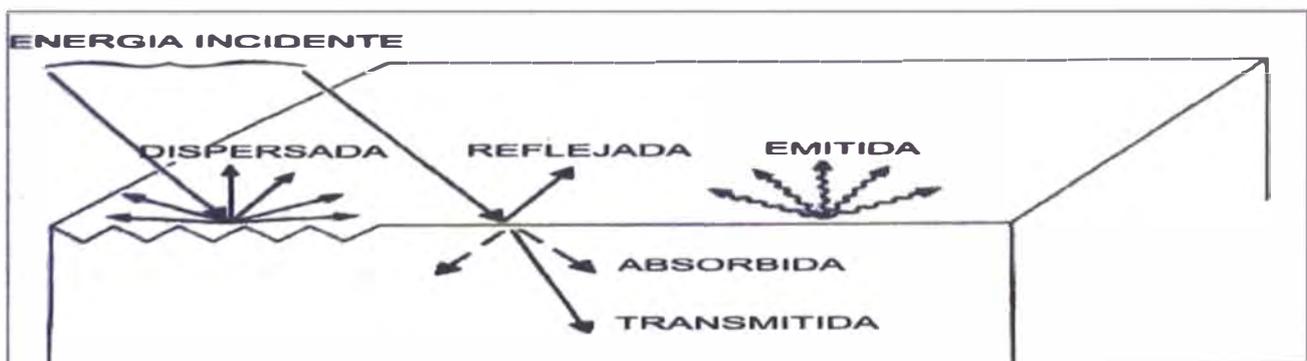


Figura 1.9. Interacciones de la radiación y la materia

Estas interacciones las podemos estudiar en la superficie terrestre y la atmósfera en las que sus componentes tales como la tierra, el agua, el hielo, el vapor de agua y otras sustancias emiten, reflejan, absorben y/o transmiten las ondas electromagnéticas en un amplio espectro.

La ley de Stefan-Boltzmann establece que la energía radiante total emitida por un cuerpo negro es proporcional a la cuarta potencia de su temperatura absoluta. Nos indica la cantidad de energía emitida por unidad de área, independientemente de la dirección. Esta es la relación que da la emitancia de radiación (ϵ_T) de un cuerpo negro en función de su temperatura absoluta (K°).

$$\epsilon_T = \sigma T^4 \quad (1.1)$$

donde σ es la constante de Stefan-Boltzmann ($5.67051 \times 10^{-8} \text{Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$)

Se dice que el cuerpo es negro si a cualquier temperatura absorbe completamente todas las ondas electromagnéticas que inciden sobre él. Los cuerpos reales no son cuerpos negros, sin embargo, por las propiedades ópticas, algunos se acercan a esa característica, como el carbón, que en la banda de luz visible poseen un **factor de absorción espectral** (α) poco diferente a la unidad ($0 \leq \alpha \leq 1$). En el otro extremo, si $\alpha = 0$, entonces no emite ni absorbe ondas electromagnéticas y se comporta como un espejo perfecto.

Un importante fundamento moderno es la ley de Planck que da la densidad espectral de la exitancia radiante de un cuerpo negro en función de la longitud de onda y de la temperatura, es quien además explicó que la absorción y la radiación se efectúan discontinuamente en forma de cuantos. Esta ley se expresa de la forma siguiente:

$$B_{\lambda}(T) = \frac{c_1}{\exp\left(\frac{c_2}{\lambda T}\right) - 1} \lambda^{-5} \quad (1.2)$$

siendo: T = Temperatura en °K y λ = longitud de onda en metros;

en donde c_1 y c_2 son constantes con los valores: $c_1 = 3.7408 \times 10^{-16} \text{ W.m}^2$ y

$$c_2 = 1.438769 \times 10^{-2} \text{ mK}$$

Otro aporte importante es la ley del desplazamiento de Wien que establece que la longitud de onda de la radiación pico de un cuerpo negro o radiador integral es inversamente proporcional a la temperatura absoluta del mismo; al aumentar esta, el pico de la curva de distribución espectral de la energía se desplaza en el espectro en el sentido decreciente de las longitudes de onda. Su expresión matemática la tenemos en la ecuación 1.3.

$$\lambda_m = \frac{2897.9 \mu\text{mK}}{T} \quad (1.3)$$

De estos fundamentos podemos inferir que la distribución espectral de radiación de un cuerpo negro depende de la temperatura; un objeto a temperatura muy alta, como el Sol,

emite una cantidad muy alta de energía a longitudes de onda más cortas, mientras que un objeto a más baja temperatura, como la Tierra, emite una cantidad de energía menor a mayores longitudes de onda. Por consiguiente, el Sol, con una temperatura superficial de aproximadamente 6000°K , tiene un máximo de $0,5\mu\text{m}$, el cual se encuentra casi en el centro del espectro visible.

Por su parte, la tierra, con una temperatura superficial de 300°K , tiene un máximo entre los 10 y $12\mu\text{m}$ en la región del infrarrojo (IR). Nuestro planeta no se comporta como un cuerpo negro radiante perfecto. La intensidad real de la radiación emitida (I) por cualquier material a una determinada longitud de onda (λ) depende de la temperatura de su superficie (T) y de la emisividad espectral (ϵ_{λ}) y se expresa como:

$$I_{\lambda} = \epsilon_{\lambda} B_{\lambda} T \quad (1.4)$$

En la superficie terrestre, el rango de emisividades para la mayoría de los materiales lo podemos considerar constante y se encuentra entre los 8 y $14\mu\text{m}$. En los casos de los bosques y la vegetación en general, así como de la nieve hay una fuerte dependencia de la longitud de onda.

Los niveles de radiancia explicados en los párrafos anteriores los podemos graficar en la figura 1.10 a continuación.

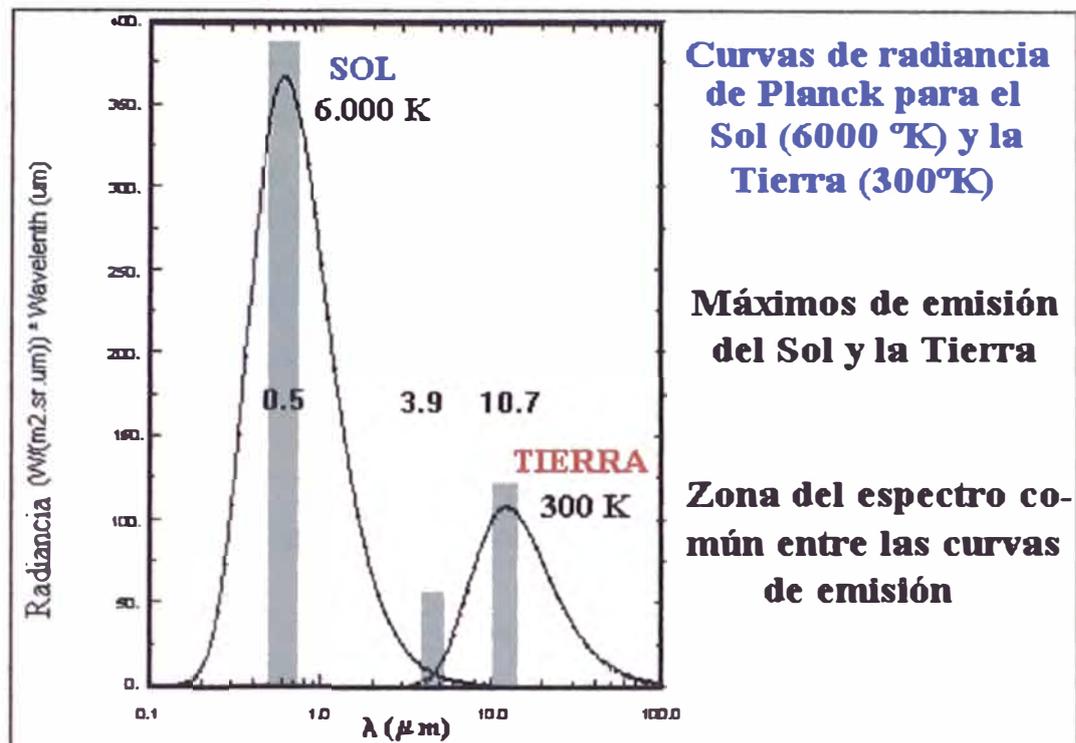


Figura 1.10: Curvas del espectro de radiación para dos cuerpos negros a 6000°K (Sol) y 300°K (Tierra) y algunas de las principales bandas espectrales utilizadas por los satélites meteorológicos operativos.

En la atmósfera terrestre, una gran parte del espectro es opaca debido a la absorción por los gases atmosféricos, sin embargo existen singularidades en varios segmentos importantes que denominamos **ventanas**, en las cuales la atmósfera es relativamente transparente. Estas ventanas están en las regiones del espectro visible (0,39 a 0,76μm), de 3,7μm, de microondas y térmica (8,5 a 12,5μm). En esta última ventana hay un máximo de absorción en 9,6μm debido a la presencia del ozono. La figura 1.11 nos presenta el espectro de la atmósfera terrestre.

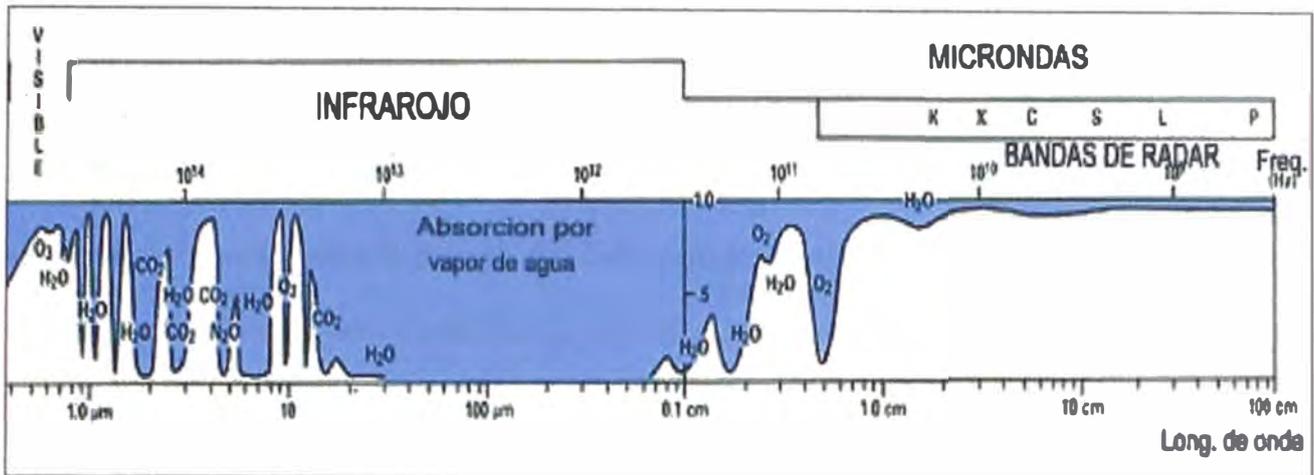


Figura 1.11. Espectro suavizado de la atmósfera terrestre

Los programas espaciales de varios países han impulsado el desarrollo de los satélites de aplicación, que proporcionan información meteorológica, retransmiten señales de comunicación, crean mapas de terrenos no cartografiados y suministran actualizaciones ambientales sobre la composición de la atmósfera. Todos los sistemas de sensoramiento remoto a bordo de los satélites incluyen las mediciones de radiación electromagnética, las cuales son emitidas, reflejadas, transmitidas y/o dispersadas por la atmósfera o la superficie terrestre. Estas mediciones permiten determinar los valores de algunas variables físicas instantáneas de importancia para el diagnóstico y predicción meteorológica.

El primer satélite dedicado a la meteorología fue lanzado el 01 de abril de 1960. A principios de la década del 70 los satélites en órbita polar de la NOAA(*) ofrecían una cobertura global en la banda del infrarrojo (IR) durante las 24 horas del día. A partir de ese momento las imágenes satelitales han sido utilizadas para localizar sistemas de climas significativos.

(*) National Oceanic and Atmospheric Administration.

Actualmente los Estados Unidos mantienen al menos dos satélites meteorológicos de la NOAA, las imágenes provenientes de esos satélites son fácilmente obtenibles para cualquiera que tenga el equipamiento apropiado o a través de la Internet. Cada satélite pasa dentro del radio de alcance de una estación terrestre una vez al día viajando de norte a sur (modo descendente) y una vez al día de sur a norte (modo ascendente). Estas pasadas están apartadas en unas 12 horas para cada satélite.

El primer satélite meteorológico operativo, llamado “Geostationary Operational Environmental Satellite 1” (GOES-1), fue lanzado el 16 de octubre de 1975. Desde el lanzamiento del GOES-2, los Estados Unidos han mantenido generalmente **dos satélites geoestacionarios** en órbita, uno a 75° de longitud oeste y otro a 135° de longitud oeste. Los dos satélites GOES actualmente en órbita tienen la capacidad de producir imágenes de los fenómenos del clima en alta calidad sobre escalas temporales y espaciales más pequeñas.

La misión GOES esta programada para proveer observaciones frecuentes y repetidas que son necesarias para detectar, seguir y predecir los sistemas de clima severo. En general son utilizados dos satélites GOES para proveer la cobertura necesaria sobre el hemisferio completo. Un satélite ocupa la posición GOES Este, ubicada sobre el Ecuador a 75° W y el otro ocupa la posición GOES Oeste, a 135° W.

En el siguiente capítulo se tratará mas detalladamente acerca de estos y otros sistemas satelitales dedicados a la meteorología en todo el mundo.

CAPÍTULO II

SISTEMAS DE ADQUISICIÓN Y ALMACENAMIENTO DE IMÁGENES SATELITALES

El procesamiento digital de imágenes en general se inicia con la adquisición de esta información, pasando luego al almacenamiento y su posterior tratamiento para de esta manera poder transmitirla y realizar la presentación e interpretación de las imágenes con un valor agregado.

Para la adquisición digital de imágenes son necesarios dos elementos:

- El primero es el dispositivo físico sensible a una determinada banda del espectro de energía electromagnética que entregue una señal eléctrica de salida proporcional al nivel de energía detectado, hasta aquí tenemos una señal analógica.
- El segundo elemento es el que convierte la señal de salida del sistema sensible en una forma digital.

2.1. Satélites e instrumentos para la adquisición de imágenes:

Existe un conjunto de sensores especializados en las bandas de rayos X, ultravioleta (UV), visible (VIS) e infrarrojo (IR). Los más usuales en el sensado meteorológico son los relacionados con luz visible e infrarroja denominados **radiómetros**. Entre los dispositivos más frecuentemente empleados con este fin también se encuentran los microdensitómetros, diseccionadores de imágenes, cámaras vidicon y matrices de detectores fotosensibles de estado sólido.

Todos los sistemas de sensoramiento remoto a bordo de los satélites incluyen las mediciones de radiación electromagnética, las cuales han sido emitidas, reflejadas o dispersadas por la atmósfera o la superficie del planeta. Estas mediciones permiten la determinación de los valores de algunas variables físicas instantáneas de la atmósfera y la superficie.

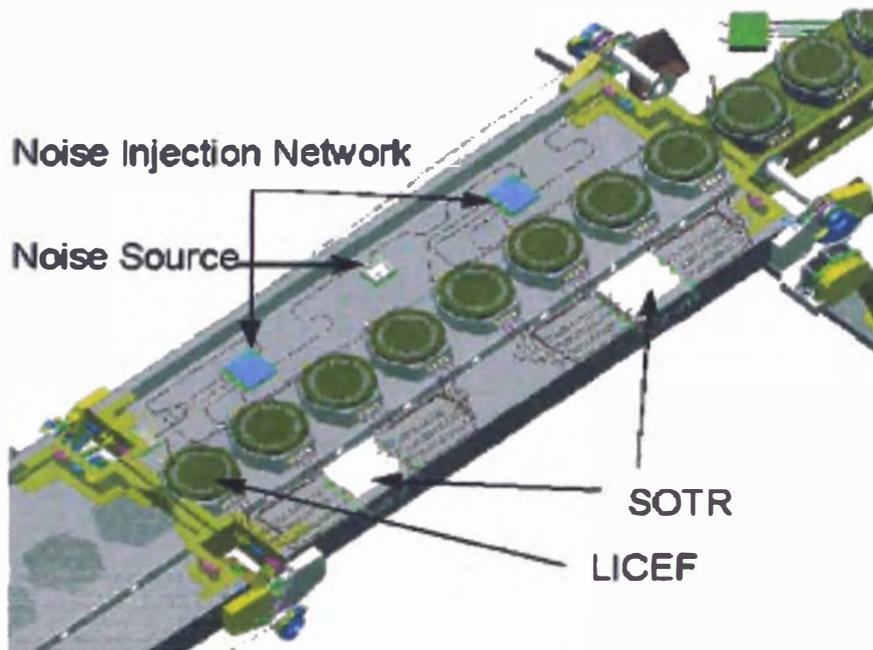


Figura 2.1: Brazo del radiómetro del satélite del proyecto MIRAS de la Agencia Espacial Europea. Será lanzado en el 2005 en la misión SMOS.

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

- La órbita debería ser circular, para garantizar que las imágenes tomadas en diferentes regiones de la Tierra tuvieran la misma resolución y escala;
- La órbita debería permitir el sensado cíclico de la superficie, para garantizar la observación periódica y repetitiva de los mismos lugares;

- La órbita debería ser síncrona con el sol (heliosíncrona), para que las condiciones de iluminación de la superficie terrestre se mantuvieran constantes;
- El horario de pasada del satélite debería atender las solicitudes de diferentes áreas de aplicación (agricultura, geología, geomorfología, meteorología, etc.).

□ SATÉLITES NOAA

En el capítulo anterior hemos explicado acerca de la agencia NOAA y sus satélites. El sensor principal a bordo de los satélites de órbita polar NOAA es conocido como Radiómetro Avanzado de Muy Alta Resolución (Advanced Very High Resolution Radiometer, AVHRR). Este es un radiómetro explorador con una resolución de 1.1 Km. y con sensibilidad en las regiones visible (VIS), infrarrojo cercano e infrarrojo térmico del espectro como podemos ver en la tabla 2.1

CARACTERÍSTICAS DEL NOAA – 14

Canal	Resolución	longitud de onda (μ m)	Nombre de la banda
1	1.1 Km.	0.63	VIS
2	1.1 km	0.91	NIR
3	1.1 Km.	3.72	MIR
4	1.1 Km.	10.75	IR
5	1.1 Km.	12.00	IR

Tabla 2.1

□ SATÉLITES GOES

Los satélites geoestacionarios GOES tienen la capacidad de observar la esfera terrestre completa tanto en la región VIS como en la IR del espectro. Los nuevos satélites GOES, tales como el GOES-8, poseen un radiómetro con cinco canales que podemos ver en la tabla 2.2.

CARACTERÍSTICAS DEL GOES – 8

Canal	Resolución	Longitud de onda (μ m)	Nombre de la banda
1	1 Km.	0.65	VIS
2	4 Km.	3.90	IR
3	8 Km.	6.75	WV
4	4 Km.	10.70	IR
5	4 Km.	12.00	IR

Tabla 2.2

□ Otros satélites utilizados en la percepción remota

La tabla siguiente presenta las características de los sistemas LANDSAT, SPOT y ERS-1.

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

□ Satélites LANDSAT

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

Los LANDSAT 1 y 2 llevaban a bordo dos sistemas sensores con la misma resolución espacial, pero con diferentes concepciones de sensado de imágenes: El sistema RBV, con sensado instantáneo de toda la escena y el sistema MSS, con sensado del terreno por barrido de líneas (line-scanner).

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

A partir de los LANDSAT 4 y 5, en vez del sensor RBV, la carga útil del satélite pasó a contar con el sensor TM (THEMATIC MAPPER), operando en siete bandas espectrales. Este sensor conceptualmente es semejante al MSS ya que es un sistema de barrido de líneas (line-scanner), pero presenta una serie de mejoras tanto en los componentes ópticos como en los componentes electrónicos.

□ Sistema de sensado RBV

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

□ Sistema de sensado MSS

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

A cada oscilación del espejo, el satélite se desloca a lo largo de la órbita, para proporcionar un sensado continuo del terreno. El movimiento de rotación de la Tierra ocasiona un pequeño desplazamiento del punto inicial del barrido para el oeste, a cada oscilación del espejo, o sea, a cada seis líneas detectadas. Si se considera el desplazamiento

de 185 Km. a lo largo de la órbita del satélite, hay un desplazamiento de 12,5 cm entre la primera y la última columna de pixels.

□ Sistema de sensado TM

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

La energía proveniente de la escena alcanza el espejo de barrido que oscila perpendicularmente a la dirección de desplazamiento del satélite en sentido este-oeste y oeste-este. La señal atraviesa un telescopio y un conjunto de espejos, cuya función principal es corregir la señal colectada por el espejo de barrido. De esta manera, la señal detectada en cada matriz de detectores de cada banda es transferida para un amplificador y convertida en una señal digital a través de un sistema A/D (analógico/digital). Los datos de salida son entonces transmitidos vía telemetría.

□ Sistema SPOT

El sistema SPOT es un programa espacial francés semejante al programa LANDSAT, que fue concebido por el Centre National d'Etudes Spatiales (CNES) y lleva a bordo dos **sensores de alta resolución** (HRV - Haute Resolution Visible). Estos sensores fueron concebidos para operar en dos modos diferentes. El modo multiespectral permite la

adquisición de datos en tres fajas del espectro electromagnético con una resolución espacial de 20 metros y el modo pancromático con una banda de resolución espacial de 10 metros.

Una de las características principales de los instrumentos a bordo del SPOT es la posibilidad de observación "off-nadir". El sensor podrá ser direccionado de modo de observar escenas laterales a la órbita en la que se encuentra el satélite en un momento determinado. Esta posibilidad de observación "off-nadir" aumenta los medios de obtener un aumento en el recubrimiento repetitivo de determinadas áreas. Otra ventaja de la vista "off-nadir" es la posibilidad de obtener pares estereoscópicos de determinadas áreas. La luz proveniente de la escena alcanza un espejo plano, que puede ser controlado a partir de las estaciones terrestres variando en ángulos de +/- 0,6 hasta 27° con relación al eje vertical.

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

▣ **Satélites ERS-1**

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

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

Una antena de 10 x 1 metros emite y recibe un haz de microondas en la región de 5,3 Ghz (banda C), con polarización VV y un ángulo de incidencia de 23 grados. La operación del SAR en modo Imagen produce una tasa de datos muy alta (105 Mbps), haciendo que las imágenes sólo puedan ser generadas en zonas equipadas con estaciones receptoras. La superficie terrestre podrá estar enteramente cubierta y sensada en ciclos de 35 días.

□ **Satélites METEOSAT**

Los Meteosat son satélites geoestacionarios Europeos cuyo operador es EUMETSAT. Ver la figura 2.2. La altitud de los satélites es cerca de 35800 kilómetros. El punto fijo a la vertical del satélite está en el ecuador. Meteosat ve siempre la misma porción del globo (42% de la superficie de la tierra). Meteosat está equipado con un radiómetro. El radiómetro explora la tierra línea por línea; cada línea consiste en una serie de elementos de imagen o de píxeles. Para cada pixel el radiómetro mide la energía radiada de las diversas gamas espectrales. Esta medida digital se cifra y se transmite a la estación de tierra para procesada antes de ser entregada a la comunidad para su utilización.

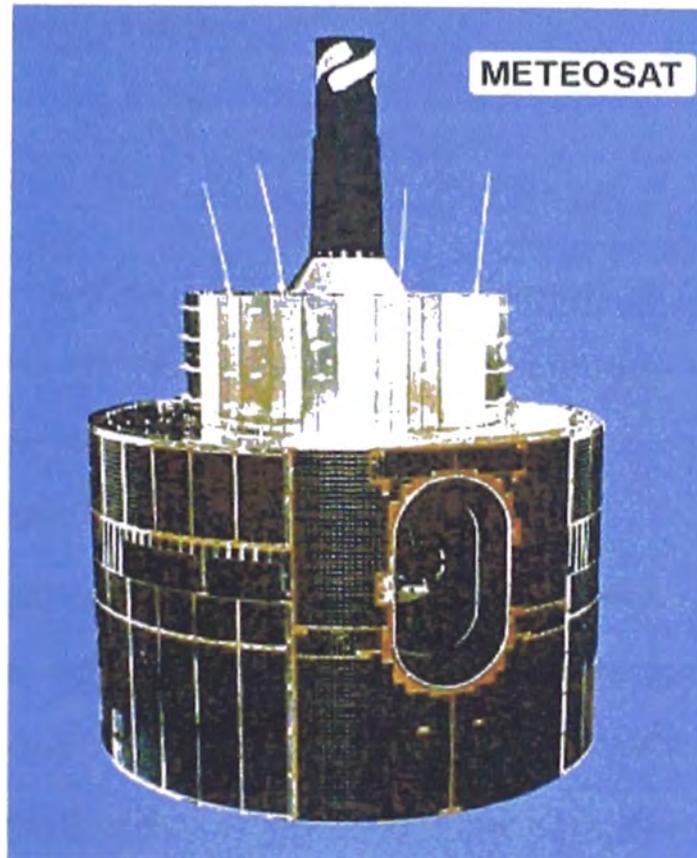


Figura 2.2: Satélite METEOSAT actualmente en servicio para Eumetsat

NOTA: Ver en el anexo 2 un listado de satélites meteorológicos en el mundo

2.2. Tipos de imágenes satelitales

□ Imágenes VIS

Son obtenidas en el canal VIS del satélite. Opera en las longitudes de onda del espectro visible (0,4 a 1,1 μm) siendo sensible a la radiación solar reflejada por las superficies (tierra, mar, nubes, nieve, etc.). El valor de brillo observado por el radiómetro del satélite dependerá de:

- De la fuerza reflectora del cuerpo iluminado (en la figura 2.5 se presenta una escala relativa de las superficies reflectoras y su relación en una escala de brillos del blanco al negro para el canal VIS). Se observa que las nubes de gran espesor tales como las Cumulonimbos (Cb) son mas reflectoras que las de menor espesor como son los Cirros (Ci). Las masas acuosas y bosques poseen una baja fuerza reflectora. Por el contrario la nieve fresca , el desierto y muchas zonas acuosas pueden reflejar mucha energía en la llamada reflexión especular (tipo espejo).
- De la intensidad de iluminación solar y de la posición geométrica relativa entre el Sol, la superficie reflectora y el satélite. En el canal VIS es posible observar sombras de unas nubes sobre otras y sobre la propia tierra.
- Del espesor y de la composición de las nubes. En igualdad de condiciones anteriores, las nubes de más desarrollo vertical y que se compongan de gotitas de agua reflejarán mas que de otras de menos espesor y formadas por cristales.
- De la superficie reflectora subyacente. Por ejemplo los Cirros poco espesos son difíciles de observar si sobrevuelan superficies que reflejen mucho, como son las nubes mas bajas, nieve desierto, etc.

Al analizar una imagen VIS se observa la gran riqueza de textura, es decir, la gran variabilidad en brillo, debida a los diferentes factores que pueden condicionar su valor. Lamentablemente el brillo no es de por sí un parámetro meteorológico como pueda ser la temperatura o la humedad. De todas maneras es parte de una valiosa información de canal VIS porque indirectamente disponemos de información sobre el espesor de las nubes, detalles de la superficie terrestre y de los procesos de la capa límite planetaria.

La figura 2.3. muestra una imagen VIS obtenida desde el satélite GOES-8. Las imágenes visibles ofrecen, en general, la mayor resolución espacial. Los continentes, las nubes y el océano son claramente visibles. Durante la noche no se puede obtener imágenes VIS a partir de satélites meteorológicos estándar. El mar, los grandes ríos y los lagos aparecen oscuros en una imagen VIS. En líneas generales, el suelo aparece más brillante que el mar, pero más oscuro que las nubes. En una presentación normal las nubes aparecen blancas o gris claro.



□ **Figura 2.3: Imagen VIS del GOES-8**

□ **Imágenes IR**

Son obtenidas en el canal infrarrojo (IR) del radiómetro del satélite. Este es un canal "ventana" que mide la temperatura de brillo (T_b) de la superficie radiante (la tierra y las nubes se pueden considerar, en una primera aproximación, como cuerpos negros). Para las longitudes de ondas de los $11 \mu\text{m}$ la radiación no sufre grandes procesos de absorción. Las nubes con topes muy fríos (o topes muy altos) se representan en blanco como son los Ci espesos y Cb. Las nubes bajas y la superficie de la tierra poseen T_b más cálidas y se presentan en tonos grises y oscuros. Nubes a diferentes niveles se observan en función de sus topes fríos, o lo que es lo mismo, en función de su altura relativa en una escala de blanco al negro. De nuevo la radiación que llegue al satélite desde una superficie radiante de poco espesor va a depender de la que exista por debajo de ella. El canal IR nos ofrece, por tanto, un mapa térmico de las superficies radiantes.

La banda IR más común para los satélites meteorológicos esta ubicada en la ventana de los $10\text{-}12.5 \mu\text{m}$. En esta ventana la atmósfera terrestre es relativamente transparente a la radiación emitida por la superficie del planeta. Las imágenes IR indican la temperatura de las superficies radiantes. Las nubes aparecen en general, mas blancas que la superficie del planeta debido a su menor temperatura. La figura 2.4. muestra la imagen IR que corresponde a la figura 2.3.

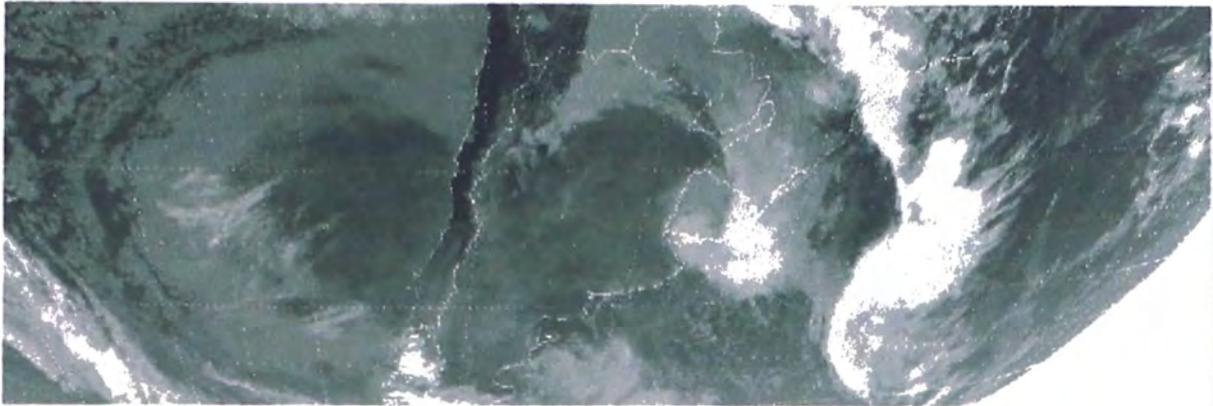


Figura 2.4: Imagen IR del GOES-8

□ **Imágenes de vapor de agua**

Las imágenes de vapor de agua (Water vapor, WV) son obtenidas por el canal WV a partir de la radiación emitida a una longitud de onda alrededor de los $6,7\mu\text{m}$. A esta longitud de onda, mayor parte de la radiación proviene de la capa atmosférica ubicada entre los 600 y los 300 hPa.

Este canal posee ciertas propiedades semejantes al IR pero también diferencias importantes. Mientras que los canales visible e infrarrojo se encuentran en bandas del espectro electromagnético donde la absorción por los gases atmosféricos es pequeña, el canal de WV se encuentra en una banda (entre 5.7 y $7.1 \mu\text{m}$) en la que la radiación terrestre resulta parcialmente absorbida por el vapor de agua atmosférico. En los canales de absorción resulta muy simple y efectivo analizar cual es la "contribución" o peso de las capas atmosféricas a la señal que le llega al satélite para un perfil vertical de temperatura y humedad dado.

El ejemplo que presentamos aquí, la figura 2.5 es la función de contribución para el WV y una atmósfera estándar. Según esta curva, la mayor cantidad de radiación que llega al satélite en el espectro del WV proviene de las capas centradas en torno a los 300 mb. Por el contrario no existe contribución alguna de niveles inferiores de la atmósfera, incluso si la superficie radiante posee una temperatura elevada. En este sentido la radiación emitida por niveles bajos sufre, muy significativamente, los procesos de absorción de las capas que posean vapor de agua y que se encuentran sobre ella. El resultado final es que ninguna señal de capas bajas llega al satélite. En niveles muy altos la temperatura es tan baja y el contenido de vapor de agua es tan pequeño que a partir de los 100 mb las contribuciones de los estratos superiores son despreciables.

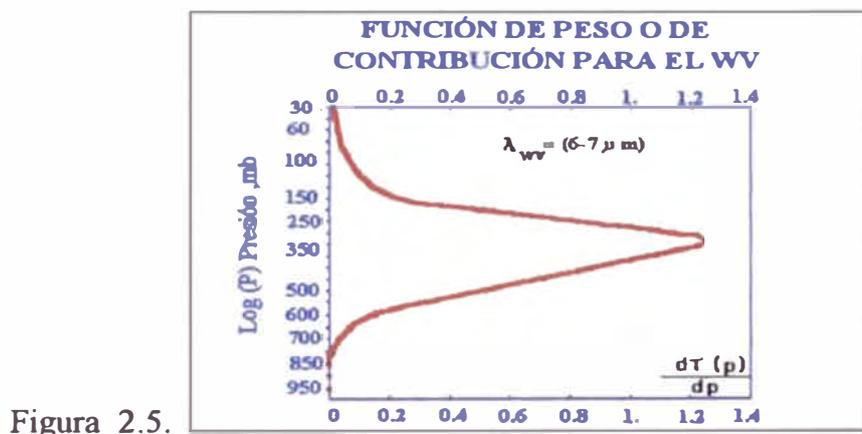


Figura 2.5.

Obsérvese que en este caso la contribución a la señal que llega al satélite proviene de una capa más o menos profunda en vez de un nivel determinado de presión. Si la atmósfera fuera más húmeda el máximo de contribución ascendería levemente; en el caso contrario, de atmósfera más seca ésta descendería.

En las imágenes WV los tonos gris oscuro a negro se corresponden con las zonas donde llega gran cantidad de radiación al satélite y, por lo tanto, poseen temperaturas de

brillo más altas. Estas regiones están ligadas a zonas donde existe poco contenido de vapor de agua en niveles medios y altos. Los tonos grises medios se corresponden con temperaturas intermedias (humedad media en la troposfera media y alta). Los tonos blanco a blanco brillante lo hacen con temperaturas más bajas como consecuencia del alto contenido de humedad en niveles troposféricos superiores. Este es el caso de las nubes altas muy espesas y los Cb con grandes desarrollos verticales. Obsérvese que no es necesario la presencia de nubes para que podamos tener una señal en este canal. Dicho de otro modo, en muchas situaciones donde no existen nubes en niveles medias-altos, el canal de WV nos puede suministrar información muy útil sin más que exista humedad en dichos niveles.

Las imágenes WV son, generalmente, representativas del contenido humedad de la media y alta troposfera y son como verdaderas radiografías atmosféricas. A grandes rasgos se puede afirmar que el intervalo de contribución máxima se encuentra, comúnmente, entre 500 y 300 mb, variando la altura del nivel de contribución media desde 8 Km. en los trópicos hasta alrededor de los 4 Km. en las latitudes polares. Debido a todos estos factores, debe tenerse en cuenta que lo que se ve en las imágenes WV son las zonas con mayor o menor contenido de vapor de agua, sin referencia a un nivel en particular, aunque para nuestras latitudes los 300 ,ó 250, mb puede ser una buena referencia. La utilidad de este canal se basa en la información sobre las estructuras y circulaciones de la media y alta troposfera, incluso de la baja estratosfera.

En la figura 2.6 se representa un gráfico ilustrativo sobre ciertas propiedades comparativas de los tres canales en una escala del blanco al negro. Nubes muy espesas (Cb, Nimbostratos-Nb, Ci muy espesos, etc.) aparecerán muy blancas en los tres canales (en el VIS por ser nubes reflectoras, en IR por poseer toques altos y fríos, y en WV por sus altos

contenidos de humedad). En el otro extremo tenemos el mar, ciertas zonas terrestres y nubes bajas de poco espesor. Para estos elementos los canales VIS e IR son fundamentales, siendo nula la información que podemos obtener en el WV. Detalles de los fenómenos ligados a la capa límite planetaria y terrestres sólo son observables en los canales VIS e IR.

IDEAS BÁSICAS DE INTERPRETACIÓN DE IMÁGENES					
	Blanco	Gris brillante	Gris	Gris oscuro	Negro
VIS					
Brillo:					
Albedo, intensidad	Cb Ns	Cu Ci St	Tierra		
rayo solar, ángulo solar	Nieve "nueva"	Nieve "vieja"	Bosques		
espesor, comp. nube	Cu Ac Cs St	Desierto	Océanos lagos		
IR					
Temperatura de la superficie radiante	Topes nubes altas	Topes nub. medias	Tierra		
	Cb Nb Ci Cs	Cb Cu	Noche-Día		
	As Ac	Topes más fríos, nubes más altas			
WV					
Contenido de HÚMEDAD de los niveles med-altos trop.	Nubes altas-medias espesas, alto contenido de humedad	Medio-bajo contenido de humedad en niveles medios-altos	Sequedad niveles altos y medios		

Figura 2.6: Escala de grises y su relación con la presentación convencional de nubes y sistemas de humedad en los canales VIS, IR y WV.

La figura 2.7 muestra una imagen de WV obtenida al mismo tiempo que las de las figuras 2.1 y 2.2. Las imágenes WV se muestran regularmente con la radiación emitida convertida a temperatura. Las regiones con baja humedad parecen cálidas (oscura). Esto significa que, cuando la troposfera superior está seca, la radiación que llega al satelital, originada más abajo en la atmósfera, donde es más cálido y aparece oscuro en la imagen. Las nubes más altas pueden verse, pero las características de la superficie no pueden ser detectadas por no ser este un canal con una ventana atmosférica. Es importante destacar

que en tanto que una imagen WV indique una troposfera alta muy seca, puede haber aire húmedo cerca de la superficie

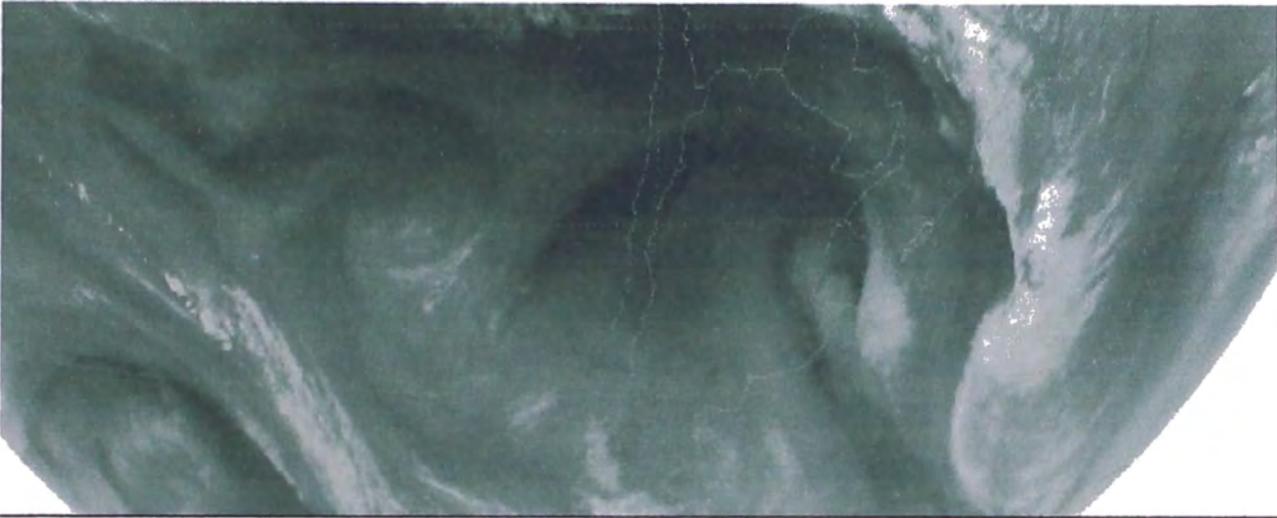


Figura 2.7: Imagen WV del GOES-8

□ **Imágenes en la ventana de $3,7\mu\text{m}$**

La ventana de los $3,7\mu\text{m}$ se encuentra ubicada en una región pequeña donde se superponen la radiación solar reflejada y la emitida por la Tierra y las nubes, como vemos en la figura 2.8, la cual corresponde a la misma hora que las figuras 2.3, 2.4 y 2.5. Durante las horas nocturnas la radiación que detecta esta imagen se origina en fuentes terrestres solamente. Durante el día, es detectada una mezcla de radiación de dos orígenes distintos: Solar y terrestre, donde predomina la radiación solar.

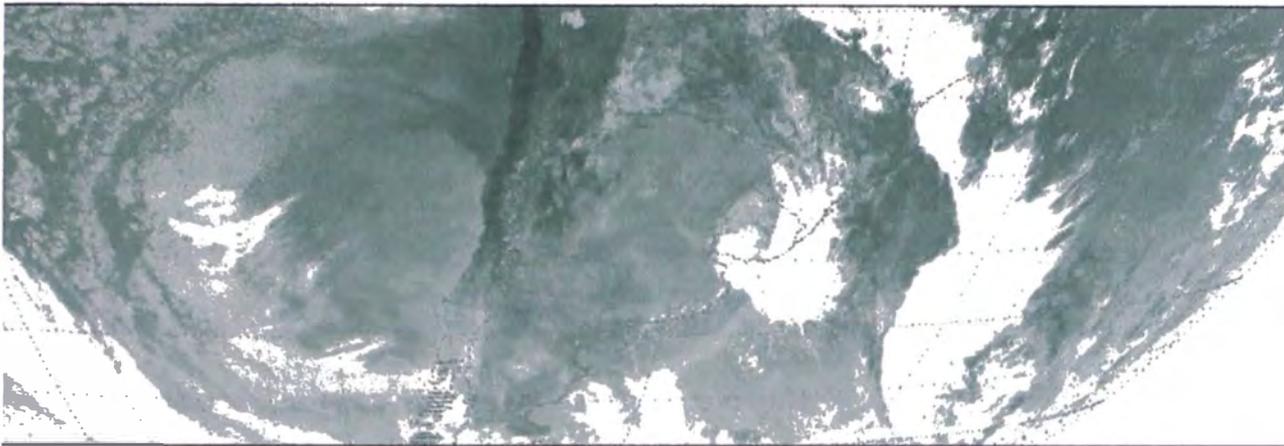


Figura 2.8. Imagen 3.7 μm del GOES-8

2.3. Almacenamiento de las imágenes satelitales

Cuando se trabaja con un sistema de análisis de imagen basado en computadora, las imágenes pueden ser guardadas como archivos de disco. No parece haber razón para considerar estos archivos como si fueran diferentes de otros archivos de disco, los cuales pueden contener textos, gráficos, o aun programas. Hasta cierto punto esto es verdad: Los archivos contienen una colección de bytes que pueden representar cualquiera de estas cosas, así como también imágenes. Pero desde un punto de vista práctico, hay varias razones para tratar los archivos de imágenes como distintos, porque ellos pueden requerir consideraciones de almacenamiento un tanto diferentes :

- Los archivos de imágenes son generalmente grandes. En términos de almacenamiento de computadoras, el antiguo adagio de que una imagen vale más que mil palabras queda corto por comparación. Un simple marco de video (640x480 pixels) en modo monocromático ocupa aproximadamente 300 Kb (Kilobyte), mientras que una imagen a todo color requiere aproximadamente de un 1 Mb (Megabyte). Una serie de imágenes que forman una secuencia de tiempo, o un

arreglo tridimensional de datos voxel (los cuales pueden ser considerados como una serie de planos) pueden ser mucho más grandes. Una reconstrucción tomográfica de 500x500x500 voxels requiere de 125 Mb, o el doble si los valores de densidad para los voxels tienen un rango dinámico que excede 256 niveles. Esto significa que la capacidad de almacenamiento usado debe ser grande, de preferencia expandible permitiendo alguna clase de media removible y razonablemente rápida. Esto también incrementa el interés en métodos de almacenamiento que utilizan compresión para reducir el tamaño del archivo.

- El registro de imágenes generalmente requiere de guardar un gran número de archivos. Esto refuerza el requerimiento para grandes cantidades de almacenamiento veloz, pero también significa que acceso a las imágenes almacenadas será necesario. La construcción de una base de datos que pueda acceder imágenes en una variedad de formas, incluyendo la posibilidad de mostrar al usuario pequeñas representaciones en miniatura usando palabras clave y otras herramientas de indexación, es una necesidad importante que ha sido reconocida por muchos productores de software. La extracción automática de datos de clasificación de la imagen para ayudar en la búsqueda es un problema más difícil.
- El manejo de datos en la era de las computadoras aún no ha explotado totalmente las posibilidades del trato con registros relativamente sencillos que contengan texto y números. La metáfora del “fichero” es pobre y limitada. El verdadero asunto en relación con el almacenamiento de archivos en computadora es ingresar a archivos y encontrar documentos. Agregar un campo a una base de datos construida principalmente para contener entradas de tipo texto no funciona para una base de datos de registro de imágenes.

Por ejemplo, guardar una foto de cada empleado en un archivo de personal puede ser valioso, pero difícilmente permitiría al usuario localizar empleados conociendo únicamente su apariencia física. Esto requeriría ver cada imagen.

El almacenamiento digital para aplicaciones de procesamiento de imágenes tiene tres categorías básicas:

- Almacenamiento a corto plazo, para ser empleado durante el procesamiento
- Almacenamiento en línea, para una reutilización relativamente rápida
- Almacenamiento en archivo, caracterizado por un acceso poco frecuente.

El tamaño de la información almacenada se mide en bytes u octetos (ocho bits) y en sus múltiplos respectivos (Kilo bites, Mega bites, Giga bites y Tera bites).

El **almacenamiento a corto plazo** emplea la memoria de la computadora, otro método es el uso de tarjetas especializadas, denominadas memorias temporales, que almacenan una o más imágenes a las que puede accederse con rapidez, habitualmente a las velocidades de video (treinta imágenes completas por segundo). Con este último método se puede realizar aproximaciones a la imagen (zoom) de manera instantánea, así como desplazamientos verticales (scroll) y horizontales (pan). La capacidad de almacenamiento en una tarjeta de memoria temporal está limitada por el tamaño físico de la tarjeta y por la densidad de almacenamiento de los elementos de memoria utilizados. Actualmente se puede disponer de más de 32 Mbytes de almacenamiento en una sola tarjeta de memoria temporal

En la categoría del **almacenamiento en línea** se emplea discos magnéticos y los de tecnología magneto-óptica. El factor clave característico del almacenamiento en línea es el acceso frecuente a los datos. Los armarios de discos ópticos (“jukebox”) son empleados

eficientemente para el almacenamiento en línea a gran escala que operan interactivamente en lectura y escritura.

La tercera categoría, el almacenamiento en archivo, se caracteriza por necesitar un almacenamiento masivo, pero de acceso poco frecuente. Las cintas magnéticas y los discos ópticos son los medios habituales en las aplicaciones de registro y archivado. Las cintas tienen un tiempo de vida relativamente corto y sus condiciones de almacenamiento deben ser controladas. En el caso de los discos ópticos se puede grabar mayor cantidad de imágenes y su periodo de vida excede los treinta años sin requerir un ambiente controlado. En la actualidad es posible una capacidad de almacenamiento en línea superior a un Terabyte de discos en la tecnología WORM, guardados en una jukebox cuyo volumen es menor a seis metros cúbicos, esto significa almacenar un millón de imágenes de tamaño 1.024*1.024. En muchos casos que no se requiere una recuperación digital de la imagen, ésta se puede almacenar en forma analógica empleando película y/o cinta de video.

2.3.1. Las tecnologías de almacenamiento actuales

Un tipo de base de datos que involucra imágenes funciona esencialmente en la dirección opuesta. Un **sistema de información geográfica (GIS)** almacena múltiples imágenes y mapas. Estos registran diferentes tipos de información la cual esta relacionada a lugares. También pueden haber registros de texto relacionados a esos lugares. Superponiendo y correlacionando las múltiples representaciones de mapas, es posible comparar las localizaciones de características en un mapa (caminos, construcciones) con las de otros mapas (tipos de suelo o vegetación, capas acuíferas subterráneas, etc). Hay importantes asuntos por resolver en la construcción de un GIS, ya que los diversos mapas e imágenes (incluyendo fotos aéreas y de satélite) deben ser alineadas y registradas tomando

en cuenta sus diferentes resoluciones. Además, la presentación de datos multidimensionales de tal riqueza presenta retos más allá de aquellos encarados en la mayoría de bases de datos de imágenes.

Pueden haber algunos otros factores que considerar en el diseño de un sistema óptimo para almacenamiento de imágenes. Por ejemplo, en aplicaciones médicas o de otros campos, puede ser importante mantener un registro de todos los accesos a una imagen y de cualquier paso de procesamiento o edición que pueda ser aplicado. También, es importante alguna estandarización de formatos de almacenamiento si las imágenes van a ser compartidas entre los usuarios o entre diferentes sistemas. Algunos usuarios pueden querer archivar imágenes para siempre, pero raramente tener acceso a cualquier imagen particular, mientras que otros pueden realizar accesos continuos y repetidos pero querrán descartar imágenes tras cierto tiempo (o cuando se complete un proyecto). Los datos pueden estar orientados a ser recuperados por muchos usuarios, sobre una red, o estar restringidos a un único usuario. Si un conjunto de imágenes ha de ser distribuido ampliamente como un recurso permanente o inalterable, los requerimientos cambian otra vez.

Hay algunos inicios de solución a la mayoría de estos problemas, y también hay indicios de muchos más problemas por venir. La introducción del formato Photo-CD por Kodak indica su expectativa de un considerable uso por parte de los consumidores de este tipo de almacenamiento. Pero en la era de las computadoras, parece natural que de algún modo la computadora pueda encontrar una foto con la sola solicitud del usuario. Obviamente esta no es una tarea trivial. Pero muchas compañías están tratando de responder al reto.

2.3.2. Medios de Almacenamiento Ópticos

El Photo-CD de Kodak es un ejemplo de un tipo de medio que puede ser utilizado para almacenamiento de imágenes. En realidad, veremos abajo que Photo-CD también define un formato de almacenamiento y no sólo el uso de los discos de CD-ROM. Y es posible almacenar imágenes en CDs también en otros formatos. Proyectos tan diversos como excavaciones arqueológicas y detección remota (imágenes satelitales) han encontrado que este medio de almacenamiento es conveniente y barato para distribuir colecciones de imágenes en CDs como un recurso de referencia. El CD-ROM (Disco Compacto sólo para lectura) es simplemente un plato de plástico con puntos reflexivos impresos en él, físicamente idénticos a los CDs de audio. El formato de los puntos, que marcan cambios de 1s (unos) a 0s (ceros) en vez de valores de bits, es interesante ver la figura 2.9, como es la tecnología utilizada para leer los discos.

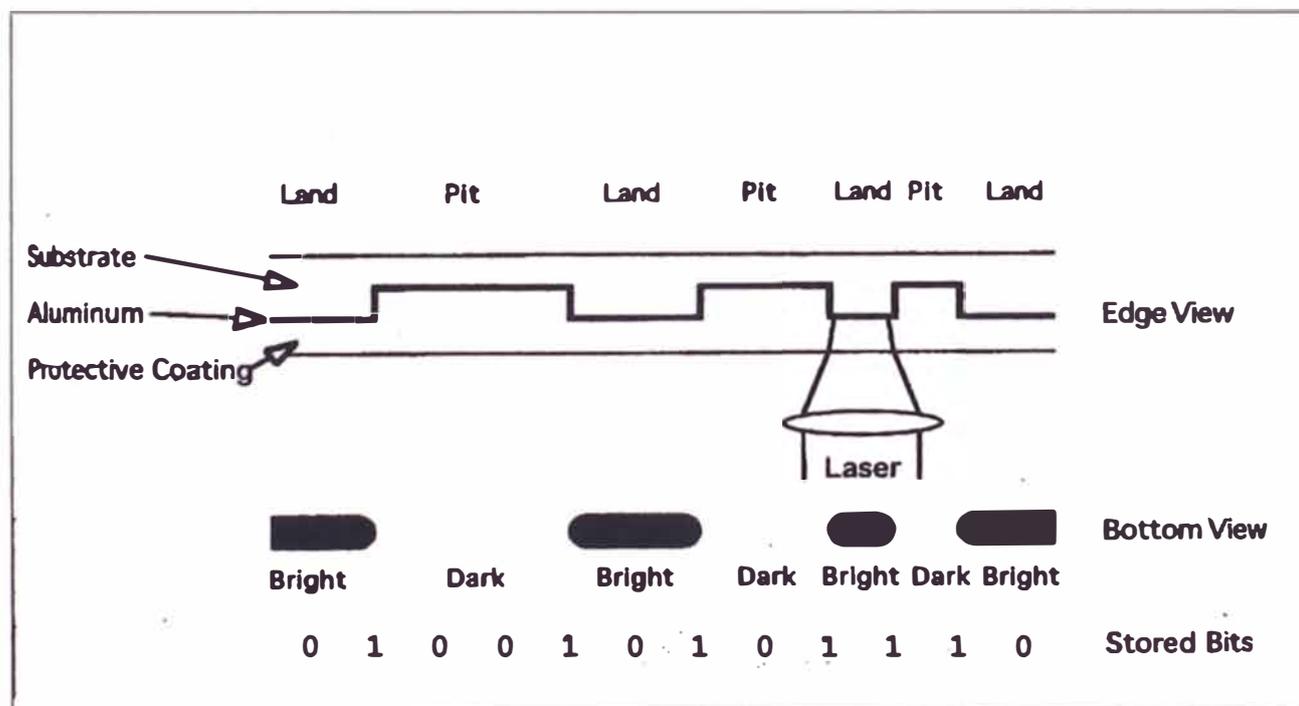


Figura 2.9: Formato de almacenamiento para datos en CD. Las hendiduras y las protuberancias (pits and lands) en la capa de aluminio reflejan la luz láser, con las hendiduras dispersando la luz y produciendo una reflexión mas oscura. Las transiciones de claro a oscuro indican "unos" (1) y los lugares donde no ocurre ninguna transición indican "ceros" (0).

Los puntos reflexivos en un CD estándar son físicamente grabados en una operación de prensado y cubiertos por un plástico duro que es resistente a daños. Esta tecnología se presta a la creación de muchas copias de un disco económicamente. Los precios actuales para hacer duplicados a partir de un master (original) son sólo unos pocos dólares por copia inclusive a las pequeñas cantidades de unos cuantos cientos de copias, y caen por debajo del dólar cuando se trata de volúmenes mayores. La distribución de una biblioteca de imágenes de esta manera tiene sentido.

Los datos en los CDs son escritos en una única pista espiral continua, en bloques de 2048 bytes (más la dirección del bloque y algunas sumas de detección de errores). La mayoría de las unidades que escriben CDs (tanto masters de vidrio estándares como discos grabables CD-R) escriben la pista entera de una sola pasada, lo que requiere que los datos sean continuamente suministrados al cabezal de escritura a medida que el disco gira. El formato de CD es mucho más difícil de utilizar como un dispositivo de acceso aleatorio (tanto en escritura como en lectura) que un disco convencional con sus múltiples pistas circulares y sectores fijos, lo que hace localizar bloques particulares de datos mucho más fácil.

El prensado de CDs a partir de un master crea hendiduras en el substrato plástico que son cubiertas con aluminio y luego selladas con una capa de plástico protectora. La capa de plástico no sólo previene el daño físico, también previene la oxidación del aluminio, que reduciría su reflectividad. En un disco CD-R (grabable), la escritura es efectuada por un láser cuya luz es absorbida en una capa coloreada.

2.3.4. Formatos de almacenamiento de imágenes

El proceso de almacenamiento prevé la lectura en diferentes dispositivos como los mencionados anteriormente, hemos tomado como referencia en cuanto a formatos de almacenamiento los que maneja el SPRING, por ser éste un sistema integral que entre otras funciones se comporta como un SIG (GIS) que maneja un Banco de Datos donde las imágenes son almacenadas. Existen distintas técnicas de las cuales pasamos a describir las más importantes. En el Capítulo V se implementa algunas aplicaciones de este software.

El SPRING prevé la lectura en los formatos *superestructura* y "*fast format*" para los sistemas sensores descritos anteriormente.

□ Formato superestructura

El formato superestructura (formato estándar de cintas y CD-ROM) presenta una organización de datos en cuatro niveles jerárquicos diferentes: volumen, el archivo, el registro y el campo de datos. Un grupo de archivos compone un volumen lógico, el cual puede ser almacenado en varios volúmenes físicos (cintas) y un volumen físico puede almacenar varios volúmenes lógicos, es decir, se puede tener una cinta con varios archivos (bandas), o una banda en más de un volumen físico. Los componentes básicos de una superestructura son: el archivo directorio del volumen y el archivo descriptor.

El archivo directorio de volumen define e identifica un volumen lógico (por ejemplo un conjunto de bandas). El archivo descriptor es el primer registro dentro de cada archivo de datos (cada banda) y define la estructura interna del archivo dando parámetros para interceptar su contenido.

□ Formato "fast format"

El formato "fast format" contiene una cantidad mínima de datos generales, compactando al máximo posible los datos en una cinta, facilitando así la lectura y la escritura. Este formato está disponible solamente para la estructura de imagen en banda secuencial (BSQ), usado en imágenes TM/Landsat.

Los archivos de la imagen están en una única cinta y puede haber más de un archivo imagen por cinta. Existen dos tipos de archivos en una cinta "fast format": el archivo de "header" y los archivos de imágenes. El archivo de "header" es el primero de cada cinta y contiene datos de descriptivos como fecha, opciones de procesamiento e información de proyección del producto.

Los archivos de imagen contienen solamente "pixels" de imagen. Estos datos pueden ser almacenados en bloques o no. El almacenamiento en bloques es utilizado para condensar una imagen, lo máximo posible. En la mayor parte de las veces, las imágenes geocodificadas son almacenadas de esta forma.

Patrones de grabación según los sensores satelitales

A continuación presentamos los patrones de grabación utilizados para los sensores TM-LANDSAT, HRV-SPOT y AVHRR-NOAA.

□ Imagen TM/Landsat

La imagen TM/Landsat que el SPRING realiza la lectura debe estar en el patrón BSQ de **bandas secuenciales**. Este patrón es el frecuentemente generado por el INPE y disponible para el usuario en los formatos superestructura o "fast format". En el patrón BSQ, la imagen es registrada en la cinta, banda a banda, conforme ilustra la figura 2.10.

Registro	líneas	columnas					
		1	2	3	4	5	6
1	1	B1	B1	B1	B1	B1	.
2	2	B1	B1	B1	B1	B1	.
3	3	B1	B1	B1	B1	B1	.
.
.	1	B2	B2	B2	B2	B2	.
.	2	B2	B2	B2	B2	B2	.
.	3	B2	B2	B2	B2	B2	.

Figura 2.10: Patrón BSQ

El usuario puede escoger los productos digitales de las cintas TM-Landsat con niveles de corrección geométrica. Los niveles posibles son 4, 5 y 6, los cuales se describen a continuación:

Nivel 4 - este es el nivel de corrección en que son generados los productos patrón del INPE. Se aplican los cálculos de corrección geométrica, utilizándose los datos de efemérides y actitud obtenidos del satélite.

Nivel 5 - los procedimientos son idénticos a los aplicados en el nivel 4, con corrección geométrica básica con remuestreo por el método del "vecino más próximo" y puntos de control adquiridos a partir de una base cartográfica oficial.

Nivel 6 - los procedimientos son semejantes a los del nivel 5, con remuestreo por convolución cúbica.

El tamaño de una escena correspondiente a una imagen TM/Landsat es de 6177 líneas por 6489 columnas, esta escena puede ser dividida en cuadrantes de 3087 líneas y 3243 columnas. Los cuadrantes se encuentran localizados en la escena conforme la figura 2.11 a continuación.

Cuadrantes			
A =	1, 2, 5, 6	N =	2, 3, 6, 7
B =	3, 4, 7, 8	S =	10, 11, 14, 15
C =	9, 10, 13, 14	W =	5,6,9,10
D =	11, 12, 15, 16	E =	7,8,11,12
X =	6, 7, 10, 11		

1	2	3	4
5	6	7	8
9	10	11	12
13	14	15	16

Figura 2.11: Localización de los cuadrantes

□ Imágenes Landsat en CD-ROM

Los datos Landsat TM en CD-ROM son distribuidos en forma de escenas enteras (full frame - aproximadamente 185 x 185 Km.) o cuadrantes (aproximadamente 96 x 96 Km.), desde una única banda hasta las 7 bandas espectrales. Todas las escenas son distribuidas con el mismo nivel de corrección radiométrica básica, que consiste en la ecualización de la respuesta de los sensores, de forma de eliminar el efecto de "stripping" de los datos Landsat-TM. No es aplicada ninguna ecualización de histograma o corrección para el ángulo de elevación solar.

El CD-ROM tiene formato patrón IBM-DOS, el cual puede ser leído en cualquier unidad de lectura que acepte discos ópticos en conformidad con el patrón ISO-9660. El disco está estructurado en subdirectorios:

- En el **directorio raíz**, están localizados algunos archivos generales, tales como esta documentación de formato y un programa de conversión de formato de CD-ROM para un archivo en formato TIFF.
- **Uno o más directorios** con la identificación WRS de la escena. Por ejemplo, una imagen full frame de Río de Janeiro (base 217 punto 76) estará localizada en el directorio \217_076. Si la imagen corresponde a un cuadrante, la sigla del cuadrante también formará parte del nombre del directorio. Por ejemplo, el cuadrante A de la misma escena del ejemplo anterior estará localizado en el directorio \216_076A.
- En **cada directorio**, habrá uno o más subdirectorios con la fecha de adquisición de la escena. El formato general del subdirectorio es \aammdd, donde "aa" son los 2 últimos dígitos del año, "mm" los dígitos del mes y "dd" los dígitos del día de la adquisición. Por ejemplo, la misma escena del ejemplo anterior que haya sido adquirida el 31 de enero de 1994 estará localizada en el subdirectorio \940131.
- En los **subdirectorios** respectivos se encuentran los archivos de imagen, uno para cada banda solicitada y algunos archivos con la descripción de los productos (similares a los archivos de la CCT Súper Estructura), cuyas descripciones detalladas son dadas más adelante. Cada archivo de imagen es denominado simplemente BANDAn.DAT, donde "n" es el **número de la banda**.

Por ejemplo, la banda 7 de la misma escena de Río de Janeiro, cuadrante A, adquirida por el satélite el 31 de enero de 1994, deberá ser recuperada con el nombre:
\217_076a\940131\banda7.dat

Las imágenes en CD-ROM son grabadas en formato superestructura. En el CD-ROM eventualmente, podrá existir un subdirectorio adicional, \DEMO, con algunas imágenes de demostración, en formato TIFF o JPEG.

□ Imagen HRV/SPOT

El programa Impima, de lectura de imágenes del SPRING, permite la lectura de imágenes HRV/SPOT, las cuales deben estar en formato **banda intercalada por línea** (BIL), usualmente generado por el INPE, disponible para el usuario.

En el formato BIL, cada línea es grabada secuencialmente para todas las bandas, conforme lo ilustra la figura 2.12.

Registro líneas		columnas					
		1	2	3	4	5	6
1	1	B1	B1	B1	B1	B1	•
2	1	B2	B2	B2	B2	B2	•
3	1	B3	B3	B3	B3	B3	•
4	2	B1	B1	B1	B1	B1	•
5	2	B2	B2	B2	B2	B2	•
6	2	B3	B3	•	•	•	

Figura 2.12: El usuario puede escoger los productos digitales de las cintas HRV-SPOT con niveles de corrección geométrica. Los niveles disponibles son: 1A, 1B, 2A y 2B, los cuales se describen a continuación.

Nivel 1A: la imagen contiene datos originales con calibración radiométrica relativa y absoluta, a través de la normalización de los detectores, sin corrección geométrica y calibración entre bandas.

Nivel 1B: la corrección radiométrica es la misma que en el nivel 1A, más el remuestreo para compensar los efectos internos y externos del sistema y la

corrección geométrica, para los efectos de perspectiva, rotación de la Tierra y variación de la velocidad del satélite.

Nivel 2A: la corrección radiométrica es la misma del nivel 1B y además presenta un preprocesamiento geométrico sobre un mapa con el uso de datos de actitud del satélite.

Nivel 2B: la imagen posee corrección geométrica sobre un mapa, con el uso de datos de actitud del satélite y puntos de control del terreno.

La definición del formato de una escena en una imagen SPOT, depende si la imagen posee información multiespectral (bandas 1, 2 y 3) o pancromática (pan), e inclusive depende del nivel de corrección de la imagen. El usuario tiene acceso a estas informaciones en una lista que viene junto con la cinta.

El tamaño de las imágenes SPOT es definido de acuerdo con el nivel de corrección, conforme muestra la tabla 2.1.

Nivel	Modo	Nº líneas	Nº columnas
1ª	P	6.000	6.000
	XS	6.000	3.000
1B	P	6.000	6.400 a 8.500
	XS	3.000	3.200 a 4.250
2ª/2B	P	7.200 a 10.200	7.500 a 10.200
	XS	3.600 a 5.100	3.750 a 5.100

Una escena SPOT también puede ser dividida en cuadrantes, como se ilustra la figura 2.13 a continuación. Cada cuadrante representa un área de aproximadamente 40 x 40 Km.

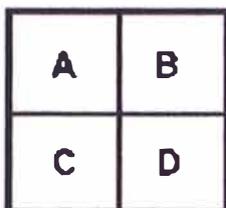


Figura 2.13: División en cuadrantes

El usuario puede realizar un pedido de una escena que esté localizada entre cuadrantes. Para lo cual debe identificar el área deseada en la imagen y definirla dentro de un cuadrado de 40 x 40 Km.

□ Imagen AVHRR/NOAA

La imagen AVHRR/NOAA que el INPE genera, se encuentra en patrón banda intercalada por "pixel" (BIP). En el formato BIP, cada "pixel" es grabado secuencialmente para todas las bandas, conforme ilustra la figura 2.14.

Registro	Líneas	Columnas
1	1	B1.1 B2.1 B3.1 B4.1 B5.1 B1.2 B2.2
2	2	B1.n B2.n B3.n B4.n B5.n B1.n+1...

Figura 2.14: Donde: **n** es el número del "pixel" que va a ser grabado en la línea siguiente.

Las cintas pueden ser grabadas en 10 bits (full) u 8 bits (compress). Una cinta grabada en 10 bits puede contener hasta las cinco bandas registradas y posee la configuración que ilustra la figura 2.15 a continuación:

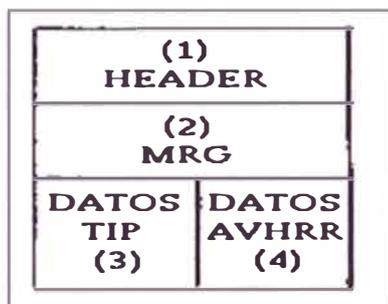


Figura 2.15: Configuración de una cinta grabada en 10 bits

Donde:

(1) "Header": presenta las características del satélite, fecha de grabación, formato, etc.

(2) Matriz de Referencia Geodésica (MRG): presenta los datos de navegación de la imagen.

(3) Datos TIP: datos de documentación de la imagen, como línea, columna, resolución, etc.

(4) Datos AVHRR: corresponde a la imagen propiamente dicha.

Una cinta grabada en ocho bits puede contener hasta tres bandas registradas y posee la configuración mostrada en la figura 2.16.

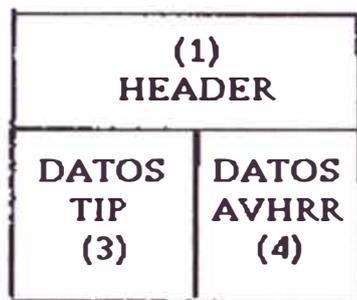


Figura 2.16: Configuración de la cinta grabada en 8 bits

Las imágenes AVHRR grabadas en estas configuraciones por el INPE no presentan ninguna corrección de geometría o radiometría. El tamaño de las imágenes AVHRR es definido por el ángulo de barrido del sensor, es decir, 2048 muestras ("pixels") por canal, para cada barrido de la Tierra. Para las cintas grabadas en Cachoeira Paulista, el número de

columnas es dado por el alcance de la antena receptora, por ejemplo: El inicio de grabación corresponde aproximadamente a la región de Río Grande do Sul y su término, en la región de la Amazonia Central.

□ Archivos GRIB

GRIB (**Gridded binary**) es un formato de valores de punto de retícula expresado en modo binario. Se destina a aumentar el desempeño de la transmisión y a economizar memoria en el almacenamiento, ya que es una forma compactada de datos.

El formato GRIB se presenta agrupado en bloques:

- Bloque 0: presenta el tamaño total del archivo;
- Bloque 1: presenta la identificación del producto (quien lo generó, fecha, etc.);
- Bloque 2: presenta la descripción de la retícula (número de líneas, número de columnas, resolución, proyección en que fue generado el dato);
- Bloque 3: indica la omisión o inclusión de datos en determinados puntos. Actualmente este bloque no está siendo utilizado para la generación del archivo GRIB del SPRING;
- Bloque 4: presenta los datos propiamente dichos en forma de matriz. En esta matriz, la información se presenta en cualquier tamaño de bits;
- Bloque 5: presenta las informaciones de finalización del archivo.

NOTA: Las imágenes resultantes del módulo de lectura de imágenes IMPIMA e internamente en el módulo SPRING, son almacenadas en formato GRIB. Este procedimiento lo ampliaremos en el Capítulo V junto con las aplicaciones.

CAPÍTULO III

PROCESAMIENTO DE IMÁGENES: TÉCNICAS DE INTERPRETACIÓN DE GRÁFICOS Y ALGORITMOS PARA EL TRATAMIENTO DE IMÁGENES.

3.1. Técnicas de interpretación de gráficos y codificación de colores

El desarrollo de programas para procesar imágenes, requiere conocer cómo se representan las imágenes dentro de nuestro computador. Para un computador una imagen es un conjunto de números, ordenados en forma de matriz bidimensional (Coordenadas x,y).

Esta matriz almacena en cada una de sus posiciones un valor que representa el color del punto al que referencia. Si la imagen está en escala de grises, cada entrada de la matriz representa su valor de luminancia, la intensidad de gris del punto. Un valor 0 representa el color negro, mientras que un valor 255 representa el color blanco. De esto último se deduce que en cada entrada de la matriz se almacena un byte lo que nos proporciona los mencionados 256 valores los cuales para una imagen en escala de grises son más que suficientes.

Si la imagen es en color, tenemos dos formas de almacenarla en la matriz:

- **TRUE-COLOR (Color verdadero):** En este esquema para cada punto de la imagen se almacenan las tres componentes de color que lo definen. Para una profundidad de color de 8 bits, cada punto de la imagen se representará con 3 bytes o, lo que es lo mismo, 24 bits de color. Existen otros esquemas tales como HiColor en el que cada punto ocupa 16 bits o los nuevos formatos de color de 32 bits en los cuales el byte adicional puede almacenar

información de profundidad, para sistema 3D o el llamado canal alpha que representa la transparencia de ese punto y es utilizado para combinar distintas fuentes de imagen.

- PALETA DE COLOR: Con este esquema, se crea una tabla en la que se almacenan los colores que aparecen en la imagen, en forma de componentes R, G y B. Esta tabla recibe el nombre de paleta de color. La matriz de la imagen almacena el índice de la entrada en la paleta que contiene el color del punto que se esté referenciado. Así si la entrada 25 de la paleta contiene los valores (255,0,0), todos los puntos rojos (rojo totalmente saturado) de la imagen se referencia con el valor 25.

Este esquema resulta interesante siempre que el número de entradas de la paleta, es decir, el tamaño del índice en bytes, sea menor que el tamaño en bytes de la definición de color. Generalmente tenemos paletas de 256 colores con lo cual con un solo byte podemos direccionar todas sus entradas, y cada entrada de la paleta almacena 3 bytes, uno por cada componente de color. Este esquema además nos ahorra memoria, pues, por ejemplo, cuando antes nos hacía falta 3 bytes por punto, ahora llega uno más lo que ocupe la paleta.

El formato de paleta de color es útil cuando se trata solamente de representar imágenes, puesto que de cara a su procesamiento es necesario convertirla a formato **true-color**, lo cual se hace de forma inmediata sustituyendo cada índice de la matriz de la imagen, por el contenido de la paleta apropiado. La razón por la que no se puede procesar las imágenes con un formato de paleta de color es que, en general, cuando se aplica algún tipo de procesado a la imagen se generan nuevos colores que no están definidos en la paleta, con lo cual no pueden ser representados. Además, el hecho de tener una paleta, hace que los puntos no sean independientes, es decir, todos los puntos con el valor 25 tienen el

mismo color. Si tuviésemos que modificar uno solo de ellos, tendríamos que generar una nueva entrada en la paleta para ese color, o localizar ese color entre los ya definidos en la paleta. A continuación se describirá de forma general como funciona el hardware de video.

3.1.2. El hardware de vídeo

El hardware de video es la parte del computador que se encarga de enviar las señales apropiadas al monitor para que se represente en éste la imagen que tenemos almacenada en la memoria de video en alguna de las formas comentadas en el apartado anterior. Por supuesto el monitor también es parte (imprescindible de hecho) del hardware de video.

Básicamente el hardware de vídeo esta formado por un controlador de vídeo y la memoria de vídeo. El controlador de vídeo es un chip que controla todo el proceso de generación de las señales del monitor. Generalmente este chip es programable y es el encargado de proporcionar los modos de vídeo soportados en nuestras computadoras.

Los modos de video se suelen caracterizar por la resolución y el número de colores. La resolución define el número de puntos que pueden ser representados en la pantalla en dirección horizontal y vertical, estos puntos reciben el nombre de píxeles. Así una resolución de 800x600 permite representar 800 píxeles horizontales por 600 verticales. Una imagen formada por una matriz de 800x600 ocuparía toda la pantalla. El número de colores representa la cantidad de colores distintos que puede generar el hardware de video. Valores típicos son 16 colores o 256 colores, generalmente en formato paleta de color. Cuando el formato pasa a ser **true-color**, el concepto de número de colores se sustituye por profundidad de color o bits de color y así hablamos de profundidades de 16 bits, 24 bits o 32 bits.

La memoria de video generalmente es una memoria especial ya que necesita ser accedida por una parte por el procesador central del ordenador, cuando le pedimos que pinte algo en pantalla y por el controlador de video para generar las señales del monitor. El tamaño de la memoria de video está estrechamente relacionado con los modos de video soportados, veamos un ejemplo de esta relación.

Supongamos que disponemos de un modo con una resolución de 640x480 con 256 colores simultáneos y un formato de paleta de color. Con este esquema, como ya se explicó cada punto ocuparía 1 byte, por lo que necesitaríamos $640 \times 480 = 307200$ o 300 Kbytes. Si en lugar de los 256 colores tuviésemos un formato true color de 24 bits, la misma resolución requeriría 3 veces más memoria, 900 Kbytes.

3.1.3. Los modos de 16 colores

En los sistemas de video como EGA o las primeras VGA (256 Kbytes), en los modos de alta resolución (en 640x480 de aquella y aún hoy para algunos usuarios) sólo era posible representar 16 colores simultáneos en pantalla. Para poder codificar 16 colores necesitamos 4 bits, con lo cual en cada posición de la memoria de video podríamos codificar dos píxeles. Sin embargo estos modos almacenaban la información de una forma distinta, utilizando los llamados planos de bits.

En este enfoque, la imagen estaba formada por 4 planos de bits, en cada uno de los cuales se almacenaba una representación monocroma de la imagen con relación al bit de entre los cuatro posibles para representar los 16 colores de referencia es decir, si por ejemplo en la paleta de color se representaba el color rojo con los bits 1001, para poder observar ese pixel era necesario pintarlos en el plano 0 y en el plano 3.

Un esquema de este tipo presenta ventajas e inconvenientes como sucede en todos los campos. Entre las ventajas podemos citar:

- Con esta organización de memoria podemos pintar 8 píxeles con solo un acceso a memoria. La limitación es que los 8 píxeles están en el mismo plano, así si necesitamos 4 colores tendríamos que realizar 2 accesos para pintar los 8 pixels, en el peor caso solo se realizarían 4 accesos a memoria para pintar los 8 pixels. Entre cada uno de estos accesos es necesario enviar información a los registros de la tarjeta de video mediante instrucciones OUT las cuales suelen ser más lentas, pero en general si no utilizamos los 4 planos ganamos velocidad.
- Rellenar un plano para toda la pantalla se convierte en un volcado en una zona lineal, la pantalla pasa a ser de 80x480 (640/8 x 480 líneas), lo que facilitaba operaciones como 'escrolles'.
- Mediante una redefinición adecuada de la paleta de color podemos crear efectos de transparencia una forma muy sencilla. Si definimos los colores con el bit 3 a 1 (del 8 al 15) con las mismas tonalidades que los que lo tienen a 0 pero un poco más oscuras, pintar sobre el plano 3 hace que los colores de la imagen se oscurezcan. De la misma forma si definimos estos colores con un valor fijo, las zonas en las que pintemos en el plano 3 pasarán a tener el mismo color independientemente de lo que tengan en los otros planos.

Entre las desventajas podemos citar:

- Pintar un solo pixel requiere operaciones adicionales. Al codificarse 8 píxeles en un solo byte, además de calcular el byte en el que se debe almacenar un pixel con

determinadas coordenadas es necesario calcular la posición del pixel dentro. Para estos casos en los que interesa el acceso a píxeles individuales los controladores de video soportaban un método alternativo de escritura en el cual se escribían los 4 planos en un solo acceso.

- La limitación a sólo 16 colores.

Dependiendo de la aplicación la utilización de esta filosofía de acceso a la memoria de video mediante planos de bits y en bloques de 8 píxeles puede ser más aconsejable que un acceso directo a los píxeles. En concreto este mapeado de memoria era y es utilizado generalmente por los juegos. Si bien, esto está pensado para sistemas de 16 colores, se puede programar los registros del controlador de video para permitir un acceso de este tipo en modos de 256 colores disponiéndose, en este caso, de ocho planos de bits. Estos modos se conocen en general como modos X y siguen en vigencia, prueba de ello es el soporte que proporcionan las bibliotecas **DirectX** de Microsoft para Windows98.

3.1.4. Cuantificación de Colores

La reducción de los colores se basa fundamentalmente en una discretización del espacio de color RGB (*) (en el que se encuentran definidos los colores de la imagen TRUE COLOR) dividiéndolo en cubos.

En un primer paso se calculan los rangos de variación de las distintas componentes RGB en la imagen. En realidad este paso es de poca utilidad puesto que las imágenes más agradables a la vista deben estar bastante contrastadas lo que implica que contengan colores, por una parte próximos al negro y por otra próximos al blanco con lo cual, en general, estaremos dividiendo todo el cubo RGB.

(*) Siglas de Red, Green, Blue.

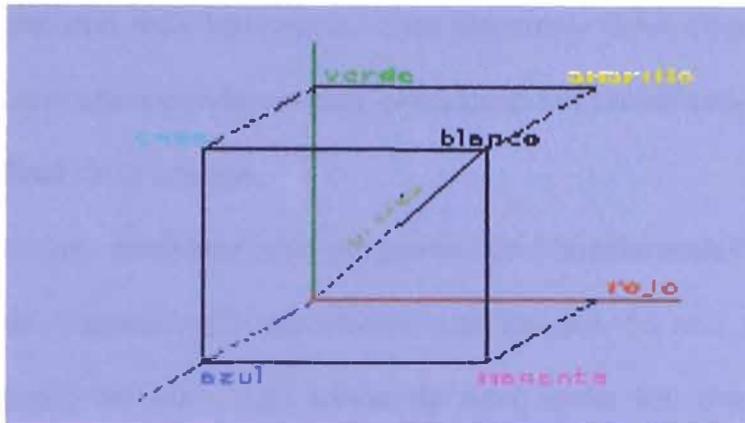


Figura 3.1: Cubo de los colores primarios y secundarios

Posteriormente se discretizan todos los colores en la imagen asignándolos a uno de los cubos en los que se ha dividido la imagen, para posteriormente reducir el número de cubos al número de colores deseados. Cada cubo representa un color que será la media de todos los colores en el contenido.

Con esta información se construye una paleta y se representa la imagen en pantalla, ya sea asignando a los distintos colores su representante asociado al cubo al que pertenecen o utilizando técnicas de “dithering”.

Si el número de cubos conteniendo píxeles de la imagen es superior al número de colores que deseamos en nuestra imagen final, es necesaria una reducción del número de cubos. Esta reducción se lleva a cabo asimilando los cubos que contienen el menor número de píxeles al cubo que se encuentre más próximo y por lo tanto que tendrá un representante lo más parecido posible al asociado al cubo que se desea eliminar.

La selección de los colores más representativos de una imagen es un asunto complicado. El algoritmo más simple para llevar a cabo esta tarea es el conocido como

algoritmo de popularidad, en el que se considera que los colores más importantes son aquellos que aparecen con más frecuencia. Este algoritmo tiene como inconveniente que elimina colores que aún apareciendo en muy poca cantidad tienen una gran importancia en la calidad subjetiva final de la imagen.

Supongamos que mediante un programa de “renderizado” 3D (por ejemplo mediante técnicas de “raytracing”) generamos una imagen de una esfera azul metálica iluminada por un punto de luz. Los tonos de azul serán los que más aparecerán, a excepción de unos pocos tonos claros en la región donde se refleja la luz (en nuestro programa 3D hemos caracterizado la esfera con reflexión especular). El algoritmo de popularidad eliminaría esos colores obteniéndose un resultado final de muy mala calidad. Si conservásemos estos tonos claros y eliminásemos algunos de los azules, el resultado sería mucho más agradable a la vista, ya que apenas notaríamos la diferencia entre dos tonos de azul muy parecidos.

De todo lo comentado en el párrafo anterior se deduce que más importante que la frecuencia de aparición de los puntos en la imagen, es la distancia entre los distintos puntos. Es mejor eliminar puntos muy parecidos aunque aparezcan muchas veces y sustituirlos por un sólo representante que eliminar colores que aún apareciendo pocas veces son muy distintos que el resto de los que aparecen en la imagen.

Un algoritmo más elaborado que el de la popularidad es el algoritmo del OCTREE. Este algoritmo lleva a cabo una división recursiva del espacio RGB en cubos cada vez de menor tamaño. En una primera etapa se divide todo el cubo RGB, obteniéndose 8 nuevos cubos (de ahí su nombre OCTREE -árbol de ocho en ocho-). Si alguno de los cubos no contiene píxeles de imagen, el árbol ya no sigue creciendo en esa dirección. El algoritmo teórico, divide los cubos hasta que cada uno de ellos sólo contenga un píxel. En realidad

no es necesario llegar a estos niveles, según lo expuesto anteriormente podríamos solamente dividir aquellos cubos en los que la varianza de los pixels en ellos contenidos fuese grande, de esta forma nos aseguramos de tener representados los colores más distintos de la imagen.

Este algoritmo en su forma original es muy poco práctico. Los árboles requieren una cantidad excesiva de memoria además de los requerimientos de almacenamiento de los píxeles de la imagen (estamos hablando de tamaños de imagen de cerca del Megabyte de memoria). Se han desarrollado varias técnicas para solucionar estos problemas. En la práctica en lugar de un árbol se construye una matriz con tantas componentes como el número de colores al que deseamos reducir la imagen. Cada entrada en la matriz representa un cubo en el espacio RGB. Por otra parte se hace necesaria la utilización de una tabla “hash” (desmenuzar) para reducir el número de bits por pixel de 24 bits a un valor apropiado, de forma que sea posible tener información de estos en memoria para el cálculo de la varianza en cada uno de los cubos.

El algoritmo comienza con 8 cubos y asigna los pixels de la imagen a cada uno de ellos. Posteriormente calcula el de mayor varianza y genera 8 nuevas entradas en la matriz, ajustando las características de los cubos que sufren modificaciones. Este proceso se repite hasta conseguir un número de cubos iguales al número de colores que deseamos reducir.

Este algoritmo obtiene unos resultados muy buenos, aunque de todas formas requiere bastante espacio de almacenamiento y las funciones ‘hash’ a utilizar tienen una importante influencia sobre el resultado final de la imagen.

Como ya indicamos, la reducción se hace eliminando el cubo que contiene el menor número de pixels de imagen y de todo lo expuesto en esta sección se deduce que esta no es una opción excesivamente buena. Sería más recomendable la asimilación de los dos cubos

más próximos en uno sólo, necesitando este proceso un número muy superior de operaciones al ser necesario el cálculo de distancias y una comparación exhaustiva entre todos los cubos disponibles.

Cuando la reducción se lleva a cabo para un número elevado de colores, en general no vamos a tener problemas de eliminación de colores importantes, puesto que se realiza un ajuste muy fino y por lo tanto tendremos cubos con colores próximos a los que más aparecen y con pocas componentes que ser eliminados, sin embargo cuando el número de colores al que queremos reducir se hace muy pequeño (32 ó 16 colores) esta división fina constituye un problema.

Si tenemos un ajuste muy fino del espacio RGB y el número de colores al que queremos reducir la imagen es muy pequeño tendremos que eliminar muchos cubos, en concreto los que tengan el menor número de píxeles. Inicialmente eliminaremos colores próximos a los que más aparecen como se indicaba en el apartado anterior, pero al seguir reduciendo estaremos eliminando los colores importantes de los que hemos hablado y que tienen asociados muy pocos píxeles de imagen.

Para solucionar esto nuestro programa permite que el usuario indique manualmente el número de divisiones por componente RGB que se desea realizar. Cuando nos encontramos en este caso una división más gruesa nos lleva a tener que eliminar menos cubos (o incluso ninguno) siendo más probable que prevalezcan los cubos conteniendo esos colores importantes de aparición menor.

Otra cuestión importante es la del remapeado de los pixels de la imagen. En general, una vez que tenemos seleccionados los colores más importantes de la imagen, asignamos a los pixels de la imagen aquel color de entre los que disponemos que más se le parezca. Cuando disponemos de un número elevado de colores, los resultados son bastante

buenos, pero cuando se hace una reducción a digamos 64, 32 o incluso 16 colores, se produce una pérdida de resolución, debida a la asimilación en un sólo color de un número bastante elevado de colores originales distintos (recuérdese que el número de colores es igual al número de cubos y cuantos menos colores queramos más grandes serán los cubos y más colores distintos asimilarán en uno solo -la media de todos ellos-).

3.2. Técnicas y algoritmos para el tratamiento general de imágenes

En este punto vamos a ver ciertos métodos de reducción de colores que dan un mejor resultado que los vistos con anterioridad. Pero para que la explicación sea más clara, vamos a realizar una reducción de grises, es decir, vamos a aplicar dithering a una imagen de 256 niveles de grises y la vamos a pasar a 16 grises. De esta forma, si queremos aplicar luego estos algoritmos a una imagen en color, simplemente habrá que aplicar la técnica a cada una de las componentes R, G y B de nuestra imagen

3.2.1. Técnicas de Dithering

Supongamos, como vimos anteriormente, que tenemos un ordenador que solo puede representar 16 colores (o niveles de grises) en pantalla, y nuestra imagen almacenada en memoria tiene 256 colores (o niveles de grises) ¿cómo podemos tener una presentación lo más fidedigna posible de la imagen almacenada en memoria? Este problema se soluciona con las técnicas de dithering que procedemos a explicar a continuación.

Inicialmente estas técnicas eran utilizadas para convertir imágenes en tonos de grises a imágenes monocromas, para poder observarlas en dispositivos de este tipo (pantallas de plasma, impresoras,...). La forma más sencilla de obtener una imagen monocromática es fijar un nivel de gris que constituye el umbral que nos indicará si el punto

se pinta. Por ejemplo, si pintamos puntos blancos sobre fondo negro, una vez fijado el umbral, los puntos cuya intensidad lo sobrepase se pintarán de blanco, los demás no aparecerán, por lo tanto un umbral bajo producirá una imagen muy clara.

Sin embargo, distintas zonas de una imagen pueden ser tratadas con un valor de umbral proporcional al valor medio de sus intensidades, con lo cual mantenemos la información de contraste local, y obtenemos unos resultados mejores. Esto se observa claramente en el siguiente ejemplo.

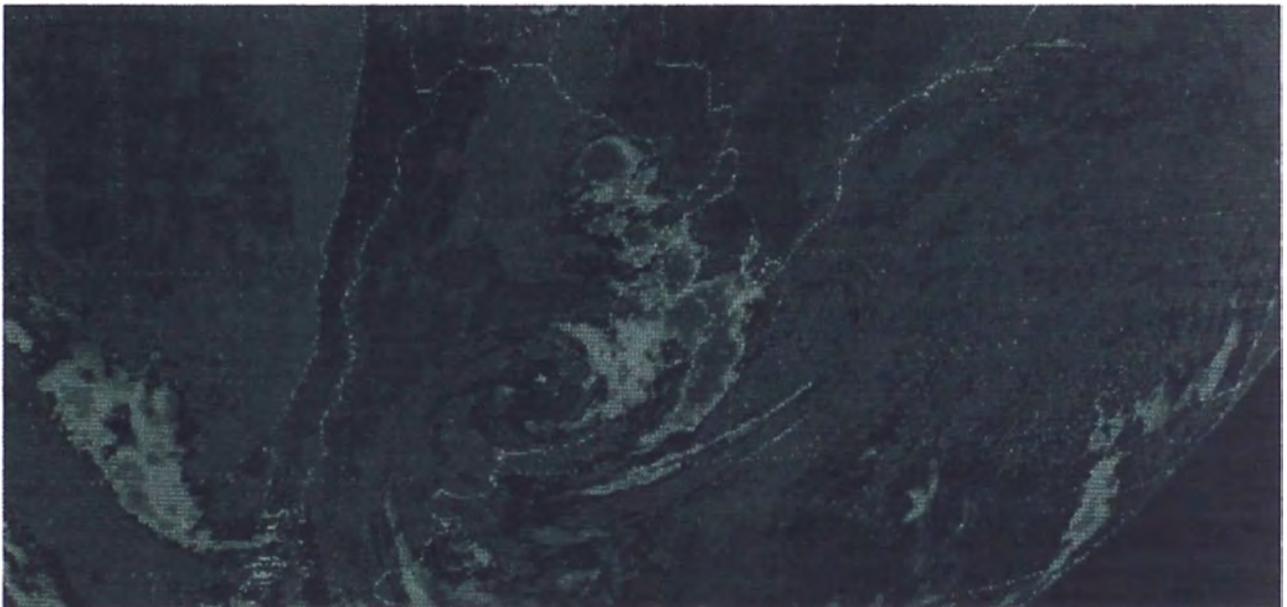


Figura 3.2: Aplicación de la técnica de Dithering

Este proceso genera una serie de falsos contornos que se pueden reducir mediante la adición de ruido seudo aleatorio (los ordenadores no pueden generar números aleatorios, generan números seudo aleatorios), es decir, se produce una reducción de las altas frecuencias en la imagen, los pasos del blanco al negro se hacen menos bruscos, puesto que el ojo tiende a promediar la intensidad localmente, simulando tonos de gris.

En la práctica se le añadía ruido a la imagen de grises y luego se procesaba con la técnica anteriormente descrita. Sumar ruido seudo aleatorio a una imagen y luego someterla

al proceso de paso a monocromo es equivalente a realizar un proceso con un umbral seudo aleatorio sobre la imagen sin ruido, y en este punto es donde aparecen las matrices de dithering y el proceso conocido como "ordered dithering". Las matrices de dithering contienen estos valores umbrales seudo aleatorios de los que hablábamos y la forma de generarlas es según una ecuación matricial recursiva, en la que se define la matriz de dithering por bloques.

Algunas matrices típicas son estas:

$$\begin{array}{cc}
 \begin{array}{cccc} 0 & 14 & 3 & 13 \end{array} & & \begin{array}{cccc} 0 & 8 & 2 & 10 \end{array} \\
 \begin{array}{cccc} 11 & 5 & 8 & 6 \end{array} & & \begin{array}{cccc} 12 & 4 & 14 & 6 \end{array} \\
 \begin{array}{cccc} 2 & 12 & 1 & 15 \end{array} & \text{ó} & \begin{array}{cccc} 3 & 11 & 1 & 9 \end{array} \\
 \begin{array}{cccc} 9 & 7 & 10 & 4 \end{array} & & \begin{array}{cccc} 15 & 7 & 13 & 5 \end{array}
 \end{array}$$

En el caso de las matrices 4x4 dividimos la imagen en grupos de 4x4 (obviamente) pixels a modo de tablero de ajedrez. De esta forma, superponiendo la matriz en cada recuadro, comparamos los valores de la imagen con el umbral que nos indica la matriz, si estamos por encima de éste, el punto aparece en pantalla.

Retomando nuestro objetivo inicial, en el que nos proponíamos reducir el número de grises de 256 a 16, indicamos la forma de utilizar el algoritmo del "ordered dithering" para nuestro propósito. Para representar 256 colores necesitamos 8 bits, y para 16 nos llegan 4 bits, lo cual nos simplifica ostensiblemente nuestra tarea.

El algoritmo trabaja de la siguiente forma: los 4 bits superiores del código de color a transformar, nos indican un nivel entre 16 dónde vamos a trabajar, por tanto se trata de aplicar el algoritmo monocromo a cada uno de estos 16 niveles, pintando el color de los 4 bits de mayor peso, si no es superado el umbral de la matriz de dithering o el nivel inmediato superior si es sobrepasado. Los cuatro bits de menor peso son los utilizados en la comparación con la matriz de dithering. Utilizando lenguaje C el algoritmo sería:

```
for (i=0;i<ancho_imagen;i++) {  
    x = i % 4;  
    for (j=0;j<alto_imagen;j++) {  
        in = imagen[i][j];  
        b0 =in >> 4;  
        if (b0+1>0xf) b1=0xf;  
        else b1 = b0+1;  
        vi = in & 0xf;  
        y = j % 4;  
        if (vi>matriz_dither[x][y]) pinta (i,j,b1);  
        else pinta (i,j,b0); } }  
}
```

En el programa todas las variables son enteras, el operador % nos da el resto de la división entre los dos números indicados. El operador `b0 =in >> 4` provoca un desplazamiento de 4 bits hacia la derecha de la variable `in` almacenando el resultado en `b0` (lo cual es equivalente a una división por 16). El operador `&` en un AND lógico y el prefijo `0x` indica que la constante está en hexadecimal.

3.2.2. Algoritmo de distribución del error

Este algoritmo en el caso de la reducción de 256 a 16 colores obtiene unos resultados muy semejantes al proceso anteriormente descrito, pero que ofrece una mayor versatilidad a la hora de trabajar con distintas cantidades de las indicadas.

Los algoritmos de distribución del error se basan en la sencilla idea de distribuir el error cometido en un pixel por los pixels adyacentes.

El algoritmo de distribución de error consiste en elegir de entre los niveles que podemos representar, aquel que minimice el error cometido, es decir, el que más se parezca al valor a representar menos el error asignado al pixel que estamos determinando. Una vez hecho esto calculamos el error, que no es más que la diferencia de ambos valores, y lo distribuimos entre los pixels adyacentes que todavía no hemos calculado. El más utilizado es el algoritmo de distribución del error de Floyd-Steinberg que distribuye el error entre los tres pixels adyacentes, según el esquema de la figura 3.3.a. y siguiendo una dirección de rastreo como la indicada en el esquema de la figura 3.3.b. Se trata del algoritmo de distribución del error de Floyd-Steinberg bidireccional.

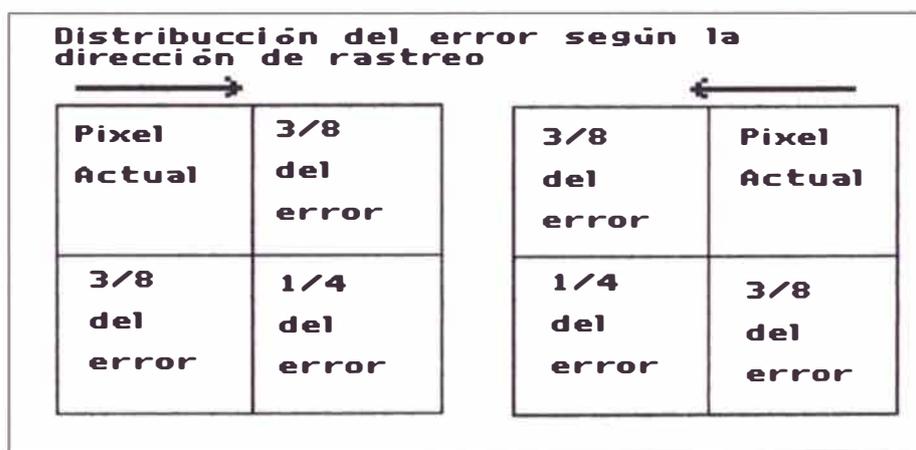


Figura 3.3.a. Distribución del error en Floyd-Steinberg

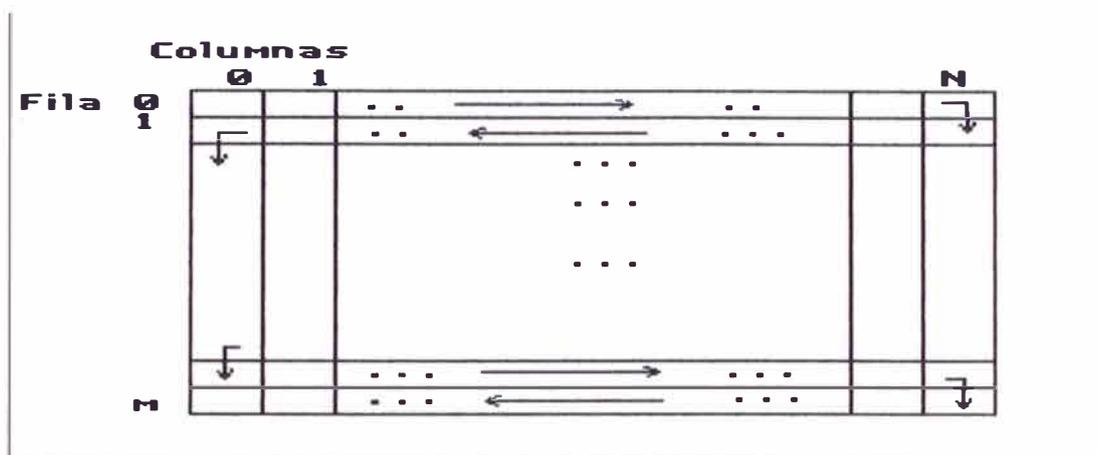


Figura 3.3.b: Dirección de rastreo en Floyd-Steinberg

Para almacenar el error cometido podemos utilizar una matriz de las mismas dimensiones de la matriz que contiene la imagen, en la que almacenamos los errores. En general en nuestro precario sistema gráfico, suele tener muy poca memoria y no vamos a tener sitio para una matriz de este tipo. Por eso es común utilizar algoritmos del tipo "scanline" (de rastreo de línea) en el que utilizamos una matriz del ancho de la imagen y de alto 2 líneas (para el algoritmo de distribución del error de Floyd-Steinberg), de tal forma que una vez calculada la primera línea, en la segunda tenemos los errores acumulados de ésta. Así que para la siguiente línea copiamos la segunda en la primera e inicializamos la segunda.

La función en lenguaje de programación estructurado C que realiza el algoritmo de distribución del error de Floyd-Steinberg bidireccional es:

```
error =0;
for (j=0;j<ancho_imagen;j++) error_acumulado[[j][0] = error_acumulado[j][1] = 0;
for (j=0;j<ancho_imagen;j++) {
    for (i=0;i<alto_imagen;i++) {
```

```

aux = imagen[i][j];

aux += error_acumulado[j][0]; /* Minimizamos la intensidad */

error = 100;

for (k=0;k<=niveles_representables;k++) {

    imagen _ color = color[k];

    max = aux - imagen _ color;

    if (abs(max)<abs(error)) {

        elegido = k;

        error = max; } }

dither_image[i][j] = pinta[elegido]; /* Distribución del error con aritmética
entera */

ee = error >> 2;

error_acumulado[i+1][1] += ee;

ee = (error - ee) >> 1;

error_acumulado[i+1][0] += ee;

ee = error - ee; error_acumulado[i][1] +=ee; }

for (k=0;k<ancho_imagen;k++) {

    error_acumulado[k][0] = error_acumulado[k][1];

    error_acumulado[k][1] =0; } }

```

En dónde todas las variables son enteras. La variable `niveles_ representables` contiene el número de niveles que disponemos para observar en pantalla, y `color[k]` contiene el valor de nivel de gris, en el rango de la imagen a tratar, con el que minimizamos el error. La

matriz pinta contiene la entrada de la paleta en la que se encuentra el tono de gris indicado por $\text{color}[k]$.

Un comentario antes de terminar, los colores que representamos en pantalla, se suelen tomar de la paleta de la imagen original, escogiendo según una cuantificación de color, de esta forma obtenemos los mejores resultados.

3.2.3. Conversión a Escala de Grises

En esta parte trataremos la conversión de una imagen en color a escala de grises, el equivalente a la luminancia de la imagen. Como ya sabemos el ojo percibe distintas intensidades de luz en función del color que se observe, esto es debido a la respuesta del ojo al espectro visible la cual se puede observar en la figura 3.4, por esa razón el cálculo del equivalente blanco y negro (escala de grises o luminancia) de la imagen debe realizarse como una media ponderada de las distintas componentes de color de cada píxel.

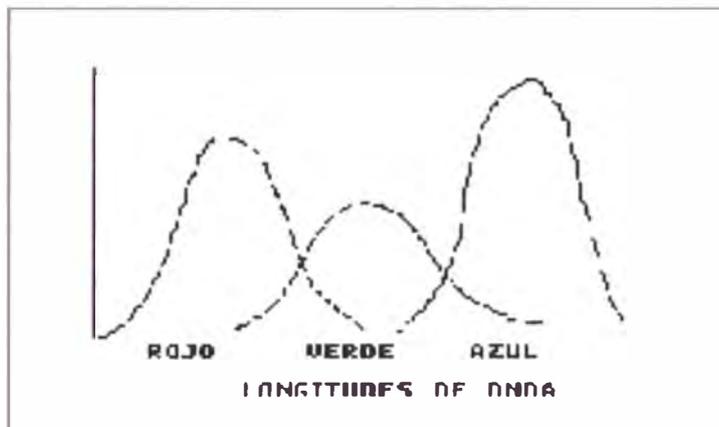


Figura 3.4. Respuesta de la vista al espectro visible

La ecuación de la luminancia nos muestra la expresión matemática de ese fenómeno y los factores de ponderación de cada componente de color nos indican la sensibilidad del ojo humano a las frecuencias del espectro cercanas al rojo, verde y azul.

$$Y = R*0.3+G*0.59+B*0.11 \quad (3.1)$$

Por tanto, para realizar esta conversión llega con aplicar esta ecuación a cada pixel de la imagen true-color. Aparecería una nueva matriz de un byte por pixel que daría la información de luminancia.

Si quisiéramos convertir a escala de grises una imagen de paleta, bastaría con convertir cada color de la paleta a su gris correspondiente según la ecuación anterior, creando una nueva paleta de grises, tal como se ve en la figura 3.5.

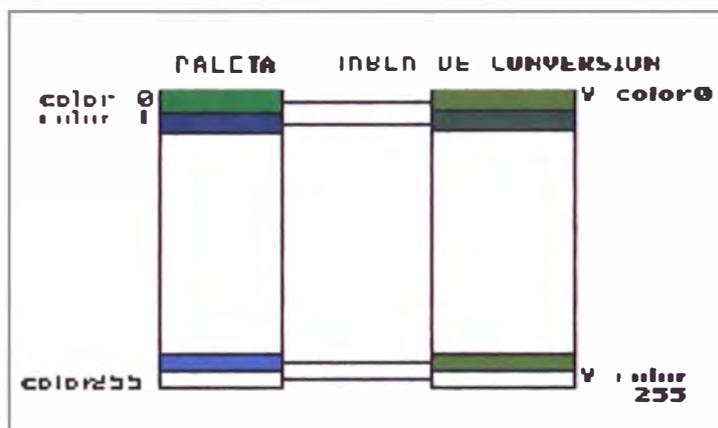


Figura 3.5. Escala de conversión colores / gris

3.2.4. Filtrado de Imágenes

El filtrado de imágenes se puede considerar, como en otras muchas técnicas de procesamiento, una extensión a dos dimensiones del proceso homónimo en una dimensión.

Básicamente el proceso de filtrado consiste en realizar una serie de operaciones sobre cada uno de los pixels que componen la imagen. Puesto que nosotros vamos a

trabajar con imágenes en escala de grises por comodidad, cada pixel se corresponde con un entero que indica la luminosidad del pixel. En general, para imágenes en color, es necesario aplicar estas operaciones sobre las tres componentes de color R, G y B, como si cada una de ellas fuese una imagen en escala de grises.

Vamos a tratar dos tipos de filtros usualmente implementados en las aplicaciones de retoque. Veremos por una parte los filtros lineales FIR, que se basan en la convolución discreta de dos señales: la imagen a filtrar y el filtro, el cual puede ser considerado como otra imagen generalmente de menor tamaño.

Puesto que se trata de filtros de respuesta impulsional finita (FIR) en dos dimensiones, su forma será la de una matriz generalmente 3x3 o 4x4 en la que se almacenan los coeficientes. Normalmente estas matrices van acompañadas de otros dos parámetros:

- **Bias:** Este es un valor que se le suma a cada pixel sobre el que se aplica el filtro.
- **Factor de escala:** Este valor divide la respuesta del filtro en cada pixel. Si las operaciones se realizan en punto flotante, este valor se puede incluir directamente en los coeficientes, ahorrándonos la operación adicional. El hecho de que se considere es permitir realizar la **convolución** (el grueso de las operaciones) con números enteros y normalizar posteriormente el resultado.

El otro bloque de filtros a tratar, son los **no lineales**. Si bien, a efectos prácticos, la implementación es muy semejante a la de los filtros lineales, las operaciones que se realizan sobre cada pixel de la imagen son no lineales. Se tratará los llamados filtros de rango o RANK FILTERS. A diferencia de los anteriores, los lineales, que quedaban

perfectamente definidos a través de una matriz y los parámetros bias y factor de escala, los filtros no lineales requieren una implementación específica para cada uno de ellos.

Para el caso concreto de los filtros de rango, máximo, mínimo y mediano, el resultado del filtrado para cada pixel es el valor máximo, mínimo o mediano de la ventana de influencia del pixel, de lo que se deduce que la implementación de cada uno es específica no pudiéndose sistematizar como en el caso lineal.

3.2.5. Filtrado Lineal

Un filtrado lineal, tal como introdujimos en el apartado anterior, se puede expresar de la siguiente manera:

$$k \cdot A * x + b \quad (3.2)$$

con k factor de escala, A la matriz del filtro, b el bias y x es una submatriz de nuestra imagen (debe coincidir con el tamaño matricial de A). Vemos que hay tres símbolos de operación, dos de ellos bien conocidos:

+ Suma

· Multiplicación

Pero aparece una tercera operación entre matrices, la del filtro (A) y la de la imagen (x) que es la **convolución**. En el caso de los filtrados lineales, como siempre se aplica la misma operación, sólo hay que desarrollar un algoritmo siendo lo que cambia para cada caso la matriz, el factor de escala y el bias.

3.2.6. Convolución y correlación.- Fundamentos

Una de las más comunes operaciones sobre las imágenes en el **dominio espacial** es la convolución, en la que un núcleo de números es multiplicado por cada pixel y sus

vecinos en una pequeña región, los resultados sumados son colocados en la ubicación original del pixel. Esto es aplicado a todos los píxeles en la imagen. En todos los casos, los valores originales de los pixel son utilizados en la multiplicación y suma, y los nuevos valores son usados para producir una nueva imagen. Algunas veces esta operación es ejecutada en pocas líneas al mismo tiempo, de tal manera que la nueva imagen reemplaza finalmente a la antigua.

Este tipo de convolución es particularmente usual para la simplificación (smoothing) y las operaciones derivadas. Por ejemplo, una simple simplificación del núcleo podría contener los siguientes valores:

1/16	2/16	1/16
2/16	4/16	2/16
1/16	2/16	1/16

En la práctica, esta rápida implementación sería multiplicando el pixel y sus ocho vecinos inmediatos por los enteros 1, 2 o 4, la suma de los productos es luego dividida por 16. En este caso, el de uso enteros que tienen potencias de 2 permite que el cálculo sea extremadamente rápido (incluyendo sólo los bits cambiados), y el pequeño tamaño del núcleo (3x3) realiza la aplicación del algoritmo de simplificación en el dominio espacial de la imagen tan rápido como bueno.

Hay muchos núcleos de dominio espacial, incluyendo los que tomas primeras derivaciones (por ejemplo, para encontrar los bordes) y segundas derivaciones (por ejemplo, el Laplaciano, el cual es un operador no direccional que actúa como un filtro pasabajo para agudizar los puntos y líneas). Son usualmente presentados como un juego de enteros, con el entendido de que hay un divisor (usualmente igual a la suma de todos los

valores positivos) que normaliza el resultado. Algunas de estos operadores puede ser significativamente mas grande que el ejemplo del 3x3 mostrado arriba, involucra la suma conjunta de la suma ponderada de los vecinos en una región mas grande que es usual, pero no necesariamente cuadrada.

Aplicando una muestra del núcleo, la figura 3.6. ilustra el proceso gráficamente para un lugar simple del núcleo. Sin embargo con algunos cálculos rápidos y una codificación cuidadosa del proceso a ejecutar sumas y multiplicaciones en el orden mas eficiente, ejecutando la operación con un núcleo 25x25 en una imagen de 512x512 podría requerir un una cantidad de tiempo importante (y también mas grandes núcleos e imágenes son encontrados a menudo). Aunque puede apresurarse con el uso de hardware especial, tal como un procesador (DSP), se requiere de una inversión de propósito especial. Una inversión de hardware similar puede ser utilizada para acelerar la transformada de Fourier.

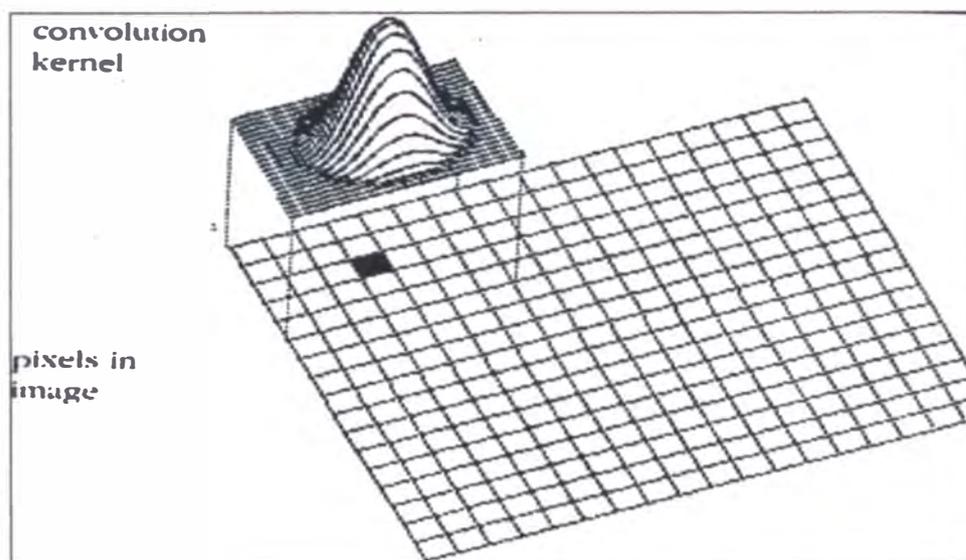


Figura 3.6. Aplicación de la convolución a la imagen en el dominio espacial

Para cualquier sistema basado en computadores, el incremento del tamaño del núcleo eventualmente llega al punto de ser más eficiente para realizar la operación en el dominio de Fourier. El tiempo necesario para ejecutar la transformación FFT o la FHT (*) desde un dominio espacial al dominio de la frecuencia y su retorno es más que balanceada por la velocidad con la que la convolución es llevada a cabo. Si hay alguna otra razón para ejecutar la transformación a la representación de la imagen en el dominio de la frecuencia, entonces se puede aplicar más eficientemente pequeños núcleos.

Esto es porque la operación equivalente para la convolución en el dominio espacial es una simple multiplicación de cada pixel en la magnitud imagen por el correspondiente pixel en una transformada del núcleo. La transformada del núcleo puede ser obtenida y almacenada previamente apenas el núcleo es almacenado. Si el núcleo es más pequeño que la imagen, este es rellenado con ceros hasta completar el tamaño de la imagen. Sin derivar en una prueba, puede ser simplemente detenida que la convolución en el dominio espacial es exactamente equivalente a la multiplicación en el dominio de la frecuencia. Usando la notación presentada anteriormente, en la que la imagen es una función $f(x,y)$ y el núcleo es $g(x,y)$, podríamos describir la operación de convolución en la que el núcleo está posicionado por todas partes de la imagen y multiplicado de la siguiente manera:

$$G(x,y)*f(x,y) \Leftrightarrow = \iint (f(\alpha,\beta).g(x-\alpha,y-\beta))d\alpha.d\beta \quad (3.3)$$

(*) Fast Hartley Transform (Hartley,1942). Citada por John Russ en "The Image Processing Handbook", ver la información anexa al final.

Donde α y β son variables mudas para la integración, el rango entre la imagen entera y el símbolo * indican la convolución. Si las transformadas de Fourier de $f(x,y)$ y $g(x,y)$ son $F(u,v)$ y $G(u,v)$ respectivamente, entonces la operación de convolución en el dominio de Fourier es una simple multiplicación punto por punto o :

$$g(x,y) * f(x,y) \Leftrightarrow G(u,v)F(u,v) \quad (3.4)$$

Hay pocas diferencias prácticas entre la dos operaciones. La aplicación usual de un núcleo en el dominio espacial evita el borde de los píxeles (aquellos mas cercanos al borde que están al medio ancho del núcleo), puesto que sus vecinos no existen. Como una alternativa practica, un núcleo diferente que está a un lado y su diferente peso puede ser aplicado en los bordes cercanos. Transformando la imagen al dominio de la frecuencia, la suposición tácita es que la imagen envuelve alrededor de los bordes, tal que el borde izquierdo es contiguo con el derecho y el de arriba es contiguo con el de abajo. Aplicando una convolución multiplicando en el dominio de la frecuencia es equivalente a direccionar los píxeles en la misma manera envolvente que aplicando el núcleo a la imagen espacial. Esto usualmente produce algunos artefactos en los bordes.

La siguiente figura 3.7 muestra la equivalencia de la **convolución en el dominio espacial y la multiplicación en el dominio de la frecuencia**, para el caso de un núcleo de gran llanura. El núcleo es mostrado mas adelante con su transformada. Aplicando el núcleo a la imagen en el dominio espacial produce el resultado mostrado en el ejemplo. Multiplicando la transformada del núcleo por la transformada de la imagen produce la

imagen en el dominio de la frecuencia cuyo espectro de potencia es mostrado. Retransformando esta imagen produce el resultado idéntico a la operación en el dominio espacial. Grandes núcleos tales como éste son usados a menudo para imágenes llanas a fin de eliminar a pequeños rasgos y obtener un respaldo variable que pueda luego ser sustraído para aislar las formas.

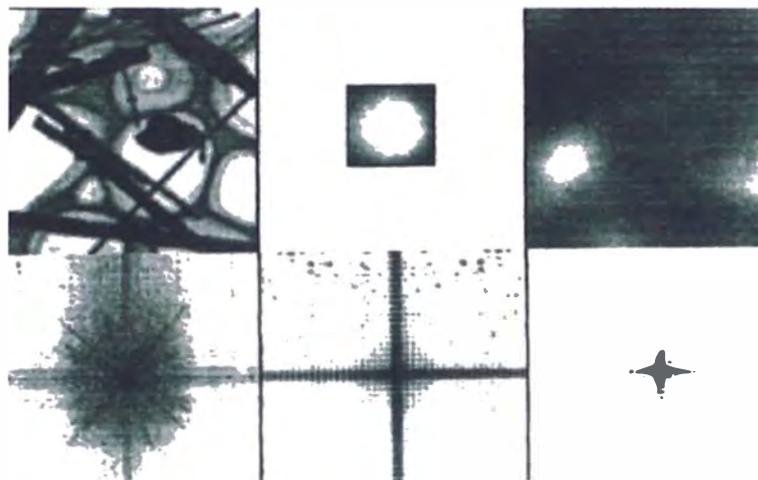


Figura 3.7. El cuadro superior izquierdo muestra la imagen original; debajo está su transformada en el dominio de la frecuencia. El cuadro superior central el núcleo (kernel) allanado; debajo su transformada en frecuencia. El cuadro derecho superior, la imagen allanada producida por la convolución espacial con el núcleo o retransformación; el cuadro derecho inferior muestra la convolución (producto de las transformadas preliminares)

Observemos que el equivalente en la multiplicación en el dominio de la frecuencia a la convolución en el dominio espacial esta restringida a los filtros multiplicativos o lineales. Otras operaciones en la vecindad, tales como filtrar el rango (almacenando los valores de brillo, oscuridad o mediano brillo en una vecindad) son no lineales y no tienen un equivalente en el dominio de la frecuencia.

3.2.7. Características de los sistemas de imágenes

La convolución puede ser utilizada también como una herramienta para comprender como los sistemas de imágenes modifican o degradan imágenes. Por ejemplo, la borrosidad introducida por lentes imperfectos puede ser descrita por una función $H(u,v)$ que es multiplicada por la frecuencia transformada de la imagen (figura 3.8).

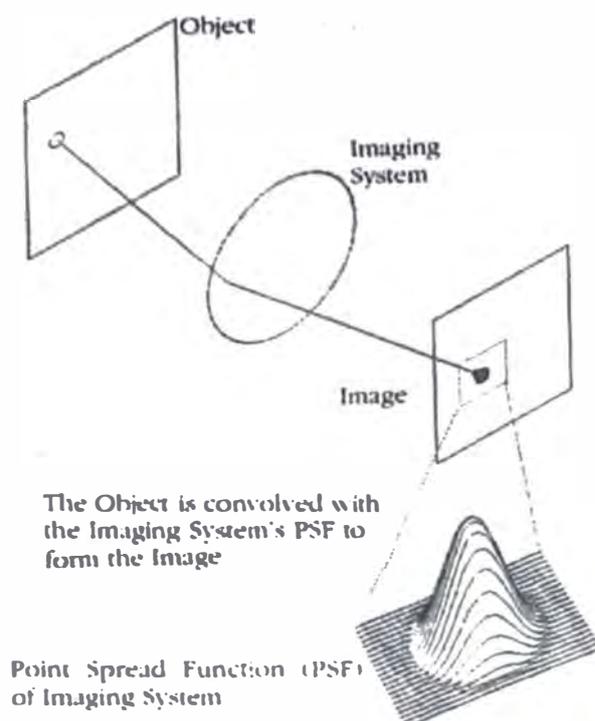


Figura 3.8. El sistema característico presenta una función de punto expandido en la imagen adquirida

La operación de óptica física es rápidamente modelada en el dominio de la frecuencia. Algunas veces es posible determinar las características separadas de cada componente del sistema; algunas veces no. En pocos casos, determinar la función amplia del punto (PSF) del sistema (el grado en que un punto perfecto en el plano está borroso en el plano de imagen) puede hacerse posible bordeando al imagen removiendo algo del borrón. Esto es hecho dividiendo por $H(u,v)$, la transformada del punto amplio de la imagen.

Para ilustrar este bordeamiento podemos usar una prueba simple del patrón mostrado antes. Las líneas radiales parecen irresueltas en el centro del patrón, sin embargo en el mejor enfoque de la imagen mostrada en la figura 3.9. Esto es debido a la resolución limitada de la cámara de video usada (un arreglo CCD de estado sólido). La imagen fue digitalizada como un cuadrado de 256x256. La figura mostraba el espectro de frecuencia (usando una escala logarítmica) para la imagen in foco original. El declive en potencia en altas frecuencias está en conformidad con la pérdida de resolución visual en el centro del patrón.

Como una imagen intencionalmente fuera de foco fue obtenida esta figura por el ajuste medio del lente de la cámara. Adicionalmente a la borrosidad de las líneas, este desenfoque también reduce ligeramente el contraste de imagen. La función de punto amplio (PSF) del sistema de cámara fue determinada ubicando un simple punto negro en el centro del campo visual, sin perturbar el foco del lente y adquiriendo la imagen mostrada en la figura 3.9.

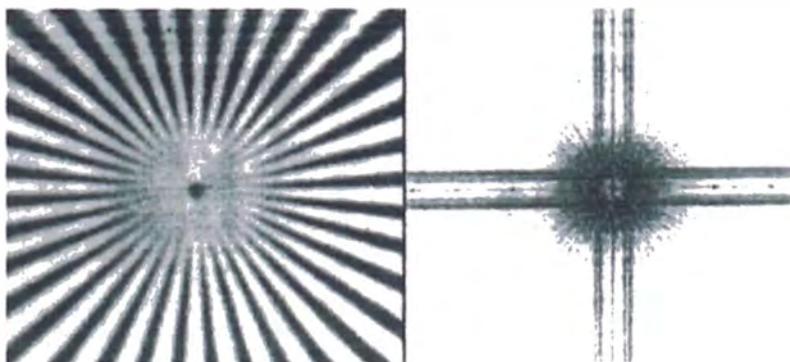


Figura 3.9: El borrón (fuera-de-foco) a la izquierda y su transformada en frecuencia a la derecha.

El espectro de potencia (usando una escala de exhibición logarítmica) para la imagen fuera de foco y el punto amplio son mostrados en las figuras 3.10 y 3.11

respectivamente. La magnitud de la función de punto amplio del sistema de imagen es algunas veces llamada Función de Transferencia de Modulaci3n (MTF). La reducci3n en medias y altas frecuencias para el patr3n fuera de foco es evidente. Para la funci3n sim3trica de punto amplio, el anillo blanco a un tercio del ancho de la imagen es un anillo de valores cero que se volver3 importante en la ejecuci3n de la convoluci3n.

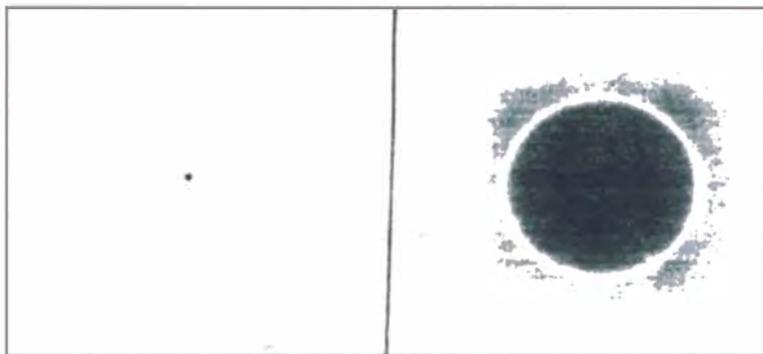


Figura 3.10. El borr3n (fuera-de-foco) de un simple punto a la izquierda y su transformada en frecuencia a la derecha.

Para la deconvoluci3n, dividimos la imagen compleja en el dominio de la frecuencia por la prueba del patr3n fuera de foco por el punto amplio. Realmente, esto es hecho dividiendo los valores de la magnitud y restando los valores de la fase. El resultado de la retransformaci3n despu3s de ejecutar la divisi3n compleja es mostrado en la figura 3.11.

Mientras algo sugiere que la prueba del patr3n es evidente, la imagen retransformada es dominada por un patr3n de ruido. Esto resulta de los ceros en el divisor, que causan problemas de desbordamiento en el programa.

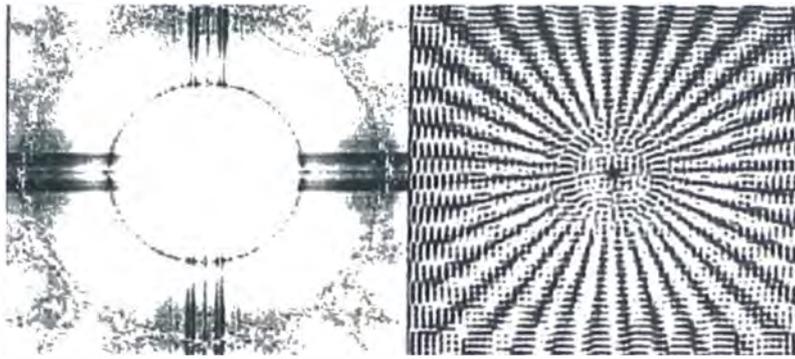


Figura 3.11. Muestra el resultado de dividir la transformada en frecuencia de la figura 3.10. por aquella (izquierda) y la retransformación a la derecha.

Hay dos aproximaciones para tratar con este efecto, ambas buscan restringir la división a aquellos píxeles en la imagen transformada compleja que no cause desborde. Una es ubicar una restricción física tal como un filtro o una máscara, en la imagen (esto es descrito a menudo como “apodization”). La otra es definir un resultado cero para cualquier división que cause desborde numérico. Definiendo una banda circular a lo largo de la línea de ceros, con el coseno “edge weighting” sobre una región de seis píxeles de ancho, los ceros son evitados. La retransformación produjo el resultado mostrado en la figura 3.12. La mayor parte de imperfecciones han sido removidas y las líneas radiales aparecen bien definidas, sin embargo no son como la imagen original en foco del patrón de prueba.

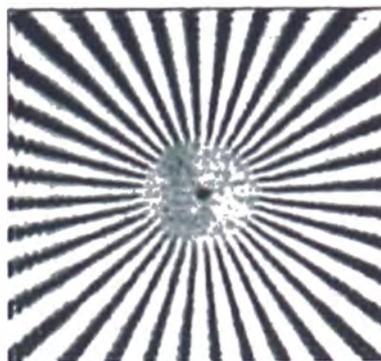


Figura 3.12. El mismo procedimiento, como en la figura 3.11., pero restringiendo el rango para evitar los ceros.

Hay trampas potenciales en este método. Un problema es la representación finita de los números complejos de la imagen en el dominio de la frecuencia. La división entre pequeños valores puede producir desborde numérico que puede introducir serias imperfecciones en la imagen.. También, es a menudo muy difícil obtener una buena función de punto expandido por el registro de una imagen real. Si el ruido contenido de esa imagen y esta va a ser delineada son diferentes, puede exacerbar la precisión numérica y los problemas de desborde. La remoción además de una fracción pequeña de la borrosidad en una imagen real es casi nunca posible, pero por supuesto que hay algunas situaciones en que igualar a una pequeña mejora puede ser de considerable importancia práctica.

La división por los cambios de frecuencia del borrón está referida como a un filtro inverso. Usando la notación introducida previamente, la podemos escribir como:

$$F(u, v) \approx \left[\frac{1}{H(u, v)} \right] G(u, v) \quad (3.5)$$

Una aproximación para limitar el daño causado por muchos valores pequeños de H es sumar un factor de peso tanto como los ceros que deben ser evitados.

$$F(u, v) = \left[\frac{1}{H(u, v)} \right] \left[\frac{|H(u, v)|}{|H(u, v)| + K} \right] G(u, v) \quad (3.6)$$

Idealmente, K debería ser calculada de las propiedades estadísticas de la transformada (En cuyo caso ésta es conocida como filtro Wiener). Sin embargo, cuando es impráctica, es lo común aproximar K por prueba y error para encontrar una imagen

restaurada satisfactoriamente en la cual las formas de los bordes desde términos de alta frecuencia es balanceada contra el ruido de la división por números pequeños.

Esta aproximación para remover el borrón es aplicada para iluminar las imágenes de la sección óptica del microscopio en las muestras turbias.. La borrosidad es producida por el paso de luz a través de porciones de la muestra por encima y debajo del plano del foco. No es posible conocer los detalles exactos de la función “blur”, con los cambios de punto a punto en la imagen, y de sección a sección. Pero asumiendo algo acerca de la imagen, usualmente esos bordes podrían ser delineados y esas regiones aproximadamente uniformes tienen la misma sombra de gris, desplegando la función “blur” con un filtro tipo Wiener en el cual el valor de K es ajustado para efectos visuales produce una imagen mejorada.

Hay otras maneras para remover el borrón de las imágenes. Una es el método de máxima entropía. Este asume alguna presciencia sobre la imagen, tal como sus características de ruido. Esta información es expresada de un modo diferente que el patrón del filtro, pero ambos métodos representan compromisos prácticos.

□ **Eliminación del borrón de movimiento y otros defectos**

Los defectos adicionales excepto la óptica fuera de foco pueden ser corregidos en el dominio de la frecuencia. Uno de los defectos mas comunes es el borrón causado por el movimiento. Esto es raramente un problema en las aplicaciones de microscopio, pero puede ser muy importante en el sensado remoto, el que los niveles de luz son bajos y el tiempo de exposición debe ser prolongado suficientemente para que un movimiento significativo ocurra para la cámara respecto a la escena. Afortunadamente, en muchas de estas circunstancias la cantidad y dirección del movimiento son conocidas. Esto hace posible trazar una línea en el dominio espacial que define al borrón. La transformada en frecuencia de esta línea es luego dividida dentro de la transformada de la imagen borrosa.

Retransformando la imagen resultante restaura el resultado del borde. Las figuras 3.13. a 3.15. ilustran este método. La figura 3.13 es la imagen borrosa.

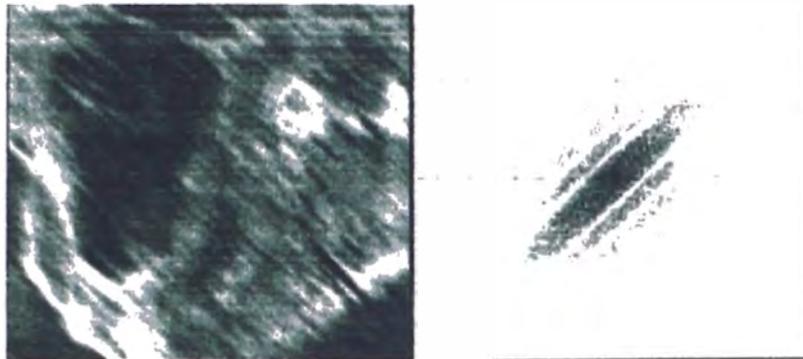


Figura 3.13. Foto aérea borrosa por el movimiento (izquierda) y su transformada en frecuencia a la derecha.

La figura 3.14. es el vector del borrón y su transformada y la figura 3.15. es el resultado (sin borrosidad) reconstruido.

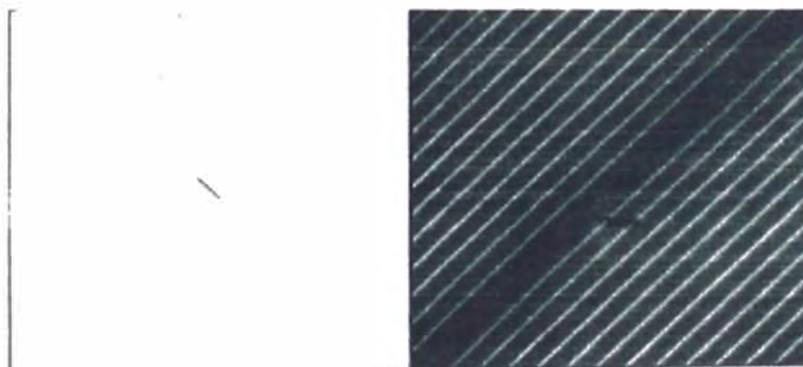


Figura 3.14: A la izquierda se muestra el vector del borrón de la figura 3.13 y a la derecha su transformada en frecuencia.

Es importante notar la similitud y la diferencia entre este ejemplo y el borrón fuera-de-foco eliminado . Ambos combinan la división de la transformada de la imagen borrosa por el defecto. Esto sigue directamente de la ecuación presentada por convolucion,

en la que la transformada de la imagen convolucionada es el producto de ésta por la imagen original y el defecto.

La mayor diferencia es que en el caso del borrón en movimiento podemos calcular el vector de borrosidad exacto a ser eliminado, mientras que en el caso del borrón fuera-de-foco nosotros debemos estimar el borrón desde una imagen actual. Esta estimación introduce ruido inevitable en la imagen, la cual es muy magnificada por la división. Usando una máscara filtro para limitar el rango de aplicación de las restricciones de la división la corrección para bajas frecuencias y la cantidad de la restauración es consecuentemente limitada. La mayor incertidumbre en los defectos introducidos por el sistema de imágenes, el menor grado de restauración posible.

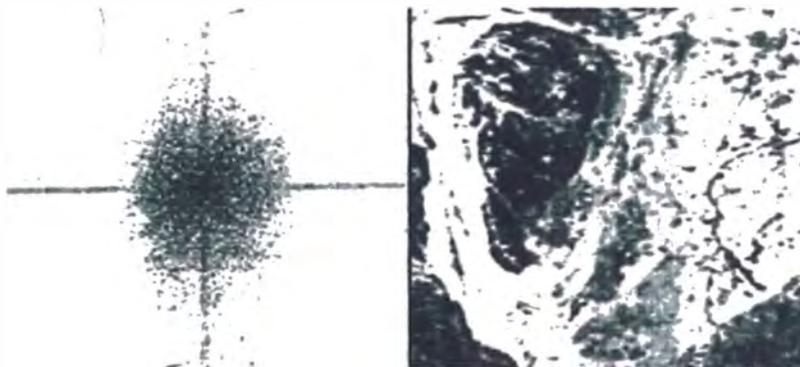


Figura 3.15: A la izquierda se muestra el resultado de dividir la transformada de la figura 3.13 por la de la figura 3.14 y a la derecha la retransformación.

Otras limitaciones aparecen desde la precisión interna finita en la computadora de la FFT o FHT y el almacenamiento de la transformada en frecuencia compleja de la imagen. Demasiado pequeña precisión también limita la habilidad para delinear las imágenes eliminando el borrón degradado debido al sistema de procesamiento de imagen.

□ Plantilla de correspondencia y correlación

Estrechamente relacionada con la aplicación en el dominio espacial del núcleo para allanamiento, etc. Esta la idea de la plantilla de correspondencia. En este caso, un patrón resaltado para cada ubicación en la imagen, los valores son multiplicados por los píxeles que están sobrecargados y el total es almacenado en esa posición para formar una imagen mostrando las regiones idénticas o similares al objetivo a ser localizado. La figura 3.16. ilustra este proceso.

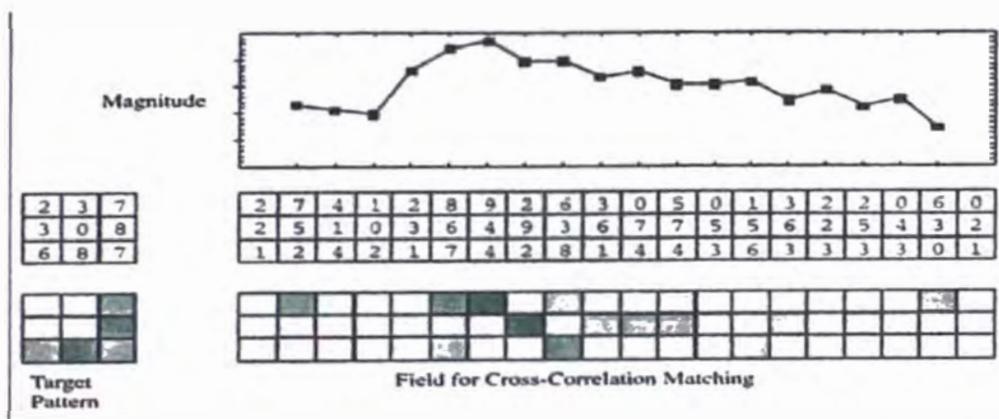


Figura 3.16: Diagrama de la plantilla de correspondencia . El objetivo patrón es resaltado en la imagen y el valor de la correlación cruzada en cada ubicación es registrado como luminancia o brillo.

Para funciones continuas bidimensionales, la correlación cruzada (“cross-correlation”) de la imagen es calculada como:

$$C(i, j) = \int \int f(x, y)g(x - i, y - j)dx dy \quad (3.7)$$

Reemplazamos las integrales por sumas finitas sobre las dimensiones de las imágenes dadas la expresión anterior. A fin de normalizar el resultado de esta plantilla de correspondencia o correlación sin los valores absolutos del brillo de la región de la imagen

polarizamos los resultados, la operación en el dominio espacial es usualmente calculada como la suma de los productos del brillo del pixels dividida por su media geométrica.

Sin embargo, la capacidad de nivelar las variaciones de brillo mediante la substracción de una imagen de fondo, obtenida ya sea por medición, ajuste matemático o procesamiento de imagen, no es un proceso libre de costo. La substracción utiliza parte del rango dinámico, o escala de grises, de la imagen. La figura 3.17 muestra un ejemplo. La imagen original tiene una variación de sombreado que puede ser ajustada bastante bien mediante una función cuadrática, pero esto tiene un alcance de cerca de la mitad del total de **256 niveles de gris**. Después de que la función ha sido substráida, la imagen regulada no tiene suficiente rango de brillo restante para mostrar los detalles en las áreas oscuras de algunos elementos de la imagen. Este recorte puede interferir con un posterior análisis de la imagen.

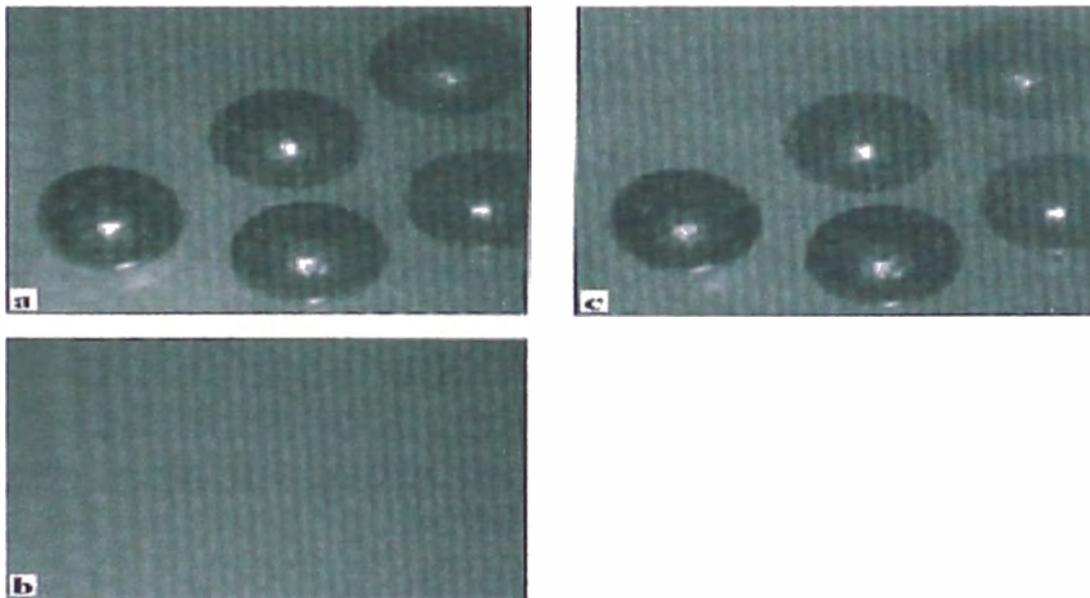


Figura 3.17: Efecto de nivelación en una imagen con limitado rango de escala en gris: a) Imagen original; b) Fondo polinomial ajustado (regulado); c) Sustrayendo la imagen “b” de la “a”. El fondo es ahora uniforme, pero las características en oscuro no lo son porque los píxeles originales estaban totalmente en la imagen original.

3.2.8. Sombreado de Color

Las imágenes a color presentan problemas significativos para la corrección del sombreado. Un ejemplo típico de una situación en que esto se presenta es en las imágenes aéreas o satelitales, en las que la irregularidad del terreno y la curvatura de la superficie del planeta produce un sombreado general. En algunos casos, esto afecta sólo la intensidad de la imagen y deja la información del color sin ser afectada. Pero dependiendo de la respuesta de la cámara, de la posible reflexión especular o debido a la textura de la superficie, absorción atmosférica y otros detalles del registro de imágenes, es más común encontrar que también hay desplazamientos de color entre áreas en la imagen que tienen diferente iluminación.

Los mismos métodos utilizados arriba para imágenes en escala de gris pueden ser aplicados al plano de intensidad de una imagen a color, pero usualmente no son apropiados para el uso con los planos de saturación y de tono (hue), y no son nunca útiles para la aplicación directa a los planos de rojo, verde y azul. Cuando son mal utilizadas de esta manera las operaciones producen desplazamientos de color en píxeles que alteran la imagen de manera tal que no se le puede dar nitidez apropiada, y en la mayoría de los casos ni siquiera se “ve” bien. Mientras que cada uno de los varios planos de color han sido alterados por los efectos de la geometría y otros factores, a una primera aproximación el efecto es el mismo a lo largo del espectro de colores. En ese caso, es apropiado usar proporciones de un plano de color a otro para nivelar los efectos de una orientación de superficie o iluminación no uniformes. Filtrando la imagen a color en diferentes longitudes de onda y luego dividiendo una por otra cancela algo de la no uniformidad y produce una imagen nivelada en la que características similares localizadas en diferentes áreas tienen la misma apariencia final.

La figura 3.18. muestra un ejemplo utilizando una imagen satelital de toda la Tierra. El oscurecimiento alrededor de los contornos del globo es debido principalmente al ángulo de observación, y en segundo lugar a los efectos de la absorción atmosférica. La ecualización por histogramas de los planos de color individuales incrementa el contraste entre características y mejora la visibilidad de las estructuras, pero los colores resultantes no son “reales” y no tienen ningún uso o significado intrínseco. Hay que notar en particular los colores rosa que aparecen en las nubes, y el verde en los océanos y a lo largo de los bordes de las nubes.

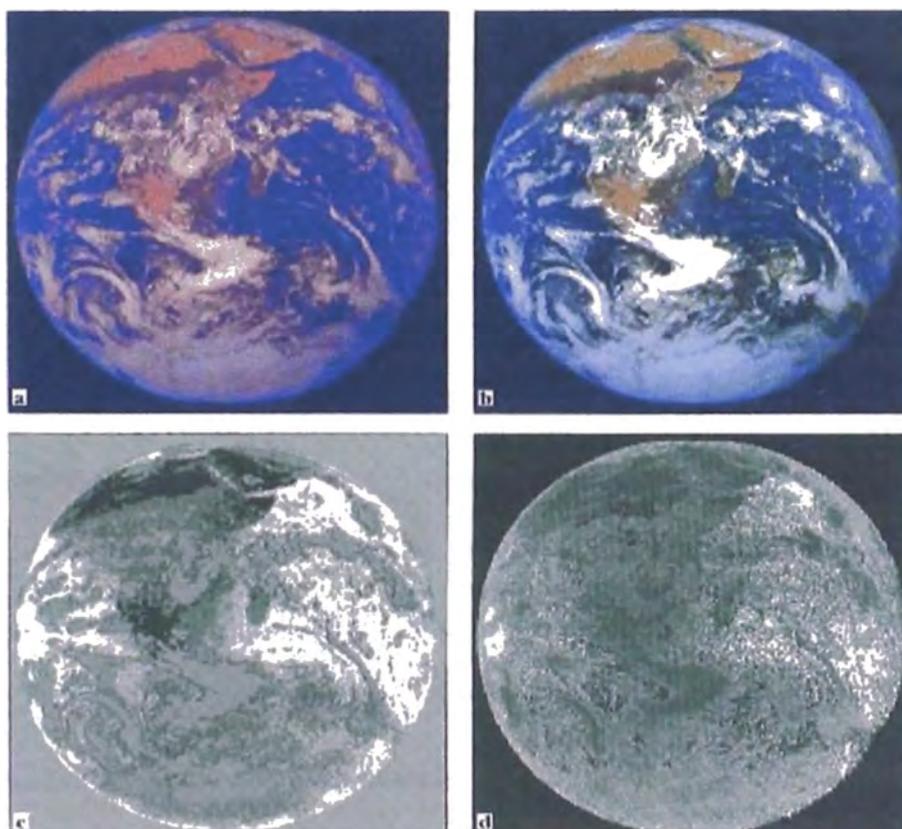


Figura 3.18: a) Original, b) Con el contraste incrementado por la ecualización del histograma de cada plano de color, c) Proporción de la imagen filtrada a 450 nm. (azul) a la de 650 nm (anaranjado), d) Proporción de la imagen filtrada a 700 nm. (rojo) a la de 550nm. (verde)

Separando la imagen en planos de color y estableciendo sus proporciones revela detalles finos y nivela el rango de contraste general. No produce una imagen del globo en que los píxeles cerca de los bordes tienen sus colores “corregidos” para ser similares a aquellos en el centro del campo de visión.

La corrección de colores de imágenes es un campo muy rico y complicado. Generalmente requiere conocimiento detallado de la fuente de luz y de la respuesta de la cámara, que deben ser obtenidos con estándares de calibración. La colorimetría precisa también requiere extrema estabilidad de todos los componentes. La colorimetría va más allá de las capacidades de propósito general de los sistemas de análisis y de procesamiento de imágenes, y no es considerada aquí en detalle. Sin embargo, hay un más frecuente interés en realizar algunos ajustes a las imágenes a color para permitir comparaciones entre regiones o imágenes, o para proporcionar algo de control sobre la consistencia en la impresión de imágenes a color.

Estos ajustes son conseguidos generalmente mediante la estandarización, al menos de un tipo relativo. Por ejemplo, la mayoría de las impresoras no puede reproducir toda la gama de colores mostradas en pantalla o capturados por una cámara. Para calibrar la relación entre la imagen mostrada y los dispositivos de entrada / salida, algunos sistemas crean un patrón de prueba que es impreso en la impresora del sistema, redigitalizada desde la salida de la impresora, y comparada con el original. Esta comparación permite al sistema construir una matriz de corrección interna para ajustar los colores de manera tal que la imagen mostrada y su reproducción sean lo más consistentes. También permite indicar aquellos colores que no pueden ser impresos con precisión con una impresora determinada. La corrección de desplazamientos de color, debidos por ejemplo a un cambio conocido en las condiciones de iluminación, también es posible. La adquisición de una imagen desde

una tarjeta de prueba bajo cada una de varias condiciones permite a la computadora construir una matriz de correcciones que pueden ser expresadas internamente como componentes RGB o HSI(*). Estos son multiplicados por la señal entrante para corregir aproximadamente según el cambio en iluminación.

3.2.9. Vistas No Planares

Las gráficas por computadora tienen mucho que ver con los métodos para mostrar superficies de objetos tridimensionales obtenidas de una serie de retazos de imágenes bidimensionales, o mediante métodos directos de procesamiento de imágenes en 3D, como una tomografía.

Un uso particular de los gráficos en computadora que muchos de nosotros da por sentado puede ser visto cada tarde en los programas locales de noticias. La mayoría de las estaciones de TV en los Estados Unidos tienen un sistema de predicción del clima que utiliza imágenes satelitales del satélite GOES. Estas imágenes muestran los Estados Unidos tal como se ve desde la latitud 0, longitud 108 Oeste (el satélite es desplazado 98°Oeste en verano para obtener una mejor vista de los huracanes desarrollándose en el Atlántico sur), a una elevación geosincrónica de aproximadamente 22000 millas.

Esta imagen muestra patrones de nubes, y una serie de imágenes tomadas durante el día muestra movimientos de tormentas y otros sistemas climáticos. En estas imágenes, la línea costera, los Grandes Lagos y otras pocas características topográficas son evidentes, pero pueden ser parcialmente obscurecidas por las nubes. Dado el conocimiento geográfico de un ciudadano promedio, esa imagen no ayudaría a la mayoría de los observadores a reconocer su localización.

(*) Siglas de Hue, Saturation and Intensity: Tono (matiz), saturación e intensidad

Por lo tanto los gráficos computarizados son utilizados para superponer líneas de demarcación política, tales como límites entre estados y quizá otra información como ciudades, para ayudar al observador. La mayoría de las estaciones de TV en Estados Unidos realizan grandes inversiones en gráficos computarizados para publicidad, noticias, etc. pero raramente generan estas imágenes ellos mismos, en lugar de ello obtienen las imágenes con las líneas ya presentes de una compañía especializada.

¿Cómo se generan estas líneas? No se trata simplemente de hacer coincidir un mapa tradicional, digamos una proyección Mercator como las usadas en las escuelas, con una imagen satelital. La curvatura de la Tierra y el consiguiente acortamiento de la imagen tienen que ser tomadas en cuenta. Por ejemplo, la figura 3.19 muestra un ejemplo del difundido uso de estas imágenes



Figura 3.19: Pronóstico del tiempo en televisión usando la imagen satelital del tiempo GOES. El satélite está ubicado en el Ecuador y por lo tanto muestra los EE.UU. en una vista escorzada. Existe también una evidente curvatura de oeste a este. Las líneas fronterizas están sobrepuestas por gráficos computarizados como se trató anteriormente.

La figura 3.20 muestra una imagen de América del Norte del satélite climático GOES que está claramente acortada en la parte superior, y también muestra una curvatura perceptible de oeste a este a lo ancho de Estados Unidos.

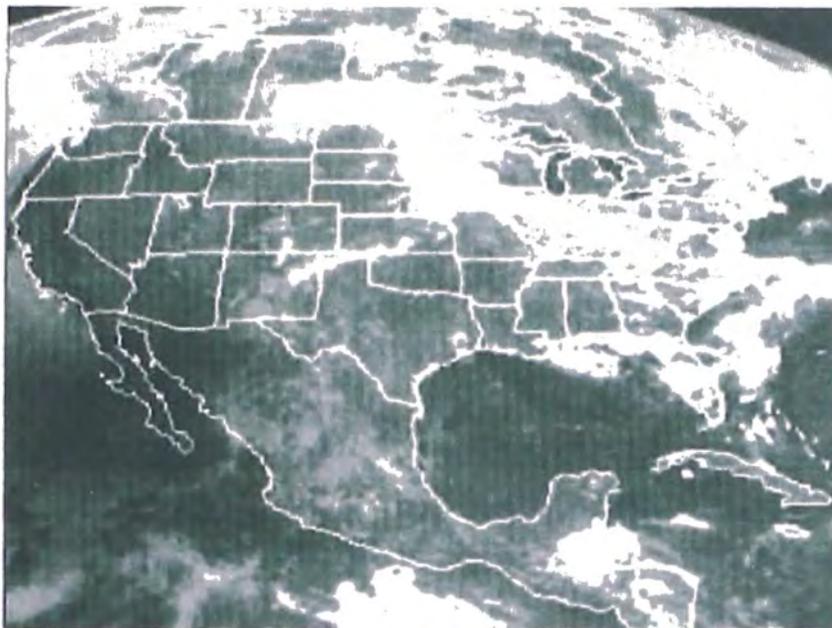


Figura 3.20: GOES-7. Imagen de América del Norte con líneas fronterizas sobrepuestas. El área oscura justo al oeste de Baja California es la sombra de la Luna, durante el eclipse del 11 de junio de 1991.

Las coordenadas, en latitud y longitud, de los puntos en la superficie de la Tierra son utilizadas para calcular una vista en perspectiva del globo tal como es visto desde el satélite. Dado que el punto de observación es constante, este es un cálculo de una sola vez, que sin embargo necesita ser efectuado para un gran número de puntos para construir buenos mapas de demarcación. Este cálculo puede ser observado en el diagrama de la figura 3.21.

La localización de un punto en la Tierra esférica (especificado por su latitud y longitud) se utiliza para determinar la intersección de una línea de visión al satélite con un plano de imagen llana, insertada en frente de la esfera.

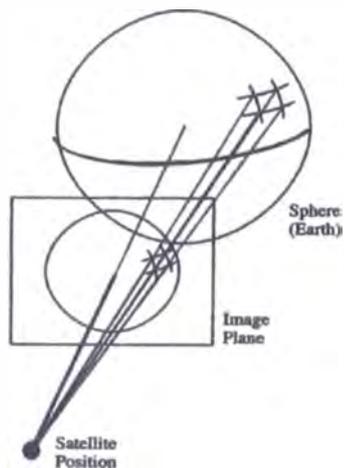


Figura 3.21: Diagrama de la representación de imágenes satelitales. Como en cualquier perspectiva geométrica, la imagen plana es formada por medio de la proyección de líneas vistas desde el objeto tridimensional hasta el punto de vista y la construcción de la imagen desde los puntos en los cuales intersectan el plano de imagen.

Este cálculo requiere sólo de simple trigonometría como se indica en la figura 3.22.

Las coordenadas de los puntos en ese plano son las localizaciones de los puntos en la imagen observada. Como se muestra, un cuadrado en el suelo es visto como un trapecioide oblicuo, y si el cuadrado es suficientemente grande sus lados son notablemente curvos.

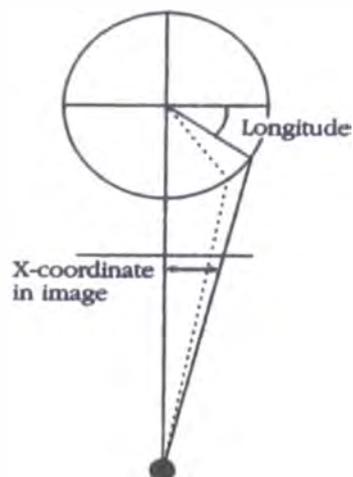


Figura 3.22: La trigonometría simple puede ser usada para calcular la ubicación de puntos en el plano de imagen desde la longitud del punto en la tierra y la ubicación del satélite. Esta es la vista desde el Polo Norte. Una vista similar desde el Ecuador da la coordenada "y".

□ Gráficos Computarizados

Los gráficos computarizados se usan igualmente para construir dibujos en perspectivas de objetos tridimensionales de manera que puedan ser vistos en la pantalla del computador, por ejemplo en programas CAD (programas de diseño asistido por computadora). El proceso de observación igual que el que acabamos de describir, con la adición de control de perspectiva que permite al usuario ajustar la distancia aparente de la cámara o punto de vista para así controlar el grado de acortamiento que ocurre (equivalente a escoger un lente de longitud focal largo o corto para una cámara; el lente de longitud focal corta produce mayor distorsión en la imagen).

Desestimando por el momento la distorsión de la perspectiva (por ejemplo, usando una lente de telefoto), podemos representar la traslación de un punto en tres dimensiones por multiplicación matricial de sus coordenadas x, y, z por un conjunto de valores que describan rotación y traslación. Es más fácil examinar esto con mayor detalle en dos dimensiones, dado que nuestro interés principal aquí es con imágenes bidimensionales. Considere un punto con coordenadas cartesianas X, Y y cómo éste se mueve cuando lo desplazamos o rotamos, y los otros puntos en el objeto con respecto a este sistema de coordenadas.

Por simple geometría sabemos que una traslación de un objeto simplemente añade desplazamientos a X y a Y para producir

$$X' = X + \Delta X \quad (3.8)$$

$$Y' = Y + \Delta Y \quad (3.9)$$

mientras que extender el objeto requiere coeficientes multiplicativos que no pueden ser los mismos :

$$X' = \alpha X \quad (3.10)$$

$$Y' = \beta Y \quad (3.11)$$

y la rotación de un objeto un ángulo de θ grados introduce una interdependencia entre las coordenadas X, Y originales de la forma :

$$X' = X + Y \operatorname{sen} \theta \quad (3.12)$$

$$Y' = Y - X \operatorname{cos} \theta \quad (3.13)$$

En general, la notación para traslaciones bidimensionales se escribe comúnmente usando las llamadas coordenadas homogéneas y notación matricial. Las coordenadas X,Y se combinan en un vector junto con una constante arbitraria 1 para permitir que los valores de traslación sean incorporadas al cálculo matricial, produciendo el resultado :

$$[X'Y'1] = [XY1] \begin{bmatrix} a & b & 0 \\ c & d & 0 \\ e & f & 1 \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

que resulta en:

$$X' = aX + cY + e \quad (3.15)$$

$$Y' = bX + dY + f \quad (3.16)$$

Comparando la forma matricial con los ejemplos de arriba, vemos que los términos e y f son los valores de desplazamiento traslacional. Los valores diagonales a y d son los coeficientes de extensión, mientras que b y c son los términos de seno y coseno involucrados en la rotación. Cuando se combina una serie de transformaciones, incluyendo traslación, rotación y extensión, se produce una serie de matrices que pueden ser multiplicadas entre sí. Cuando esto sucede, por ejemplo, para producir la rotación de un punto distinto del origen, o para combinar la extensión no uniforme con rotación, los términos individuales se combinan en formas que complican su interpretación simple. Sin embargo, sólo se necesitan los mismos seis coeficientes.

Si sólo estos términos son utilizados no podemos producir curvatura o torsión de los objetos. Introduciendo términos de mayor orden, es posible una torsión y extensión de mayor complejidad. Esto produciría una ecuación más compleja de la forma:

$$X^2 = a_1 + a_2X + a_3Y + a_4XY + a_5X^2 + a_6Y^2 + \dots \quad (3.17)$$

y una relación similar para Y^2 . No hay razón fundamental para limitar esta extensión polinomial a una potencia máxima en particular, excepto que a medida que la complejidad aumenta el número necesario de coeficientes se eleva (y la dificultad de calcularlos), y la precisión matemática necesaria para aplicar la transformación se incrementa. Es inusual tener términos más allá de la segunda potencia, que es suficiente para manejar los casos más comúnmente encontrados de distorsión e incluso para aproximar la curvatura producida al mirar una superficie esférica, al menos sobre un pequeño intervalo de ángulos.

Por supuesto, algunos mapeos de superficie son mejor manejados por otras funciones. La proyección estándar de Mercator la esfera terrestre en un cilindro de la

figura 3.23 envía los polos al infinito y amplía grandemente las áreas de las altas latitudes. Se requerirían muchos términos polinomiales para aproximarla, pero dado que se conoce la geometría del mapeado, es fácil utilizar la función cosecante que realice eficientemente la transformación.

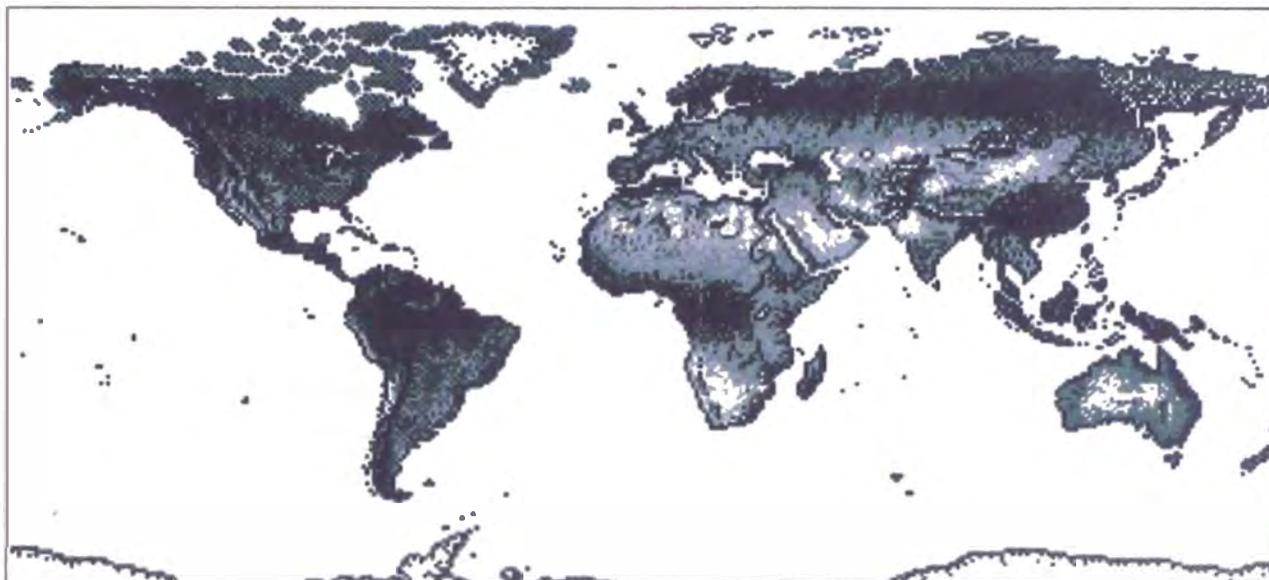


Figura 3.23. La proyección estándar Mercator de la Tierra usada en los mapas proyecta los puntos en la esfera dentro de un cilindro, produciendo distorsión en las altas latitudes.

□ Distorsión Geométrica

Ahora debemos examinar qué hacer con estas operaciones matemáticas. Se obtienen con frecuencia imágenes que no son de superficies planas vistas normalmente. El ejemplo de la imagen satelital utilizado arriba es un caso obvio. Si la superficie no es plana, diferentes regiones pueden ser inclinadas en ángulos arbitrarios, o puede presentarse curvatura continua. Esta distorsión se vuelve importante si queremos realizar cualquier medición de comparación en la misma imagen o entre imágenes. Muchas cámaras y radares aéreos introducen una distorsión predecible (por tanto corregible) debido al uso de un patrón móvil o de exploración lateral, o mediante la proyección de una única línea en una

película que se desplaza continuamente. En todos estos casos, conocer la distorsión es la clave para corregirla.

Hacer mapas en base imágenes aéreas o satelitales es una aplicación (Thompson, 1966). Por supuesto, no existe una proyección perfecta de una superficie esférica en una plana, de manera que son empleadas varias aproximaciones y convenciones útiles. Pero en cada caso, hay una relación conocida entre las coordenadas del globo y aquellas en el mapa que puede ser expresada matemáticamente. ¿Pero qué pasa con la imagen? Si el punto de observación es conocido con exactitud, como en el caso del satélite climático, o puede ser calculado para el momento de exposición, como en el caso de la sonda espacial pasando por un planeta, entonces la misma clase de relación matemática puede ser determinada.

Este procedimiento es usualmente impráctico para fotografías aéreas, ya que la posición del avión no está tan precisamente controlada. La alternativa es localizar unos cuantos puntos de referencia en la imagen cuyas localizaciones en el globo o en el mapa sean conocidas, y utilizarlas para determinar las ecuaciones que relacionan la posición en la imagen con la localización en el mapa. Esta técnica se conoce generalmente como Image Warping o Rubber Sheeting y mientras que las ecuaciones son las mismas que las usadas en gráficos computarizados, las técnicas para determinar los coeficientes son muy diferentes.

Hemos visto que un par de ecuaciones que permitan calcular las coordenadas X', Y' para una vista transformada de las coordenadas originales X, Y puede incluir constantes, términos lineales en X y en Y , más términos de mayor orden como XY, X^2 , etc. La adición de más términos de mayor orden hace posible introducir distorsiones más complejas en la transformación. Si el problema es simplemente uno de rotación, sólo son necesarios términos lineales, y una restricción en los coeficientes puede ser introducida para preservar los ángulos. En términos de la matriz simple mostrada arriba, esto requeriría

que los dos coeficientes de extensión a y d deben ser iguales. Esto quiere decir que sólo se necesitan unas pocas constantes, y pueden ser determinadas localizando unos pocos puntos de referencia conocidos y estableciendo ecuaciones simultáneas.

Extensión más elaborada para alinear imágenes entre sí o con un mapa requiere evidentemente más términos y más puntos. En imágenes de superficies localmente planas, pero orientadas a un determinado ángulo con respecto al punto de visualización, la distorsión es esencialmente trapezoidal como se muestra en la figura 3.24. La porción de la superficie que está más cerca al lente es ampliada más que las regiones más alejadas, y las distancias se acortan en la dirección de la inclinación. Para medir y comparar las características en estas superficies, o inclusive para aplicar apropiadamente métodos de procesamiento de imágenes (que generalmente asumen que los píxeles vecinos en varias direcciones están a igual distancia del centro), puede ser necesario transformar esta imagen para corregir la distorsión. Ya que el ángulo de inclinación y la distancia exactas pueden no ser conocidos, será necesario un método que utilice sólo puntos de referencia dentro de la imagen en sí.

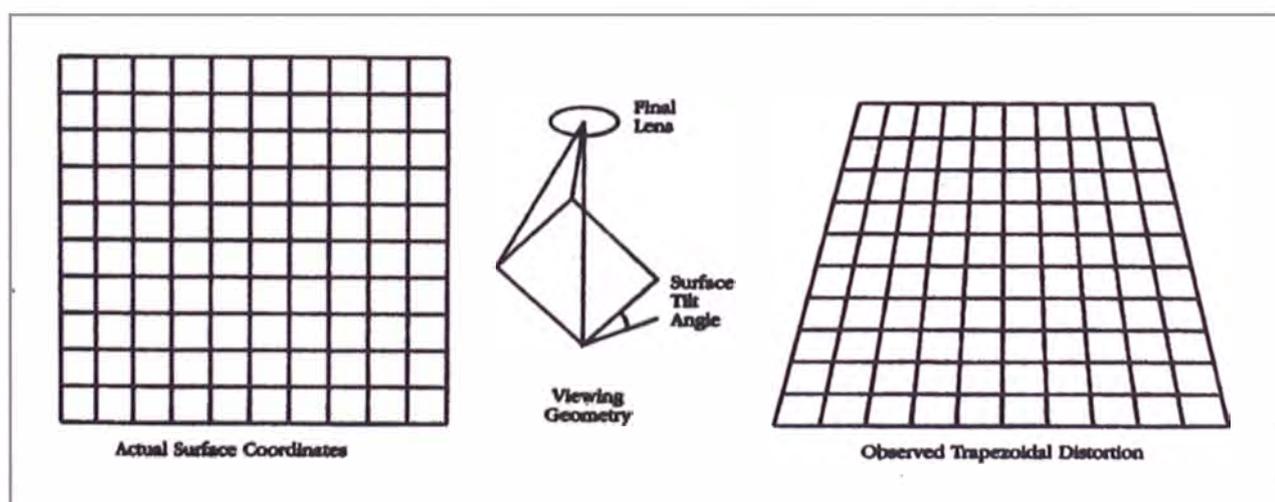


Figura 3.24. Distorsión trapezoidal comúnmente encontrada, debido a la observación de una superficie inclinada con un lente de corta longitud focal.

Todo lo que se requiere aquí es la capacidad de identificar cuatro puntos cuyas coordenadas X, Y reales en la superficie sean conocidas y cuyas coordenadas de imagen X', Y' puedan ser medidas. Luego se escriben las siguientes ecuaciones :

$$X = a_1 + a_2X' + a_3Y' + a_4X'Y' \quad (3.18)$$

$$Y = b_1 + b_2X' + b_3Y' + b_4X'Y' \quad (3.19)$$

para cada uno de los cuatro conjuntos de coordenadas. Esto permite la resolución de las constantes a_i y b_i . Como es lógico, si se dispone de más puntos, pueden ser utilizados para obtener una solución de mínimos cuadrados que minimice el efecto de los pequeños errores inevitables en la medición de coordenadas en la imagen.

Limitando la ecuación a aquellos términos necesarios para obtener la **rotación y extensión** involucradas en la distorsión trapezoidal que esperamos que esté presente, minimizamos el número de puntos requeridos para el ajuste. Se requiere más que los tres términos mostrados arriba en la ecuaciones, porque los ángulos no se conservan en este tipo de acortamiento. Pero se prefiere usar la menor cantidad posible de términos a una ecuación general que involucre muchos términos de orden mayor, tanto en términos de eficiencia del cálculo (número de puntos de referencia) como en términos de la precisión de los coeficientes.

De manera similar, si sabemos que la distorsión en la imagen es la producida por observar una esfera, los términos seno y coseno apropiados pueden ser usados en las ecuaciones de ajuste. Lógicamente, si no tenemos conocimiento independiente acerca de la forma de la superficie o el tipo de distorsión de la imagen, entonces los polinomios arbitrarios representan con frecuencia la única aproximación práctica.

□ **Alineación**

Otra situación bastantes común es la **alineación de imágenes de sección seriales**. En este caso usualmente no existe una “verdad establecida” con la que alinear, sino sólo un alineamiento relativo entre fragmentos de imagen sucesivos. Tanto usando características dentro de la imagen que puedan ser reconocidas en dos fragmentos sucesivos, como introduciendo marcas fiduciales tales como agujeros perforados a través del bloque espécimen antes de que las secciones sean cortadas, esta alineación puede ser realizada. Los puntos pueden ser localizados manualmente por el usuario, o automáticamente por el sistema de procesamiento de imágenes, aunque este último método funciona mejor para marcas artificiales tales como agujeros y algo pobremente cuando se intenta utilizar detalles dentro de la imagen que se corresponden sólo de una manera imperfecta de una sección a la siguiente.

Esta clase de deformación puede ser realizada para alinear imágenes con otras imágenes, como en la reconstrucción de secciones seriales, o para alinear imágenes a lo largo de sus bordes para permitir su ensamble a manera de mosaico (Milgram, 1975). La alineación de las secciones adyacentes de un mosaico es intentada con frecuencia pero falla debido a la distorsión trapezoidal de la que se habló anteriormente. El resultado es que las características a lo largo de los límites de la imagen no se alinean bien, y el mosaico es imperfecto. El uso de ‘rubber sheeting’ puede corregir este defecto.

Esta corrección se realiza rutinariamente para fotografías satelitales y de sondas espaciales. La figura 3.25 muestra un ejemplo de una imagen mosaico construida a partir de múltiples imágenes tomadas en órbita de la superficie de Marte. Los límites entre imágenes son visibles debido a diferencias en brillo causadas por variaciones en iluminación o exposición, pero las características se alinean bien a través de las comisuras. Cuando las

imágenes están siendo alineadas, es posible escribir las ecuaciones tanto en términos de las coordenadas en la imagen original como una función de la imagen geoméricamente corregida, o viceversa. En la práctica, es usualmente preferible usar la rejilla de coordenadas x,y en la imagen corregida que hacer el cálculo para cada una de las coordenadas en la imagen original y realizar los cálculos en términos de direcciones reales de píxeles.

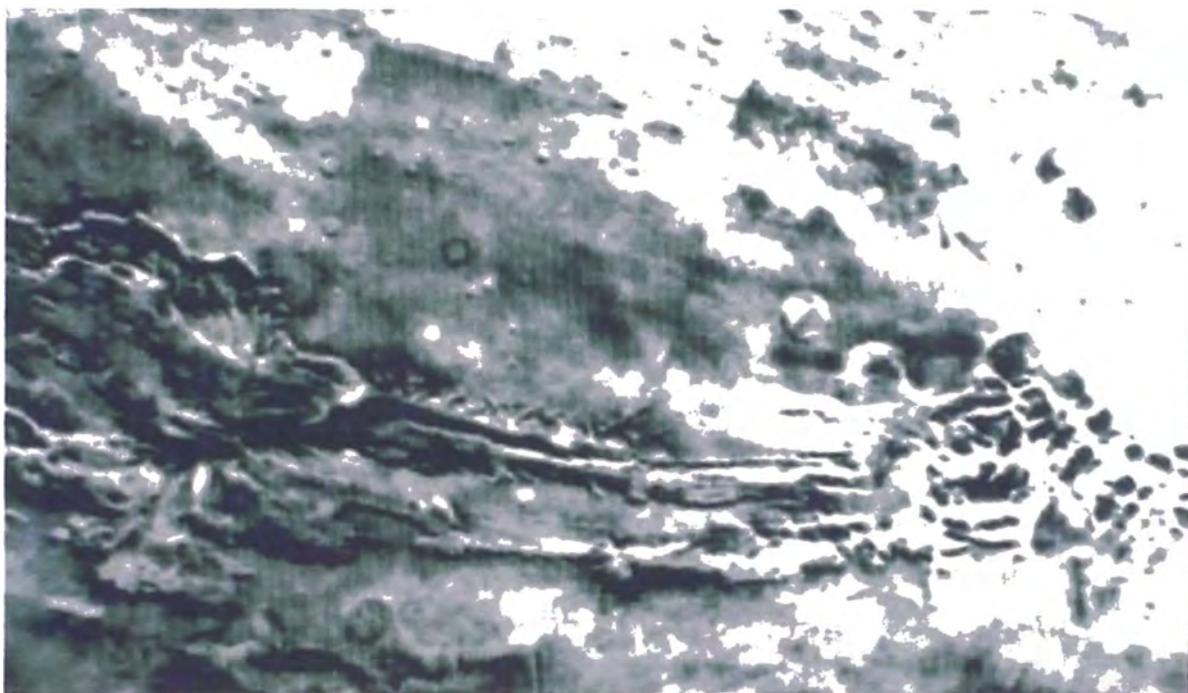


Figura 3.25: Imagen de mosaico de los Valles Marineris en Marte reunida de las imágenes satelitales.

Desafortunadamente, estas coordenadas calculadas para la localización original raramente serán números enteros. Esto significa que la localización yace “entre” los píxeles en la imagen original. Son utilizados diversos métodos para tratar este problema. El método más simple es truncar los valores calculados de manera que la parte fraccionaria de la dirección sea descartada y el píxel que se encuentre hacia el origen del sistema de coordenadas sea utilizado. Se obtiene un resultado ligeramente mejor redondeando los

valores de dirección para seleccionar el píxel más cercano, cuyo brillo es entonces copiado al arreglo de la imagen transformada.

Cuando esta distorsión es inaceptable, otro método puede ser utilizado que requiere más cálculo. El valor de brillo para el píxel transformado puede ser calculado por interpolación entre cuatro píxeles que rodeen la dirección calculada. Esto se denomina **interpolación bilineal**, y es calculada simplemente de la parte fraccionaria de las coordenadas X e Y. Primero la interpolación es hecha en una dirección, y luego en la otra, como se indica en la figura 3.26.

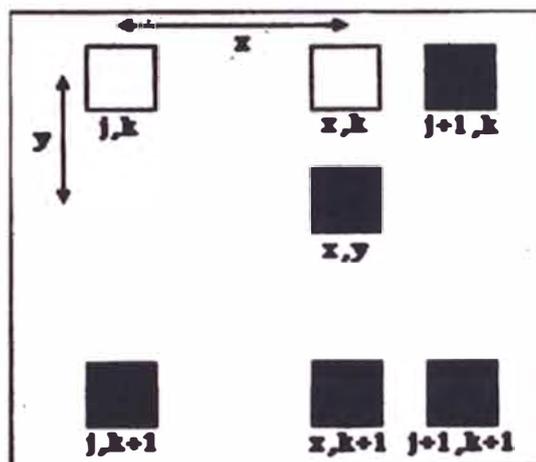


Figura 3.26: Diagrama de interpolación de píxel. Los valores de brillo de los vecinos son primero interpolados horizontalmente y luego estos dos valores son interpolados verticalmente usando la parte fraccionaria de las direcciones del píxel.

Para una localización con coordenadas $j+x$, $k+y$ donde x e y son la parte fraccionaria de la dirección, las ecuaciones para la primera interpolación son

$$B_{j+x,k} = (1-x) \cdot B_{j,k} + x \cdot B_{j+1,k} \quad (3.20)$$

$$B_{j+x,k+1} = (1-x) \cdot B_{j,k+1} + x \cdot B_{j+1,k+1} \quad (3.21)$$

y luego la segunda interpolación, en la dirección de y , proporciona el valor final :

$$B_{j+x,k+y} = (1-y) \cdot B_{j+x,k} + y \cdot B_{j+x,k+1} \quad (3.22)$$

Las interpolaciones ponderadas sobre regiones extensas también son utilizadas en algunos casos. Una de las más populares es el ajuste bicúbico. Mientras que la interpolación bilineal usa un arreglo de 2×2 de valores de píxeles colindantes para calcular el valor interpolado, el método cúbico usa un arreglo de 4×4 . Utilizando la misma notación que la interpolación bilineal en las ecuaciones 3.20 y 3.21, las sumas ahora van desde $k-1$ hasta $k+2$ y desde $j-1$ hasta $j+2$. Los valores intermedios de la interpolación horizontal son:

$$B_{j+x,k} = (1/6)(B_{j-1,k} \cdot R_1 + B_{j+x,k} \cdot R_2 + B_{j+1,k} \cdot R_3 + B_{j+2,k} \cdot R_4) \quad (3.23)$$

y la interpolación en la dirección vertical es

$$B_{j+x,k} = (1/6) (B_{j+x,k-1} \cdot R_1 + B_{j+x,k} \cdot R_2 + B_{j+x,k+1} \cdot R_3 + B_{j+x,k+2} \cdot R_4) \quad (3.24)$$

donde los factores de ponderación R_i se calculan a partir de la parte real (x ó y respectivamente) de la dirección como :

$$R_1 = (3+x)^3 - 4 \cdot (2+x)^3 + 6 \cdot (1+x)^3 - 4 \cdot x^3 \quad (3.25)$$

$$R_2 = (2+x)^3 - 4 \cdot (1+x)^3 + 6 \cdot x^3 \quad (3.26)$$

$$R_3 = (1+x)^3 - 4 \cdot x^3 \quad (3.27)$$

$$R_4 = x^3 \quad (3.28)$$

El ajuste bicúbico es más isotrópico que el método bilineal. La interpolación siempre tiene el efecto de suavizar la imagen y de remover información de alta frecuencia, pero minimiza el aliasing o “stair-stepping” a lo largo de las líneas y contornos.

La Figura 3.27 muestra el resultado de rotar una línea (originalmente una línea vertical negra de un píxel de ancho) diecisiete grados sin ninguna interpolación. El aliasing con el método del píxel vecino más próximo es evidente. La interpolación bilineal reduce el contraste de la línea más que el método bicúbico, y ambos asignan valores de gris a píxeles adyacentes para suavizar la apariencia de la línea.

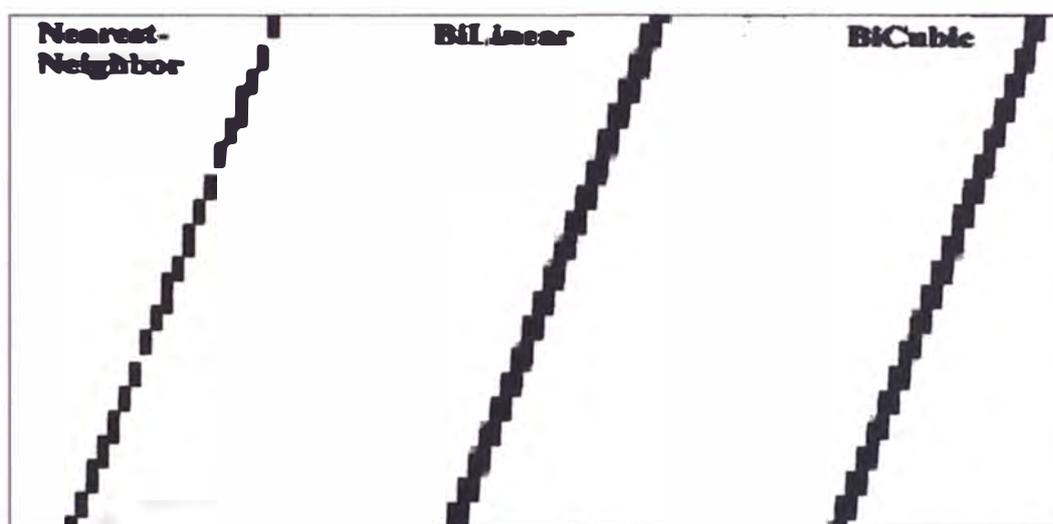


Figura 3.27: Efecto de la rotación de una línea negra de un píxel de ancho usando la interpolación bilineal y bicúbica del vecino mas cercano.

La ventaja de la interpolación es que las dimensiones son alteradas lo menos posible en la transformación, y en particular los bordes y otras líneas no se inclinan ni se distorsionan. De hecho, en gráficos computarizados se utiliza a veces este método para dibujar líneas en monitores CRT de manera que el stair-stepping inherente al trazado de líneas en un arreglo discreto de píxeles sea evitado. La técnica es denominada anti-aliasing

y produce líneas cuyos píxeles tienen valores de gris según cuán cerca se encuentren de la localización matemática de la línea. Esto induce al observador a percibir una línea lisa.

Para Image Warping o Rubber-Sheeting, la interpolación tiene la ventaja de que las dimensiones se conservan. Sin embargo, los valores de brillo no lo son. Con el método del píxel más cercano obtenido mediante el redondeo de las direcciones de píxeles, las dimensiones se distorsionan pero se conservan los valores de brillo. La elección del método apropiado para una tarea particular de procesamiento de imágenes depende principalmente de qué clase de información es más importante, y en segundo lugar del esfuerzo computacional adicional requerido para la interpolación.

3.2.10. Morphing ('metamorfosis')

Los programas que pueden realizar 'Image Warping' controlado según relaciones matemáticamente definidas, o calcular esas matrices de valores a partir de un conjunto de marcas fiduciales o de referencia identificadas que se aplican a la imagen entera son generalmente muy especializados. Pero toda una clase de programas a nivel de consumidor se ha vuelto disponible para realizar Morphing (metamorfosis) de imágenes basado en una red de puntos de control definidos por el usuario. Los puntos se colocan generalmente en localizaciones correspondientes que son distintivas en las dos imágenes.

El programa usa los puntos para formar una teselación (división) de la primera imagen en triángulos (técnicamente, la elección de qué puntos usar como esquinas para los triángulos está definida por un procedimiento llamado teselación Voronoi). Cada triángulo es uniformemente extendido para ajustarse a la localización de los vértices en la segunda imagen. Dado que los lados de los triángulos son extendidos uniformemente, los puntos a

lo largo de los bordes de triángulos adyacentes no están desplazados entre sí, aunque las líneas pueden torcerse al cruzar los bordes.

Con una red de triángulos y la extensión lineal de cada triángulo, las líneas que cruzan los bordes de los triángulos serán continuas, pero se inclinarán de manera aguda. Utilizando ecuaciones de cuña ('spline') o cúbicas para controlar la extensión se da una mejor apariencia al suavizar las curvas, pero esto no es una indicación necesaria de que las dimensiones se conservan o de que puedan realizarse mediciones en tales imágenes.

El arte de usar estos programas de Morphing reside principalmente en la utilización de suficientes puntos de control, y en su cuidadosa colocación. Esto es especialmente cierto cuando se crea una secuencia de imágenes con movimiento progresivo de los puntos de control desde su posición inicial hasta su posición final. Estas películas de Morphing muestran una imagen transformándose gradualmente en la segunda.

La capacidad de utilizar Morphing para alinear imágenes de diferentes objetos y producir imágenes visualmente convincentes puede ser una herramienta poderosa para comunicar resultados a otros. Este procedimiento puede ser útil para mostrar la similitud entre dos objetos, pero es extraordinariamente susceptible al mal uso, al producir una coincidencia aparente entre diferentes imágenes que en realidad no son las mismas.

Las figuras 3.28 (a,b,c) muestran un ejemplo de Morphing para realizar la alineación de una imagen de satélite climático con un mapa climático de proyección Mercator. El proceso de alineación fue llevado a cabo localizando aproximadamente 30 puntos en cada imagen, creando una teselación de triángulos entre los puntos, y utilizándolos para controlar la distorsión de una imagen para que coincida con la otra.

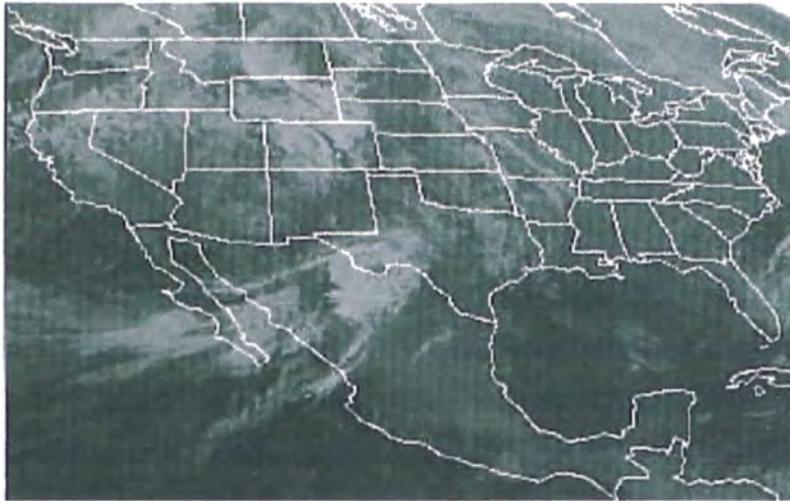


Figura 3.28.a: Imagen satelital correspondiente al mapa del tiempo a las 9:00 GMT del 20 de febrero de 1994. Modificando la imagen satelital para encajar el mapa de proyección del Mercator produce una película continua la cual se muestra en el cuadro.

El Morphing original es una película continua que extiende la imagen satelital en algunas áreas y direcciones mientras que la contrae en otras, hasta que se alinee con el mapa. Una imagen a medio camino del proceso se muestra en la figura 3.28.b.



Figura 3.28.b: Nótese que las líneas están suavemente ajustadas, sin agudas inclinaciones u otros artificios visuales.



Figura 3.28.c: Resultado de la metamorfosis

3.2.11. Operadores de textura

Muchas imágenes contienen regiones caracterizadas por poca variación de brillo que se denomina textura. Un estimador de textura es la varianza en la vecindad de la región. Esta es la suma de los cuadrados de las diferencias entre el brillo del píxel central y sus vecinos. Debido a que el valor puede llegar a ser bastante grande, el resultado es algunas veces visualizado como la raíz cuadrada de esta diferencia. Si la suma de cuadrados es primero normalizada dividiendo el número de píxeles en la vecindad, esto es sólo la diferencia de valores de la raíz media de los cuadrados (RMS – Root Mean Square) y corresponde a una medida RMS similar de rugosidad para superficies.

Como el rango, la varianza también corresponde a la variación de píxeles en la región. Es menos sensible a los valores individuales de píxeles extremos y produce una imagen con menos ruido que el operador de rango. Como el operador de rango, la varianza también responde a los límites entre regiones de diferente brillantez y es algunas veces usada como un detector de bordes.

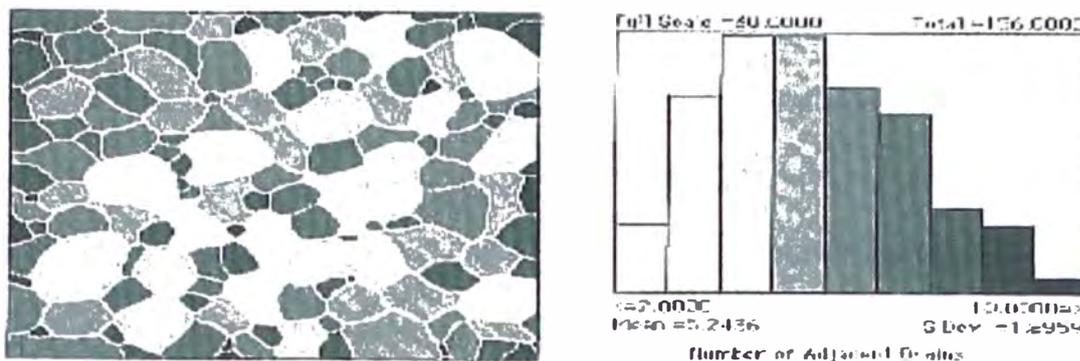


Figura 3.29: Las partículas de la figura codificada en la escala de grises muestra el número de vecinos tocantes a cada uno y un trazo de la frecuencia de cada número de vecinos. Además el análisis muestra que ambos, el tamaño y el número de vecinos graficados son diferentes para las dos diferentes fases.

Las imágenes satelitales son especialmente apropiadas para la caracterización mediante operadores de textura. La categorización de cultivos, construcción y otros usos de tierra produce texturas distintivas que los humanos pueden reconocer. Por lo tanto, se han buscado métodos que **duplican esta capacidad** en algoritmos de software. En un estudio clásico en la materia, Haralik hizo una lista de 14 de tales operadores de textura que utilizan los píxeles dentro de una región y sus diferencias de brillo. Esta región no es una vecindad alrededor de cada píxel, pero comprende todos los píxeles dentro de un bloque contiguo delineado por algún límite u otro criterio de identificación, tal como el brillo, etc. Se construye una tabla con el número de pares de píxeles adyacentes dentro de la región como una función de sus brillos. Esta tabla de píxeles es usada luego para calcular los parámetros de textura.

En la expresión abajo, el arreglo $P(i,j)$ contiene el número de pares de píxeles vecinos más cercanos (sólo en direcciones de 90 grados) cuyos brillos son i, j respectivamente. R es una constante de renormalización igual al número total de pares de píxeles en la imagen o cualquier porción rectangular usada para el cálculo. En principio,

esto puede ser extendido a pares de píxeles que están separados por una distancia d y a pares alineados en una dirección de 45 grados (cuya distancia de separación es mayor que las direcciones en los 90 grados). Las sumas totales se llevan a cabo para todos los pares de píxeles en la región. Haralik aplicó esto a regiones rectangulares, pero es igualmente aplicable a píxeles dentro de contornos irregulares.

El primer parámetro mostrado es una **medida de homogeneidad** usando un segundo momento. Dado que los términos están elevados a la segunda potencia, unas pocas grandes diferencias contribuirán más que muchas pequeñas diferencias. El segundo parámetro mostrado es un **momento de diferencia**, el cual es una medida del contraste en la imagen. El tercero es una **medida de la dependencia lineal** del brillo en la imagen, obtenido por correlación.

$$f_1 = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \left(\frac{P(i,j)}{R} \right)^2 \quad (3.29)$$

$$f_2 = \sum_{n=0}^{N-1} n^2 \left\{ \sum_{i-j=n} \left(\frac{P(i,j)}{R} \right) \right\} \quad (3.30)$$

$$f_3 = \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \{i \cdot j \cdot P(i,j) / R\} - \mu_x \mu_y}{\sigma_x \sigma_y} \quad (3.31)$$

En estas expresiones, N es el número de niveles de gris; μ y σ son la media y desviación estándar respectivamente, de las distribuciones de los valores de brillo

acumulados en las direcciones x e y . **Parámetros adicionales** describen la varianza, la entropía y medida de información de las correlaciones del valor de brillo. Haralik ha mostrado que cuando se aplican a grandes áreas rectangulares en fotos satelitales, estos parámetros pueden distinguir el agua de la pradera, entre diferentes clases de suelos arenosos, los de los pantanos o regiones urbanas.

Algunas de estas operaciones son obviamente más fáciles que otras para calcular todos los píxeles en una imagen. Los valores resultantes pueden ser escalados para crear una imagen derivada útil que pueda ser discriminada con ajuste de brillo. En cualquier instancia dada, esto requiere algunas veces de experimentación con varios operadores de textura para encontrar la mejor separación entre los rasgos de interés y su contorno

Otra consideración en la implementación de operaciones en una vecindad es cómo dar un mejor tratamiento a los píxeles cerca de los bordes de la imagen. Muchas de las imágenes de ejemplo mostradas aquí son tomadas desde el centro de las imágenes originales más grandes, de modo que los efectos de los bordes son evitados. En otras imágenes, una banda alrededor del borde de la imagen es saltada, la cual es una de las formas más comunes para responder al problema. Con esta aproximación, los programas “saltan” píxeles dentro de una distancia de $(n - 1)/2$ píxeles desde cualquier borde, donde n es el ancho total de la vecindad.

Otras posibilidades incluyen tener reglas especiales para las vecindades cerca de los bordes para clasificar a través de un conjunto más pequeño de píxeles, la duplicación de filas de píxeles en los bordes (por ejemplo, suponiendo que cada borde es un espejo), o usando direccionamiento Wrap-Around (Envolvente, por ejemplo, suponiendo que los bordes izquierdo y derecho y los bordes superior e inferior de la imagen son contiguos). En general, ninguno de estos métodos es particularmente atractivo. Dado que los valores de

brillo más grande y más pequeño son utilizados para encontrar el rango máximo, la duplicación de filas de píxeles no proporcionaría ninguna información extra para operaciones de rango. En todos los casos, el uso de menor cantidad de píxeles para los cálculos degradaría la precisión de los resultados. No hay ninguna razón para suponer que los bordes de la imagen deberían coincidir, y ciertamente, estructuras y regiones muy diferentes ocurrirán normalmente allí. La aproximación más conservadora es aceptar una pequeña reducción en el tamaño útil de la imagen después del procesamiento ignorando los píxeles cercanos a los bordes.

3.3. Matemática de Imágenes

Las operaciones de procesamiento de imágenes discutidas hasta aquí operan en una imagen y producen un resultado modificado, el cual puede ser almacenado en la misma memoria de la imagen. Otra clase de operaciones utiliza dos imágenes para producir una nueva imagen (la cual puede reemplazar una de las originales). Estas operaciones son usualmente descritas como aritmética de imágenes, dado que operadores tales como adición, substracción, multiplicación y división son incluidos. Son realizadas píxel por píxel, de tal manera que la suma de dos imágenes simplemente contenga píxeles cuyos valores de brillo sean la suma de los correspondiente píxeles en las imágenes originales. Hay algunas operaciones adicionales que también son utilizadas, como la comparación de dos imágenes para mantener los píxeles más brillantes (o más oscuros). Otras operaciones, como el AND y OR de la lógica Booleana, se aplican generalmente a imágenes binarias.

En realidad, la adición de imágenes ya ha sido utilizada en un método descrito previamente. La operación de adición es directa, pero se requiere de una decisión sobre

como manejar el resultado. Si dos imágenes de 8 bits (con valores de brillo entre 0 y 255 para cada píxel) se añaden entre sí, el valor del resultado puede variar entre 0 y 510. Esto excede la capacidad de memoria de la imagen. Una posibilidad es simplemente dividir el resultado entre dos, obteniendo una imagen resultante que está correctamente escalada al rango de 0 a 255. Esto es lo que se aplica usualmente en promediado de imágenes, en la que N imágenes añadidas entre sí producen un total, que luego es dividido entre N para reescalar los datos.

Otra posibilidad es encontrar los valores más grande y más pequeño en la imagen suma, y luego reescalar dinámicamente el resultado a este máximo y mínimo, de manera tal que se asigne a cada píxel un nuevo valor $B = \text{rango} \times (\text{suma} - \text{mínimo})$, donde rango es la capacidad de memoria de la imagen, típicamente 255. Esto es superior a realizar la división entre dos y luego realizar una expansión lineal del contraste, porque la precisión de los valores resultantes es mayor. Cuando se realiza la división entera entre dos, los valores fraccionarios son truncados y algo de información se puede perder.

Por otro lado, cuando se realiza el cálculo dinámico del rango o escalamiento automático, se hace más difícil realizar comparaciones directas de imágenes después del procesamiento, dado que las escalas de brillo pueden no ser las mismas. Adicionalmente, el autoescalamiento toma más tiempo, dado que la imagen requiere dos pasadas completas: una para determinar el máximo y el mínimo y otra para aplicar el cálculo de autoescalamiento. Cuando sea posible, esta operación ha de ser realizada como parte de la operación de procesamiento para mantener la precisión.

Añadir imágenes entre sí produce una superposición de la información y puede en algunos casos ser útil para crear imágenes compuestas, que pueden ayudar a comunicar relaciones espaciales complejas. Ya hemos visto que añadir el Laplaciano o una imagen

derivada a la original puede ayudar a proporcionar cierta ayuda espacial para interpretar la información del filtro. Usualmente, esta clase de adición es manejada directamente en el procesamiento cambiando el valor central del kernel. Para el Laplaciano, esta modificación es llamada filtro de nitidez ('sharpening filter'), como se señaló arriba.

□ Substracción de Imágenes

La substracción es ampliamente utilizada y es más interesante que la operación de adición. La substracción ha sido utilizada para nivelar imágenes mediante la eliminación del fondo. Otros uso de la substracción es el empleado en enmascaramiento de nitidez ("unsharp masking"), donde la imagen suavizada es substraída, píxel por píxel, a partir del original. En una operación de esta naturaleza, el posible rango de valores para imágenes cuyo rango inicial es de 0 a 255 es de -255 a $+255$. Los datos pueden ser reescalados para que se ajusten a un único byte, reemplazando la imagen original, añadiendo 255 y dividiendo entre dos o utilizando el mismo método de autoescalamiento descrito arriba para la adición. Se encuentra las mismas ventajas y desventajas para el escalado fijo y el flexible.

La substracción de una imagen a partir otra elimina de manera efectiva de la imagen diferencia todas las características que no cambian, mientras que resalta aquellas que sí cambian. Si la iluminación y la geometría de la vista son consistentes, las únicas diferencias en valores de los píxeles donde no ocurren cambios son variaciones estadísticas en el brillo, debido a ruido electrónico o de la cámara. Las imágenes brillantes y oscuras muestran características que han sido eliminadas o añadidas al campo de visión, respectivamente.

Incluso con la presencia de algo de ruido, la substracción de imágenes puede ser una manera efectiva de identificar pequeñas diferencias que pueden de otra manera escapar a la percepción. La figura 3.30 muestra un ejemplo. La imagen muestra dos películas de una

cámara de rayos X Debye-Scherer. Las líneas verticales muestran la exposición de la película por rayos X que fueron difractados a partir de una pequeña muestra, cada línea corresponde a la reflexión ocasionada por un plano de átomos en la estructura del material. Comparando las películas a partir de estas muestras similares se ve que la mayoría de las líneas son similares en posición e intensidad, porque las dos muestras son de hecho similares en composición. La presencia de ciertas impurezas se revela por líneas vagas adicionales en la imagen. La sustracción de un conjunto de líneas de la segunda incrementa la cantidad relativa de ruido, pero revela la presencia de líneas de compuestos de traza. Éstas pueden ser luego medidas y usadas para identificación.

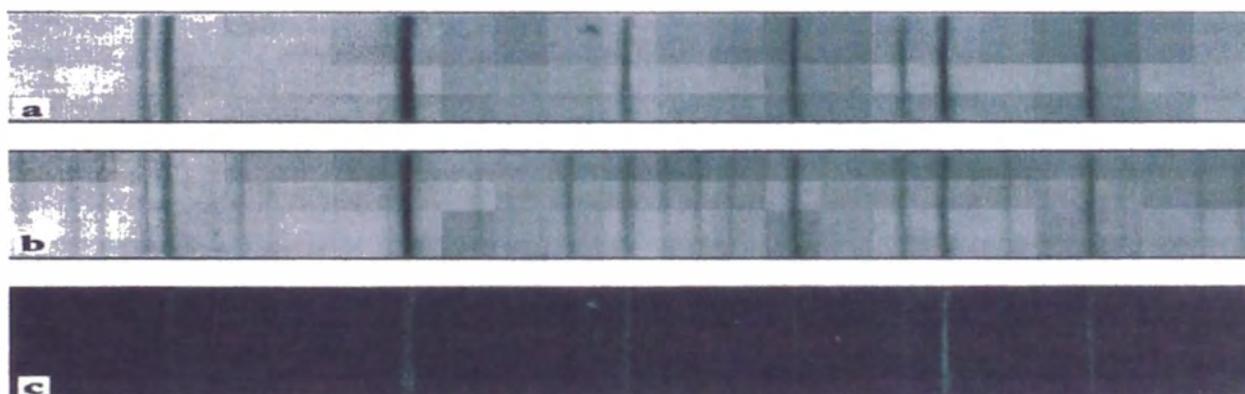


Figura 3.30: Sustracción de imágenes para mejorar la visibilidad de detalles: a) y b) son imágenes escaneadas de películas desde una cámara de rayos X Debye Scherer tomada con compuestos similares. La diferencia entre b y a es c) mostrando las líneas de baja intensidad presentes en una película debido a la presencia de pequeñísimos compuestos en esta muestra.

Un importante uso de la sustracción de imágenes es el control de calidad. Se adquiere y almacena una imagen **master** que muestra la colocación correcta de partes en tableros de circuitos como en la figura 3.31. Cuando la imagen es sustraída de una serie de imágenes adquiridas de una sucesión de objetos, las diferencias se resaltan fuertemente, revelando errores en la producción. Esta sustracción es frecuentemente llevada a cabo a velocidades de marcos de video utilizando hardware dedicado. Dado que no es realista

esperar que las partes estén alineadas exactamente, se puede especificar un grado de tolerancia por el área de píxeles brillantes y oscuros (no coincidencias) presentes tras la sustracción).

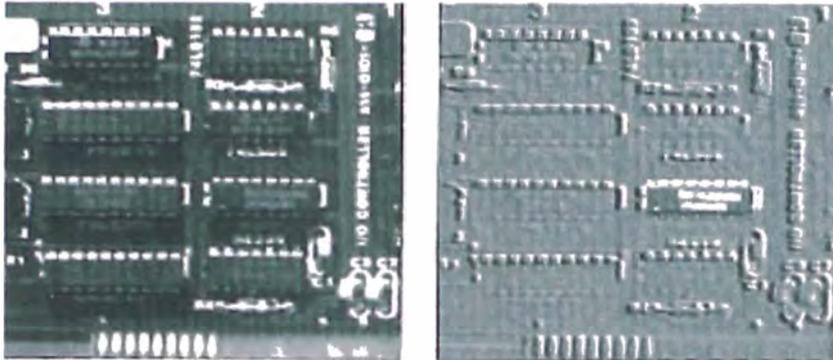


Figura 3.31: Imágenes de diferencia para el control de calidad. Una imagen principal es sustraída de las imágenes de cada parte siguiente. En este ejemplo, el chip faltante en un circuito impreso es evidente en la imagen de diferencia.

La misma técnica es utilizada en reconocimiento de fotos para observar la aparición o desaparición de blancos u objetivos en una escena compleja. Se puede requerir de Image Warping, para alinear las imágenes tomadas desde diferentes puntos de vista antes de que la sustracción sea realizada. Un método similar es utilizado en astronomía. Imágenes “parpadeantes” tomadas en la misma área del cielo en diferentes momentos es la manera tradicional para buscar planetas o asteroides. Esta técnica presenta las imágenes alternativamente al observador humano, que nota el movimiento aparente del punto de luz que es diferente en las dos imágenes. Algo de búsqueda computarizada utilizando sustracción ha sido empleada, pero para objetos pálidos en presencia de ruido de fondo no se ha mostrado tan eficaz como un observador humano.

El movimiento de los objetos puede ser medido utilizando la sustracción, si las características son lo suficientemente grandes y las imágenes secuenciales son adquiridas lo suficientemente rápido de manera que se acoplen en marcos sucesivos. En este caso, la

substracción muestra un área brillante de no coincidencia que puede ser medida. La longitud de la región no coincidente dividida por el tiempo transcurrido da la velocidad; la dirección puede determinarse por la orientación de la región.

En el otro extremo, la substracción es utilizada para rastrear témpanos de hielo en el Atlántico norte mediante fotos satelitales. Para el movimiento entre dos imágenes sucesivas que sea muy extenso para este método, puede ser posible identificar los mismos objetos en imágenes sucesivas basados en el tamaño, forma, etc. y de esta manera rastrear su movimiento. O, uno puede asumir que donde los rastros se cruzan, los puntos que causan la menor desviación del rastro proporcionan los datos correctos. Sin embargo, la técnica de substracción directa es mucho más simple y directa.

□ **Multiplicación y división**

La multiplicación de imágenes es quizás la menos usada de los modos matemáticos, pero es generalmente incluida para completar los sistemas que ofrecen las otras operaciones aritméticas. La multiplicación se ha utilizado para combinar la magnitud del borde y datos de dirección a partir de un operador. Otro uso posible es la superposición de una imagen en otra en el caso particular cuando los datos sobrepuestos son proporcionales al brillo absoluto de la imagen original. Un ejemplo es la textura; la figura 3.32 muestra una ilustración. Un modelo de brillo aleatorio Gaussiano es sobrepuesto en la aproximación poligonal lisa de un esfera sombreada para proporcionar una impresión de rugosidad. La sobreposición multiplicativa similar puede usarse **para añadir fluorescencia** u otras imágenes de emisión a una imagen de reflexión o transmisión.

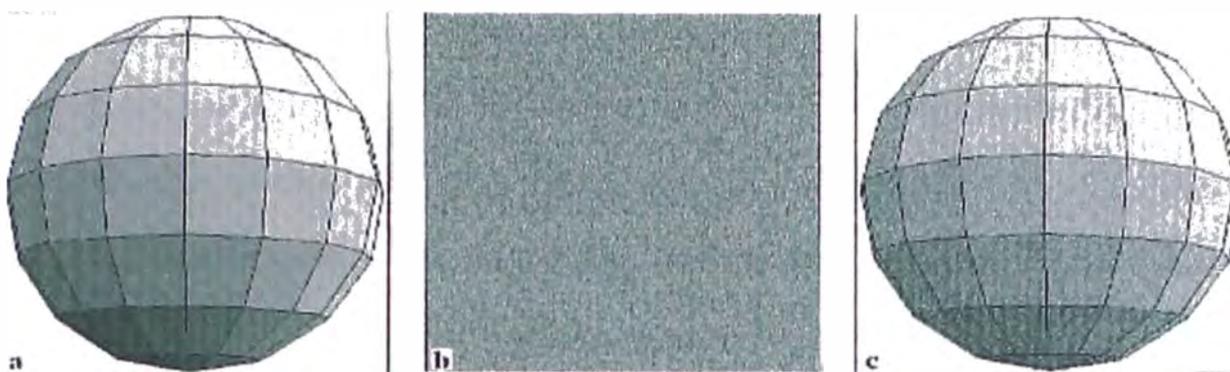


Figura 3.32: La multiplicación de imágenes puede ser utilizada para sobreponer la textura en una imagen: a) Globo con esfera lisa; b) Valores aleatorios gaussianos; c) Producto de a por b.

Una de las dificultades con la multiplicación es el extremo rango de valores que pueden ser generados. Con imágenes de 8 bits cuyos píxeles pueden tener un rango entre 0 y 255, los productos posibles pueden variar de 0 a más de 65 000. Este es un producto de 2 bytes, de los cuales solamente el byte mayor puede ser realmacenado en la misma memoria de la imagen a menos que un ajuste a escala sea usado. Una pérdida de precisión significativa puede producirse por los valores en la imagen resultante.

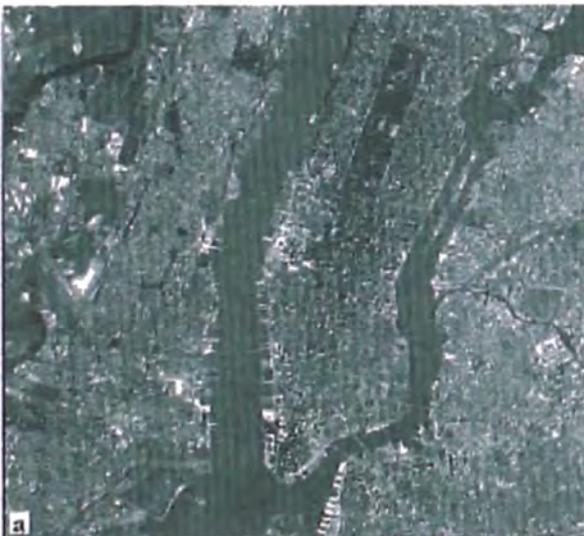
La magnitud de los números también crea problemas con la división. Primero, la división por 0 debe ser evitada. Esto es usualmente hecho añadiendo 1 a todos los valores de brillo, de modo que los valores sean interpretados como 1 a 256 en vez de 0 a 255. Es necesario entonces multiplicar primero cada píxel en el numerador por algún factor que producirá cocientes que cubran el rango de 0 a 255, mientras se mantiene alguna precisión útil para los extremos del rango. El ajuste a escala automático es particularmente beneficioso para estas situaciones, pero no puede ser usado en aplicaciones que requieren la comparación de resultados recíprocos o para una curva de calibración.

Un ejemplo de división en la cual el ajuste a escala automática es útil es la eliminación de fondo cuando los detectores o cámaras lineales son utilizados. Un ejemplo

de división cuando los valores absolutos son requeridos es calcular las proporciones de brillo desde dos o más bandas LANDSAT o dos o más imágenes de filtro cuando examinamos las pruebas fluorescentes en el microscopio de iluminación. En imágenes satelitales, las relaciones de intensidades (particularmente banda 4 = 0.5 a 0.6 μm , banda 5 = 0.6 a 0.7 μm , banda 6 = 0.7 a 0.8 μm y banda 7 = 0.8 a 1.1 μm) son usadas para clasificación de terrenos y la identificación de algunos tipos de rocas. La inercia térmica de diferentes formaciones de roca puede también ser determinada por relación de las imágenes obtenidas al día en diferentes horas locales, como por las formaciones de calor o frío .

Como un ejemplo de identificación mineral, los silicatos exhiben un desplazamiento de longitud de onda con composición en la banda de absorción. Los granitos, dioritas, gabros y peridotos de olivino han disminuido progresivamente el contenido de silicio. La banda de absorción se desplaza a longitudes de ondas progresivamente más largas en la banda infrarroja térmica de 8 a 12 μm conforme cambian las vibraciones de estiramiento de la conexión (“bond–stretching”) entre los átomos de silicio y oxígeno en la malla de silicato. El satélite mapeador multiespectral infrarrojo térmico registra seis bandas de imágenes de datos en este rango, las cuales son combinadas y normalizadas para localizar la banda de absorción e identificar formaciones de rocas. Las rocas de carbonato (dolomita y piedra caliza) tienen una respuesta de absorción en el rango de 6 a 8 μm , pero esto es difícil de medir en imágenes satelitales debido a la absorción atmosférica. En longitudes de onda mediante radar, diferentes rugosidades de superficies producen variaciones en **intensidad reflejada en las bandas de Ka , X y L** y pueden ser combinadas en las mismas formas para efectuar mediciones y distinguir el grosor (tosquedad) de arenas, cascajos, guijarros (pedruscos) y pedregones (Sabins, 1987).

De la misma manera , las bandas **1** (0.55 a 0.68 μm , o rojo visible) y **2** (0.72 a 1,10 μm , o infrarrojo reflejado) desde imágenes satelitales multiespectrales son usadas para reconocer la vegetación. La banda 1 registra la absorción de la clorofila y la banda 2 da la reflexión desde la estructura de las hojas de la célula. La proporción $(B_2 - B_1) / (B_2 + B_1)$ elimina las variaciones debido a diferencias en la elevación solar (ángulo de iluminación) y es utilizada para medir la **distribución de vegetación en imágenes**. Típicamente, este estudio también combina los datos de exploraciones sucesivas para obtener el índice de vegetación espectral como una función de tiempo. Se ha utilizado otras proporciones para procesar imágenes y medir las concentraciones de clorofila debido al fitoplancton en el océano (Sabins, 1987) . La figura 3.33 muestra una aproximación simplificada a este método usando la proporción de un infrarrojo cercano a azul para aislar la vegetación de la imagen satelital .



a) Banda 1 (azul visible)



b) Banda 4 (cercana al infrarrojo)



c) Relación de Banda 4 a Banda 1 (mostrando

áreas de vegetación).

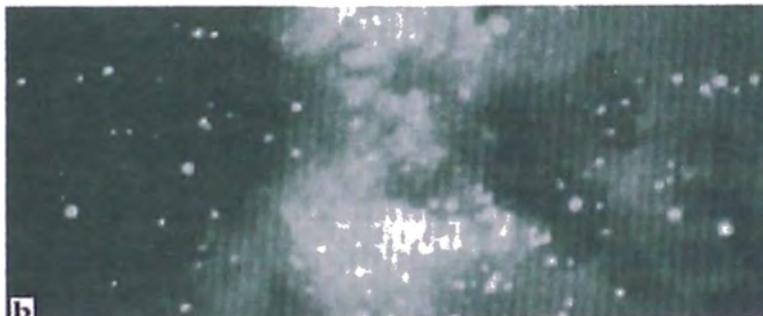
Figura 3.33: Imágenes mapeadoras temáticas “LANDSAT” de la ciudad de Nueva York.

Las proporciones (ratios) son también usadas en imágenes astronómicas. La figura 3.34 muestra imágenes infrarrojas de la región formadora de estrellas NGC-2024. La luz infrarroja penetra el polvo que bloquea la mayor parte de la luz visible. Las proporciones o diferencias de las imágenes con longitud de onda diferentes muestran detalles en el polvo y

mejoran la visibilidad de las estrellas recientes. La **matemática de imagen también incluye la comparación lógica de los valores del píxel**. Por ejemplo dos imágenes pueden combinarse manteniendo la parte más brillante (o más oscura) de los píxeles correspondientes en cada ubicación.



a) Imagen infrarroja de 1,2 μm



b) Imagen infrarroja de 1,6 μm



c) Imagen infrarroja de 2,2 μm .



d) Imagen de $2,2 \mu\text{m}$ menos la imagen de $1,6 \mu\text{m}$.



e) Imagen de $1,6 \mu\text{m}$ dividida por la imagen de $1,2 \mu\text{m}$.

Figura 3.34: Combinando vistas de NGC-2024 para mostrar regiones formadoras de estrellas y polvo

Por consiguiente, las imágenes de muchas profundidades focales pueden combinarse conservando solamente el valor más brillante en cada ubicación del píxel para formar una imagen con una profundidad de campo no limitada. Un efecto adicional puede producirse desplazando ligeramente cada imagen antes de efectuar la comparación y superposición.

CAPÍTULO IV

INTERPRETACIÓN DE IMÁGENES SATELITALES PARA FINES METEOROLÓGICOS

En la teledetección se utiliza un gran número de datos para representar una imagen, estos pueden ser manipulados en formato digital con la finalidad de extraer información de estas imágenes. Cada punto captado por los sensores, corresponde a un área mínima denominada pixel o 'picture element' que debe estar geográficamente identificado. Para cada uno son registrados los valores digitales relacionados con la intensidad de energía reflejada en diferentes bandas bien definidas del espectro electromagnético.

Para procesar digitalmente las imágenes de datos de percepción remota es necesario que la imagen esté en formato digital. En estos casos, una imagen digital puede ser obtenida de dos maneras: La primera es la adquisición por teledetección en formato analógico, como son las fotografías aéreas y posteriormente digitalizarla. La segunda es adquirir la imagen de percepción remota en formato digital. Esto último sucede en la mayoría de satélites que a bordo tienen un sistema analógico/digital (A/D) y envían las imágenes en formatos digitales a las estaciones de recepción.

Una imagen de percepción remota se puede representar por una matriz de datos, donde las líneas y columnas definen las coordenadas espaciales del pixel. Para representar la radiancia de la escena para cada pixel se utiliza un número finito de bits. Como vimos en el Capítulo I, la radiancia es el flujo radiante que proviene de una fuente en una determinada dirección por unidad de área. La medida de la radiancia representada en cada pixel por su nivel de gris no es solamente la de la radiación reflejada por la superficie

contenida en la escena del pixel sino también la radiación debido a la dispersión atmosférica.

El proceso de digitalización de una imagen no digital o 'imagen continua', corresponde a una discretización o muestreo de la escena en observación, a través de la superposición de una malla hipotética y una atribución de valores enteros (los niveles de gris) a cada punto de esa malla, este proceso es denominado cuantización.

La cuantificación de la radiancia continua de una escena es representada por los niveles de gris discretos en la imagen digital, es dada por un número de **bits por pixel** para producir un intervalo de radiancia. Los sensores de la nueva generación obtienen normalmente imágenes en 8 o 10 bits que equivalen a 256 o 1024 niveles digitales. Como se explicó en el Capítulo I, un sujeto de importancia para ser sensado es la capa de nubes.

4.1. Interpretación de las imágenes de nubes sensadas por los satélites

Pasaremos a presentar algunos ejemplos de nubes observadas desde satélites basadas en la existencia de cierto grado de inestabilidad (cumuliformes) o estabilidad atmosférica (estratiformes). El último grupo que analizaremos son las nubes altas formadas por cristalitas de hielo (cirriformes). Debido a las limitaciones inherentes a este informe sólo se presentarán un ejemplo dentro de cada una de las clases.

4.1.1. Nubes cumuliformes

En una atmósfera inestable se pueden elevar libremente burbujas de aire dando lugar a nubes en forma de "coliflor", compactas y de forma globular. Pueden ocupar grandes proporciones en la horizontal y, sobre todo, en la vertical llegando a alcanzar sus topes

nubosos los niveles de la tropopausa (frontera superior de la troposfera), presentándose una convección muy profunda. En su conjunto se les denominan nubes cumuliformes. Van asociadas, como se ha dicho, a situaciones atmosféricas con cierto grado de inestabilidad, movimientos ascendentes y descendentes muy intensos. Entre ellas tenemos los cúmulos de buen tiempo, los cúmulos congestus, los cumulonimbos y los altos cúmulos (estos últimos ligados a nubosidad de tipo medio).

Dependiendo del espesor, tamaño en la horizontal en relación con la resolución del satélite y la altura a la que se encuentre el tope nuboso o grado de desarrollo, presentarán diferentes características en los diferentes canales. Tomaremos como referencia las que llegan a tener grandes desarrollos en la vertical: los **cumulonimbos (Cb)**.

Este tipo de nubosidad convectiva está asociada con áreas de moderada a fuerte inestabilidad. Son nubes de gran desarrollo vertical, que pueden aparecer aisladas o agrupadas formando estructuras mayores como líneas de turbonada, tormentas multicelulares o sistemas convectivos de media escala. En los tres canales dan muy buena señal, con tonos blancos brillantes, lo que indica que son nubes espesas y con topes muy fríos. Cuando los Cb desarrollan yunques cirrosos dan una señal de mayor extensión horizontal en IR y WV que en VIS, aunque un realce adecuado en IR nos puede delimitar la zona de máxima actividad convectiva. Los yunques asociados se extienden en la dirección del viento en niveles altos. La forma y rapidez con que se expandan estas estructuras son de gran ayuda en la determinación de la dirección e intensidad del viento en niveles altos. Si la apertura es fuerte, los Cb presentarán a barlovento un borde bien marcado y a sotavento el yunque de cirros formará un zona difusa y amplia de aspecto fibrosa. En ocasiones, en la fase final del ciclo de vida de los Cb, los cirros cumulonimbo genitus

pueden seguir mostrando una buena señal en los canales IR y WV, mientras que en VIS la señal es mucho más débil; esto es una indicación de que el Cb se encuentra ya en fase de disipación. Al amanecer y atardecer, cuando la inclinación solar es relativamente baja, pueden dar sombras allí donde existen "torreones" ligados a las zonas con fuertes corrientes ascendentes.

En la figura 4.1 se presenta un ejemplo de Cbs. Se aprecian claramente las características anteriormente comentadas. En VIS se observan como una nubosidad muy blanca, compacta y globular. En IR y en WV presentan una tonalidad blanca brillante. En este caso los bordes están relativamente bien marcados, por lo que se puede inferir que la apertura del viento existente es débil. El WV e IR nos permiten analizar aquellos que llegan a dar señal en niveles superiores (convección profunda) frente aquellos Cbs que se están desarrollando todavía, como ocurre al sur de Túnez. Llama la atención la mejor resolución espacial del VIS frente al IR y WV.

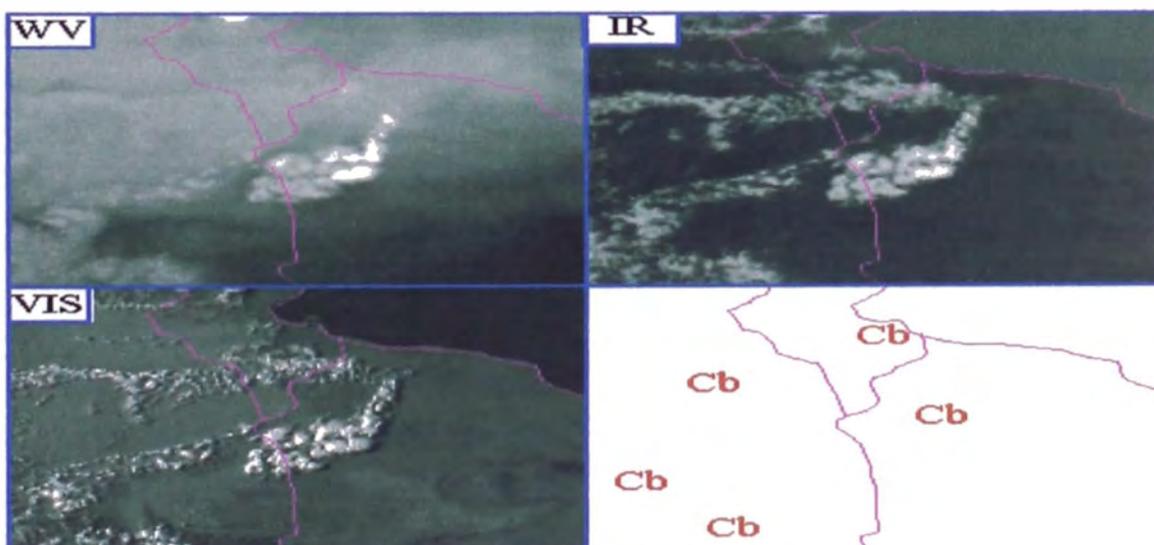


Figura 4.1: Ejemplo comparativo de tres imágenes de los canales del Meteosat para nubes cumuliformes en el día 12 de Agosto de 1996 sobre el Norte de África. El cifrado de nubosidad esta en los datos sinópticos del panel inferior derecho.

4.1.2. Nubes estratiformes

Las nubes estratiformes ofrecen en general una textura suave y continua. Van asociadas, en general, a enfriamientos amplios en medios estables, limitadas en sus cimas por una inversión. El enfriamiento suele ser debido a la expansión adiabática, aunque en algunos casos también puede deberse al contacto con una superficie fría. Estas nubes se forman por enfriamientos radiativos en situaciones anticiclónicas con cielos despejados, por condensación de precipitación que previamente se ha evaporado, ligadas a situaciones frontales o por advección **de una masa más o menos húmeda sobre una superficie mas fría** (nieblas de advección). En este tipo de nubes podemos incluir los estratos y nieblas, estratocúmulos y la combinación de nimbostratos, altostratos y altocúmulos (ya que, aunque pueden presentarse de forma independiente, a menudo aparecen combinados en los sistemas frontales). Veremos un ejemplo de estratos-nieblas.

Desde la visión del satélite es imposible distinguir entre estratos y nieblas. Forman capas nubosas generalmente extensas con topes bastante uniformes adaptándose a los accidentes topográficos cuando se desarrollan sobre tierra o en la costa. Están compuestos por gotitas muy pequeñas de agua y, si tienen suficiente espesor, pueden generar llovizna. Si las temperaturas son muy frías puede formarse cristalitos o prismas de hielo.

Son fácilmente observables en VIS con tonos blancos, más o menos brillantes, dependiendo del espesor de la capa, con bordes bien definidos coincidiendo en tierra con las características del relieve. A veces dan una señal parecida a la nieve, con forma dendrítica en zonas de montaña, o áreas uniformes en llanuras. Sin embargo, observando

una secuencia de imágenes se puede analizar la diferencia en el momento en que las nieblas comiencen a disiparse.

En IR dan muy poca señal, en general, con tonos grises. Al ser nubosidad muy baja las diferencias térmicas con el suelo son muy poco significativas por lo que dan tonalidades muy parecidas. De noche, y con una inversión sobre ellas, pueden llegar a verse más oscuras que la superficie circundante ('niebla negra' o 'estratos negros'), al contrario de lo que ocurre durante el día. En el canal del WV no existe señal alguna de este tipo de nubosidad.

En la figura 4.2 vemos un ejemplo de nieblas-estratos al oeste de la península y en las zonas costeras. Como se observa en las imágenes, la mejor señal proviene del VIS con zonas más claras y brillantes donde la capa es más espesa. La presencia de puntos brillantes en la nubosidad situada más al oeste nos indica la presencia de estratocúmulos sobre el mar.

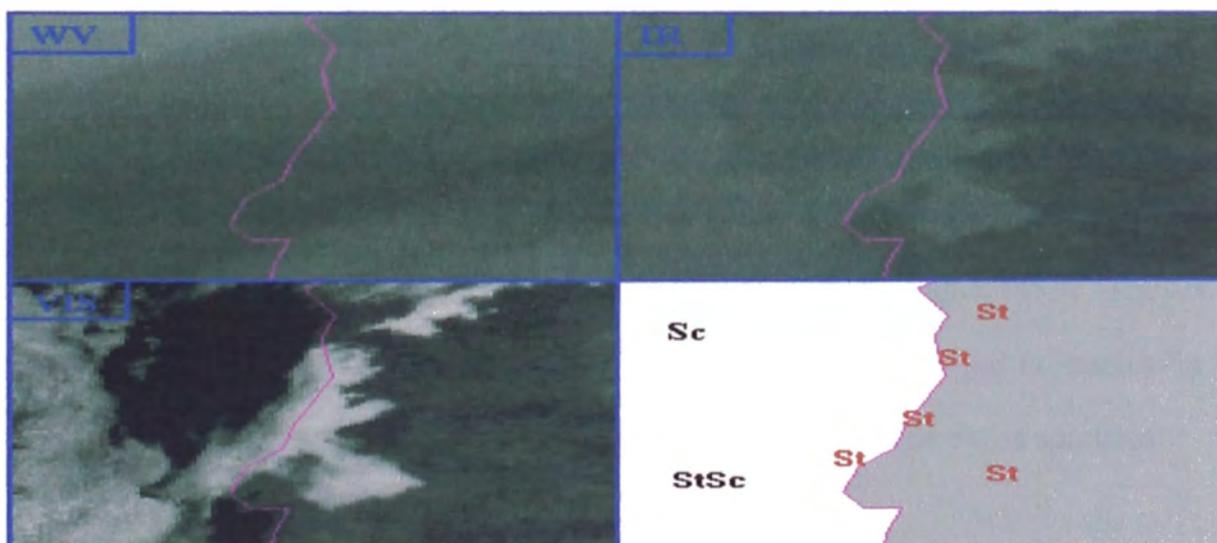


Figura 4.2: Como en el caso anterior pero para nieblas-estratos sobre la península ibérica. El cifrado de nubosidad en los datos sinópticos del panel inferior derecho.

En IR apenas dan señal, solamente se ven zonas ligeramente más clara que los alrededores. Cuando el calentamiento diurno sobre tierra aumenta las diferencias se hacen más notorias. En el WV no se observan. La no disponibilidad de datos VIS durante la noche es un gran problema para identificar este tipo de nubes cuando se utiliza exclusivamente datos del satélite Meteosat.

4.1.3. Nubes cirriformes

Son nubes altas formadas por partículas de hielo y confinadas en alturas superiores a 6000 m. Pueden tener su origen en este nivel o provenir de niveles más bajos (cirros de origen cumulogenitus). Frecuentemente se forman por congelación directa del vapor de agua del aire claro. Su importancia radica en que están asociadas con elementos y sistemas relacionados con la dinámica atmosférica de niveles altos como, por ejemplo, chorros polares y subtropicales, turbulencia en niveles altos, zonas de deformación, etc. Son nubes en general de poco espesor, difíciles de ver en VIS, a veces únicamente identificables por la sombra que proyectan, y fácilmente identificables en IR ó WV, aunque cuando aparecen combinadas con otro tipos de nubes su identificación es más complicada. Se pueden agrupar en cuatro tipos: cirroestratos, cirros fibratus, cirros spissatus, y un caso especial de los spissatus, los cirros cumulonimbo genitus o cirros ligados al yunque. No se incluyen los cirrocúmulos ya que sus elementos globulares son más pequeños que la resolución del satélite si analizamos imágenes del Meteosat. Veremos un ejemplo de cirros spissatus.

Estos suelen formar bandas de 100 a 200 Km. de anchura y se extienden con una longitud de centenares de Km. En las imágenes VIS presentan una gama de tonos grises, desde el gris claro al blanco, con su brillo disminuyendo progresivamente desde el centro

hacia los bordes. Los elementos individuales pueden ser globulares o elongados y producir sombras detectables. Estas sombras suelen ser de dimensiones uniformes, al contrario de lo que ocurre con las de los cúmulos y Cb, que son irregulares en función de la etapa de desarrollo. En el IR se distinguen bien, con un color blanco en el centro que tiende a volverse gris en los bordes, generalmente bien dibujados, sobre todo si existe contraste térmico con la superficie subyacente. En WV, el alto nivel de humedad asociado a esta nubosidad es fácilmente reconocible, aunque algunos de los detalles más finos no se distinguen.

En la figura 4.3 tenemos las imágenes del día 25 de Septiembre de 1996 a las 10:00 hrs. y en ellas se puede observar la apariencia de los Ci spissatus en los tres canales. La banda de Ci atraviesa la Península Ibérica desde el centro hasta las Islas Baleares. Las dimensiones de la banda se pueden observar perfectamente en las imágenes WV e IR con una anchura aproximadamente de 200 Km. La nubosidad va acompañada de un máximo de viento en niveles altos con igual orientación que la banda.

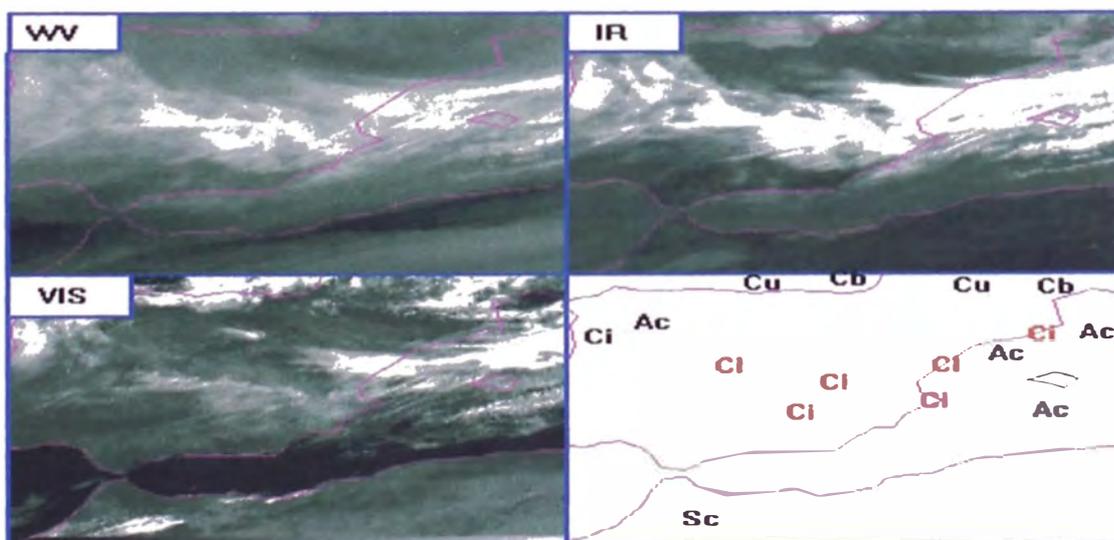


Figura 4.3: Similar al caso anterior pero para cirros spissatus sobre la península ibérica.

Los elementos que forman la banda son prácticamente perpendiculares a ésta y al máximo de viento en altura. En los tres canales se pueden observar pequeñas líneas con orientación NE-SO. En la imagen VIS se aprecian algunas sombras que proyectan estos elementos sobre la superficie (sur de la península ibérica)

4.2. Análisis multiespectral

Las imágenes de los satélites meteorológicos son muestreadas con un número grande de puntos, por ejemplo las imágenes del sensor THEMATIC MAPPER del satélite LANDSAT poseen más de 6000 muestras por línea. Además, estas imágenes tienen la característica de ser **multiespectrales**, en el sentido de que constituyen una colección de imágenes de una misma escena, en un mismo instante, **obtenida por diferentes sensores** con respuestas espectrales diferentes.

La utilización de imágenes provenientes de más de un canal permite identificar de manera más sencilla algunos fenómenos atmosféricos o características de la superficie. Los stratus a nivel bajo son muy difíciles de identificar en una imagen IR debido a que la nube puede tener un valor de temperatura radiactiva cercano al de la superficie. Por otra parte, en una imagen VIS, las nubes de tipo stratus aparecen brillantes en contraste con el fondo más oscuro de la tierra y el agua. Un problema similar presentan las nubes cirrus muy delgadas, las cuales no pueden verse en una imagen visible por ser prácticamente transparentes a la luz visible. Sin embargo, estas nubes son frías. Por lo cual presentan una fuerte señal fría en la imagen infrarroja.

4.3. Realce de imágenes

El realce de imágenes consiste en destacar ciertos valores o regiones dentro de una imagen para enfatizar e identificar características meteorológicas y separarlas de las señales provenientes de la tierra y del agua.

Las imágenes infrarrojas de satélite son tomadas a 36000 Km. de la superficie terrestre. El satélite GOES 8 de la NOAA se mueve con la velocidad angular de la Tierra, por lo que enfoca siempre el mismo satélite se halla sobre la intersección de la línea ecuatorial y la longitud W, es decir, sobre el departamento de Putumayo en Colombia. Esta ubicación permite recibir imágenes con una distorsión mínima.

La imagen infrarroja debe entenderse como un mapa de temperaturas que cada color indica un rango de temperatura, relacionado con las altitudes de los toques de las nubes. El radiómetro del satélite mide los niveles de radiación, clasificados por rangos, se le asigna un código de colores establecido.

Al observar los diferentes colores y las formas de los contornos de áreas coloreadas, se puede deducir el tipo de nubes y su extensión vertical y horizontal. Así, por ejemplo, los contornos blancos indican nubes más altas que contornos de color amarillo. Debe tenerse presente que por la atmósfera, hasta la tropopausa, la temperatura disminuye con la altura. Si observamos un contorno blanco de forma redonda es probable que debajo de éste haya nubes que producen tormentas con lluvias fuertes.

Los colores utilizados significan lo siguiente:

- Lila claro: Cimas de nubes con temperaturas entre -10°C y -20°C
- Lila oscuro: Cimas de nubes entre -21°C y -31°C
- Verde claro: Cimas de nubes entre -32°C y -42°C
- Verde medio: Cimas de nubes entre -43°C y -53°C

- Verde oscuro: Cimas de nubes entre -54°C y -59°C (Tormentas)
- Amarillo: Cimas de nubes entre -60°C y -63°C
- Azul: Cimas de nubes entre -64°C y -80°C (Topes sobresalientes)
- Blanco: Cimas de nubes entre -81°C y -110°C (Topes sobresalientes)

En esta gama de colores, las nubes mas frías y mas altas corresponden al color blanco y las mas calientes y mas bajas al lila claro.

Las zonas grises claras corresponden a nubes muy bajas, en algunos casos a la niebla. En condiciones de buen tiempo, las nubes se observan mas cercanas a las cordilleras. Los valles toman un color oscuro, casi negro presentando poca nubosidad o ausencia de ella. En algunos caso se observa que indican cielo despejado y temperaturas mayores de 30°C .

La hora en que fue captada la imagen por el satélite es la del meridiano de Greenwich (GMT), como estándar internacional, lo que equivale a cinco horas mas para la hora oficial peruana.

4.3.1. Realce de color

El realce de color implica efectuar una reasignación de colores, o niveles de grises, a cada pixel de la imagen basándose en el valor del pixel. Las tablas de asignación de valores especifican estas relaciones entre valores de entrada y salida; las relaciones se muestran en un grafico denominado curva de realce.

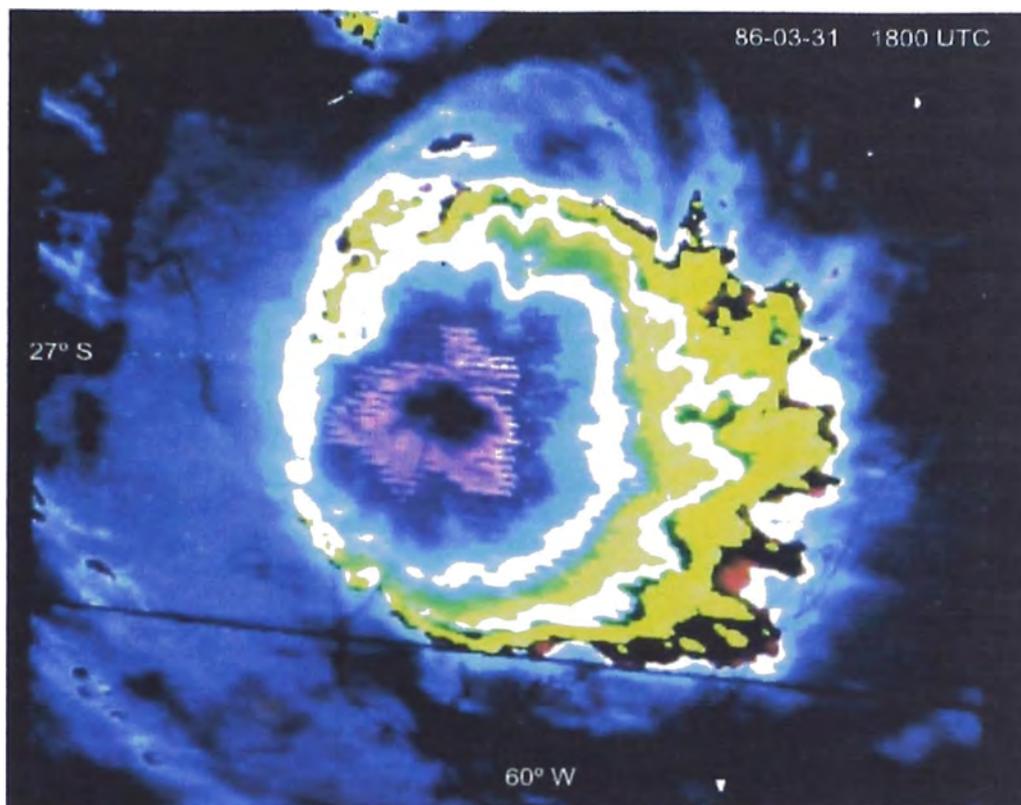


Figura 4.4: Imagen con realce de color

4.3.2. Realce de color multiespectral

Una imagen multiespectral aprovecha las ventajas tecnológicas disponibles en un monitor a color (rojo-verde-azul)(red-green-blue, RGB). Cada canal que se desea observar es asignado a uno o mas de los colores para destacar las características multiespectrales.

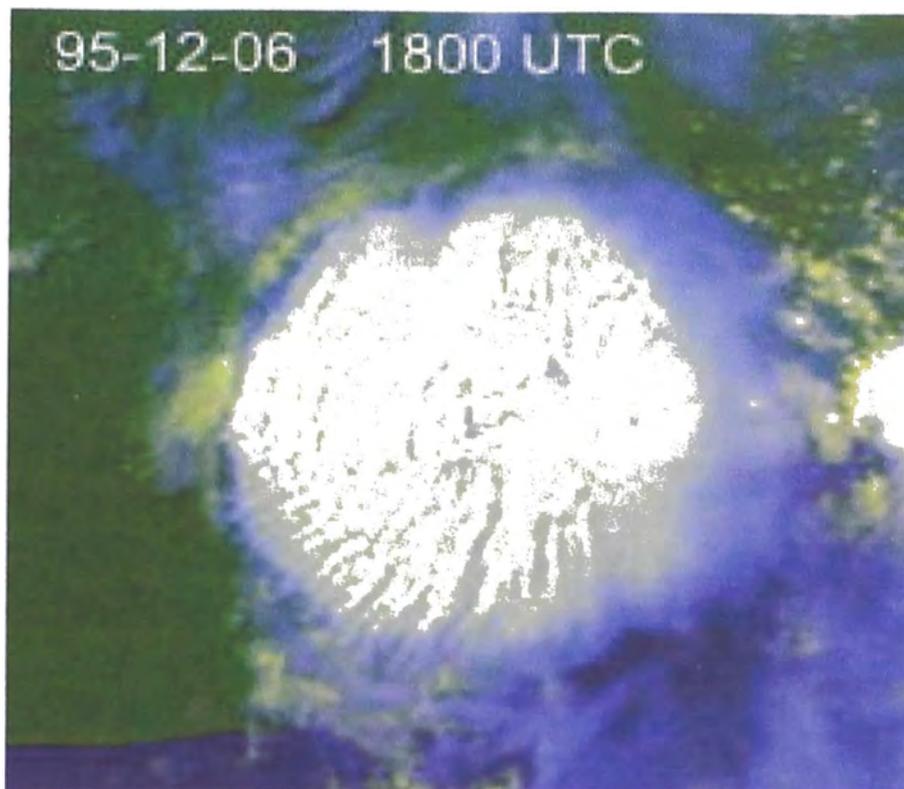


Figura 4.5: Imagen multiespectral (06 de Diciembre de 1995)

4.4. Identificación de tormentas en imágenes satelitales

- Los conglomerados de nubes

Los conglomerados de nubes están asociados con tormentas convectivas intensas. Las figuras 4.6 muestran conglomerados de Cb muy grandes sobre la parte central de Argentina. Las bandas de Ci fluyen hacia fuera del conglomerado indicado con A siguiendo aproximadamente la configuración del campo de viento en niveles superiores.

La imagen VIS (figura 4.6.a) muestra secciones pequeñas con una textura rugosa y con partes sobresalientes como torres destacadas por las partes iluminadas y las sombras de los toques de los yunques que se unen. Estas partes altas indican los lugares donde las corrientes ascendentes sobrepasan la cubierta de Ci. Estas características indican regiones

con convección muy intensa, tiempo severo y sobrepasan los Ci no necesariamente indican por sí solos que el tiempo severo está ocurriendo dentro de una tormenta, pero los topes persistentes que sobrepasan los Ci son una señal más confiable de tiempo severo. En el caso del conglomerado A, los restos o hilos de nubes viento abajo son extensos y gruesos, pero los conglomerados formados más tarde, B, C y D, no han generado aún un yunque tan extenso.

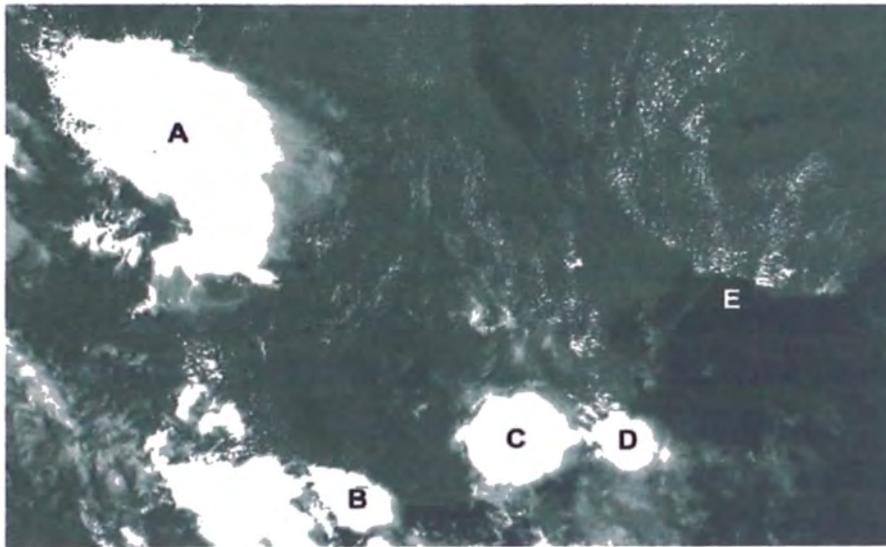


Figura 4.6.a: Imagen VIS de un conglomerado de nubes (NOAA-14)

La imagen en $3,7\mu\text{m}$ (figura 4.6.b) muestra secciones negras donde la radiación solar ha sido totalmente absorbida por las partículas de hielo en los yunques de las tormentas.

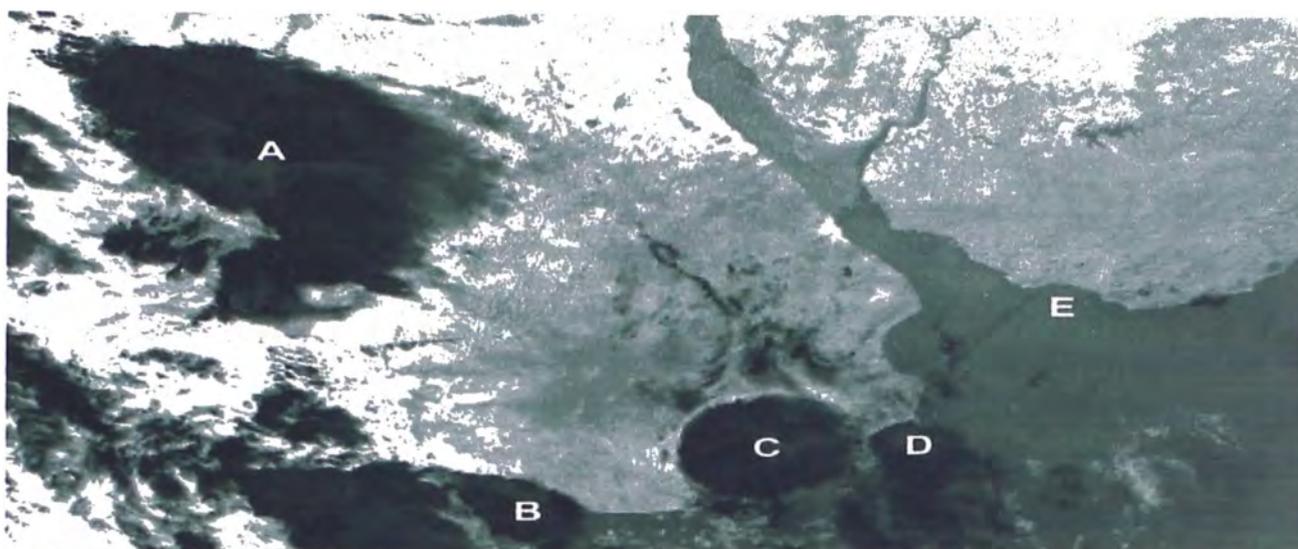


Figura 4.6.b: Imagen en $3.7 \mu\text{m}$ del mismo lugar (NOAA-14)

□ Ciclones de latitudes medias y bandas frontales

Las figuras 4.7.a la d muestran las nubes asociadas con un gran ciclón en latitudes medias sobre Argentina según lo muestran las imágenes VIS, $3,7\mu\text{m}$, WV e IR realizado. Las imágenes provienen del satélite GOES-8, 09:30hrs del 27 de Abril de 1999.

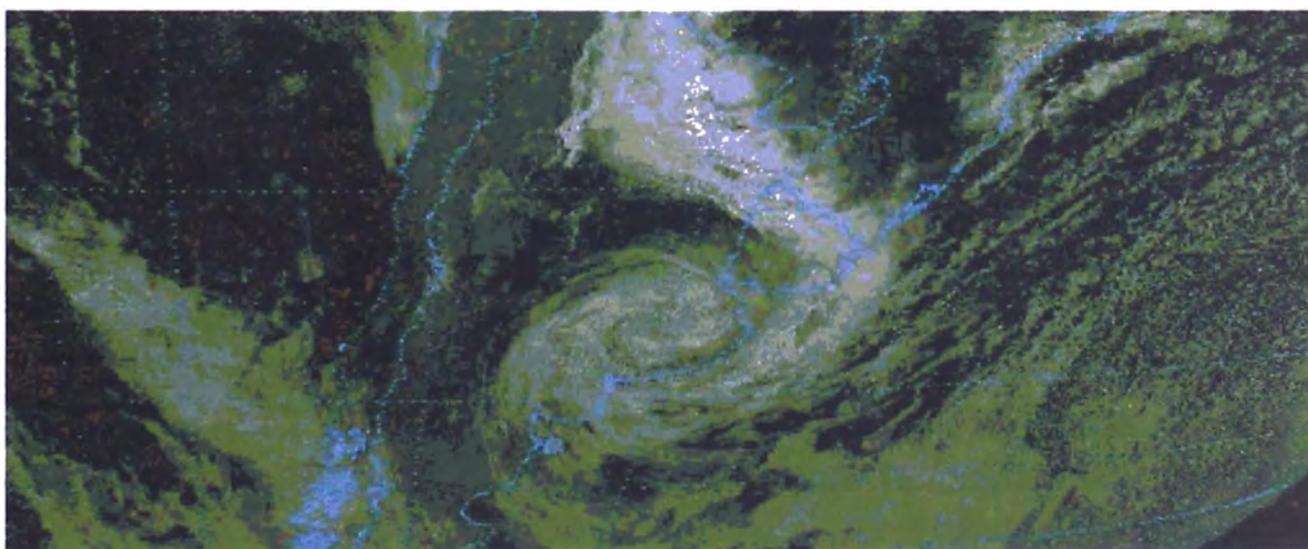


Figura 4.7.a: Imagen VIS de un ciclón de latitudes medias

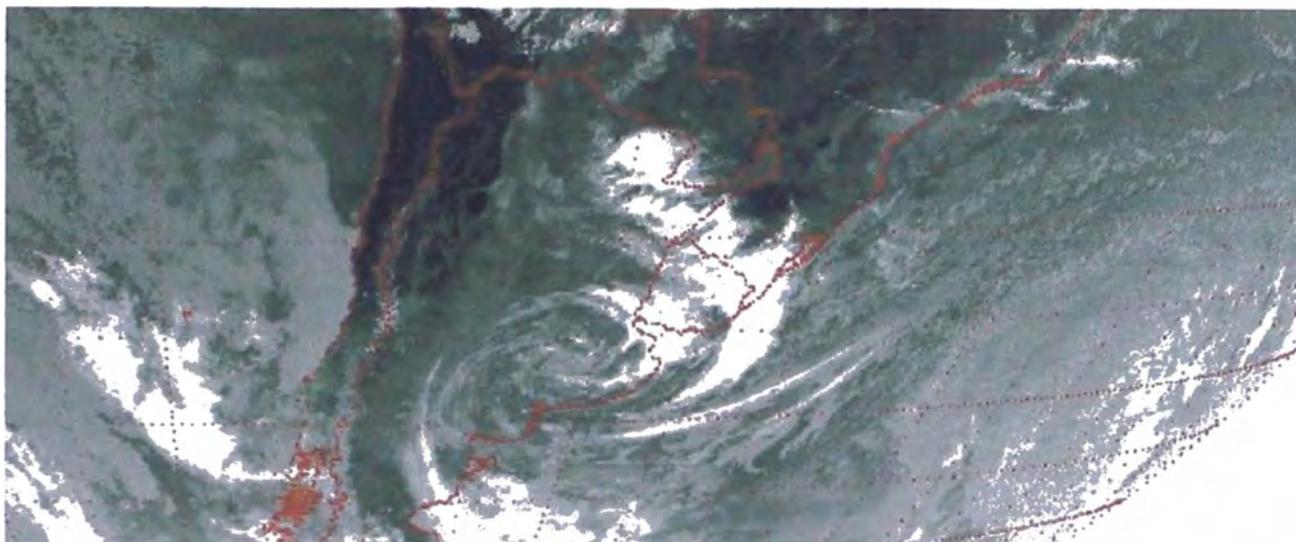


Figura 4.7.b: Imagen 3,7 μ m del mismo ciclón

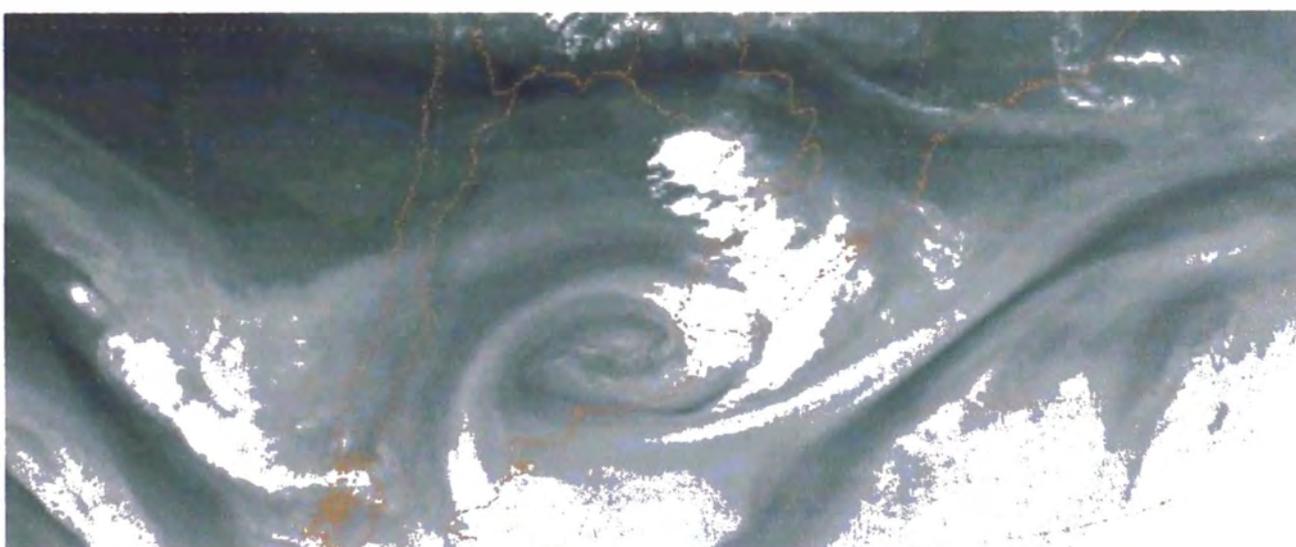


Figura 4.7.c: Imagen WV (Vapor de agua)

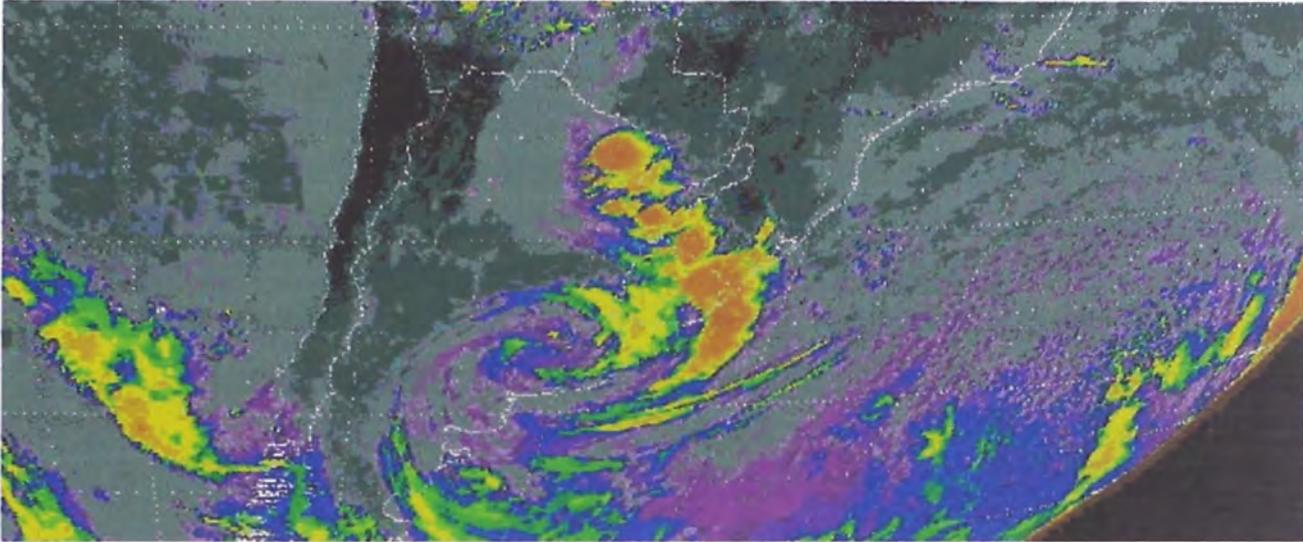


Figura 4.7.d. Imagen IR del mismo hidrometeoro con color realzado para mejor identificación de las nubes asociadas.

CAPÍTULO V

APLICACIONES: EVALUACIONES Y PRUEBAS REALIZADAS EN LAS IMÁGENES SATELITALES

En este capítulo son descritas dos aplicaciones, con las respectivas evaluaciones, de dos sistemas de procesamiento de imágenes. En primer lugar utilizamos el MATLAB para variar los colores de una imagen con los resultados que veremos a continuación. La segunda aplicación es con SPRING, programa al que hacemos referencia en el Capítulo II, que está orientado propiamente al procesamiento de imágenes de percepción remota.

5.1. El MATLAB en el procesamiento de imágenes:

El MATLAB es un software de propósito general para el computo científico y técnico en general. Su elemento básico es el cálculo matricial. Dentro de sus funciones especiales, tales como el modelado de sistemas de control, también incluye el procesamiento de señales con la “Signal Processing Toolbox” en su versión profesional. La versión utilizada con la aplicación siguiente es MATLAB 5.3.

En el entorno MATLAB se puede crear y ejecutar programas o procedimientos que contienen comandos de MATLAB. También podemos ejecutar un comando de MATLAB, observar los resultados y ejecutar otro comando de MATLAB que interactúe con la información que está en la memoria, observar sus resultados y así sucesivamente.

Este entorno interactivo no requiere el proceso formal de compilación, vinculación / carga y ejecución de la mayoría de lenguajes de alto nivel, por lo que podemos considerarlo

como un lenguaje interpretativo. Los errores en la sintaxis de un comando de MATLAB son detectados cuando el entorno MATLAB intenta traducir el comando y los errores de lógica pueden causar errores de ejecución cuando el entorno MATLAB intenta ejecutar el comando.

Esta aplicación esta orientada a experimentar con los cambios de color en una imagen VIS obtenida del satélite GOES-8 en enero del presente año. Se debe tener presentes las siguientes consideraciones:

- ❑ La imagen debe ser convertida al formato BMP (Mapa de bits) para procesarla.
- ❑ En MATLAB se trabaja con el modelo o formato de color RGB.
- ❑ Tomamos como referencias la ecuación de la luminancia (3.1) y el procesamiento mostrado en la figura 3.18 (Tomada del libro ‘The Image Processing Handbook’)

El programa tiene, en líneas generales, las siguientes partes:

a. Establece los parámetros de funcionamiento: Toma la pantalla del monitor, lee el archivo de entrada (en el formato *.bmp) y presenta esta imagen con sus atributos de colores en la ventana 1 con ‘Image(i)’ y ‘colormap(c)’.

b. Se programa el procedimiento de variación de los parámetros de color: En la ventana 2 se nombra el archivo o imagen de salida. Define un ‘MENÚ’ de tres barras, una para cada color, con el comando ‘uicontrol’.

c. El proceso continúa estableciendo la posición y el parámetro de valor de cada una de las barras y en este aspecto interactúa con la función CaColor creada para tal fin.

d. Luego se inicializa los valores de cada barra, para ser variados con el puntero del ‘mouse’ y presenta los cambios en la ventana 2 creada con ‘Image(i2)’ y ‘colormap(c2)’.

e. Las ventanas de entrada y salida pueden ser maximizadas.

f. Al final se graba el archivo procesado con 'arc_dest' y el comando 'imwrite'.

g. Cabe mencionar que la **función CaColor**, que aparece como un subprograma o subrutina, es un función creada para este programa con el comando 'function', al que MATLAB le atribuye la opción de **agregar nuevas funciones** si éstas son expresadas en los términos de otras funciones existentes. En este caso se establece los coeficientes para los tres colores primarios de video (Red, Green, Blue) y también las variaciones del rango de cada color del 0 al 1.

5.1.1. Programa para la manipulación de los parámetros de color de un archivo gráfico:

```
% UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
% FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA
% PROGRAMA DE TITULACIÓN PROFESIONAL POR ACTUALIZACIÓN DE
% CONOCIMIENTOS EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA
%
% ASESOR:          Dr. Jorge Del Carpio
% GRADUADO:        Enrique Adan Heriz Diaz
% TEMA:            Procesamiento de Imagenes
% ARCHIVO:         Procesol.m
% FECHA:           04-Ene-2002
% COMENTARIO:      Este programa lee un archivo *.bmp y permite
%                  variar los componentes de color
%
%*****
%
% Establecer parámetros de trabajo
%
%*****
%
clear all;
scrsz = get(0,'ScreenSize');
%
%*****
%
% Lee datos de archivo original
```



```

% Definir barra para color Green
%
c_G = uicontrol(fig, 'Style','slider','Position',[0 25 200 20],...
                'Min',0,'Max',1,'Value',1,...
                'Callback',[...
                'set(coe_G,"string",'...
                'num2str(get(c_G,"Value"))),'...
                'CaColor(i2,c2,c_R,c_G,c_B),]);
%
% Definir barra para color Blue
%
c_B = uicontrol(fig, 'Style','slider','Position',[0 50 200 20],...
                'Min',0,'Max',1,'Value',1,...
                'Callback',[...
                'set(coe_B,"string",'...
                'num2str(get(c_B,"Value"))),'...
                'CaColor(i2,c2,c_R,c_G,c_B),]);
%
% Inicialización de Valores de la barra
%
coe_R = uicontrol(fig,...
    'Style','text',...
    'Pos',[200 0 30 20],...
    'String',num2str(get(c_R,'Value')));
coe_G = uicontrol(fig,...
    'Style','text',...
    'Pos',[200 25 30 20],...
    'String',num2str(get(c_G,'Value')));
coe_B = uicontrol(fig,...
    'Style','text',...
    'Pos',[200 50 30 20],...
    'String',num2str(get(c_B,'Value')));

%
% Muestra imagen en procesamiento en ventana 2
%
image(i2);
colormap(c2);
%
%*****
%
% Salva imagen procesada en disco
%
%*****
%
%arc_dest = 'Globo2.bmp'; % Archivo grafico procesado
%imwrite(i2,c2,arc_dest);

```

5.1.2. Función implementada para variación de componentes de color de un archivo gráfico:

```

% UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
% FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA
% PROGRAMA DE TITULACIÓN PROFESIONAL POR ACTUALIZACIÓN DE
% CONOCIMIENTOS EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA.
%
% ASESOR:          Dr. Jorge Del Carpio
% GRADUADO:        Enrique Adan Heriz Diaz
% TEMA:            Procesamiento de Imagenes
% ARCHIVO:         CaColor.m
% FECHA:           04-Ene-2002
% DESCRIPCIÓN:    Esta función varia los componentes de color
%                  de un archivo *.bmp
%*****
%
function CaColor(i2,c2,c_R,c_G,c_B)
coef_R = get(c_R,'Value');%Coeficiente para componentes R de (RGB)
coef_G = get(c_G,'Value');%Coeficiente para componentes G de (RGB)
coef_B = get(c_B,'Value');%Coeficiente para componentes B de (RGB)
for k=1:1:256,
    c2(k,1)=coef_R*c2(k,1);
    c2(k,2)=coef_G*c2(k,2);
    c2(k,3)=coef_B*c2(k,3);
end
%
%*****
% Muestra imagen procesada en pantalla
%*****
%
image(i2);
colormap(c2);

```

5.1.1. Resultados del Programa en MATLAB

- Presentación de la imagen original (Sin procesamiento):

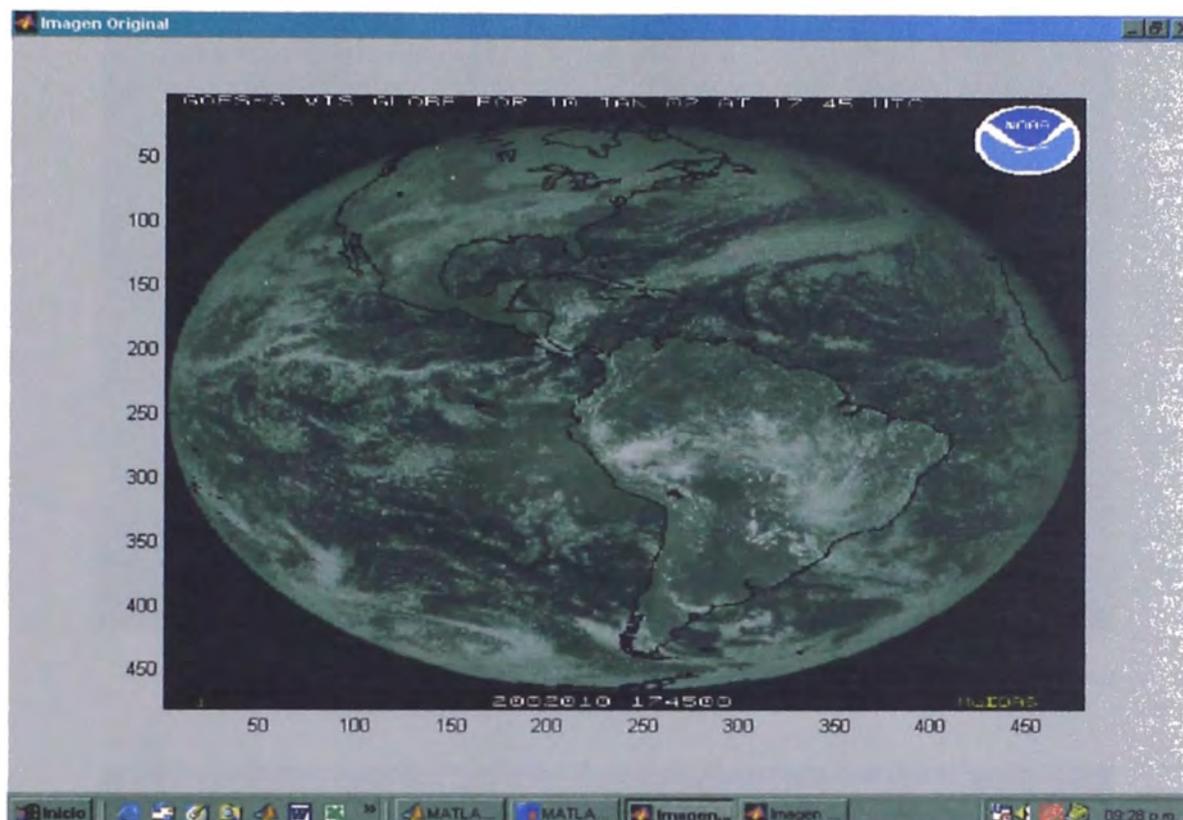


Figura 5.1: Imagen VIS satelital del GOES-8 del 10 de Enero del 2002, 14:45 UTC

- Gráficos de la simulación variando parámetros de componentes de color:

Con los programas se ha creado tres barras virtuales (R G B) para poder controlar los componentes de color de manera similar al ejemplo de la figura 3.18 referida al procesado de color en imágenes satelitales.

Se ha filtrado los colores, dejando en primera instancia sólo un color primario (Rojo, Verde o Azul) y luego se ha procedido a filtrar en diferentes porcentajes.

Este procedimiento permite resaltar en algunos casos los contornos y en otros ciertos elementos tales como nubes de diferentes clases.

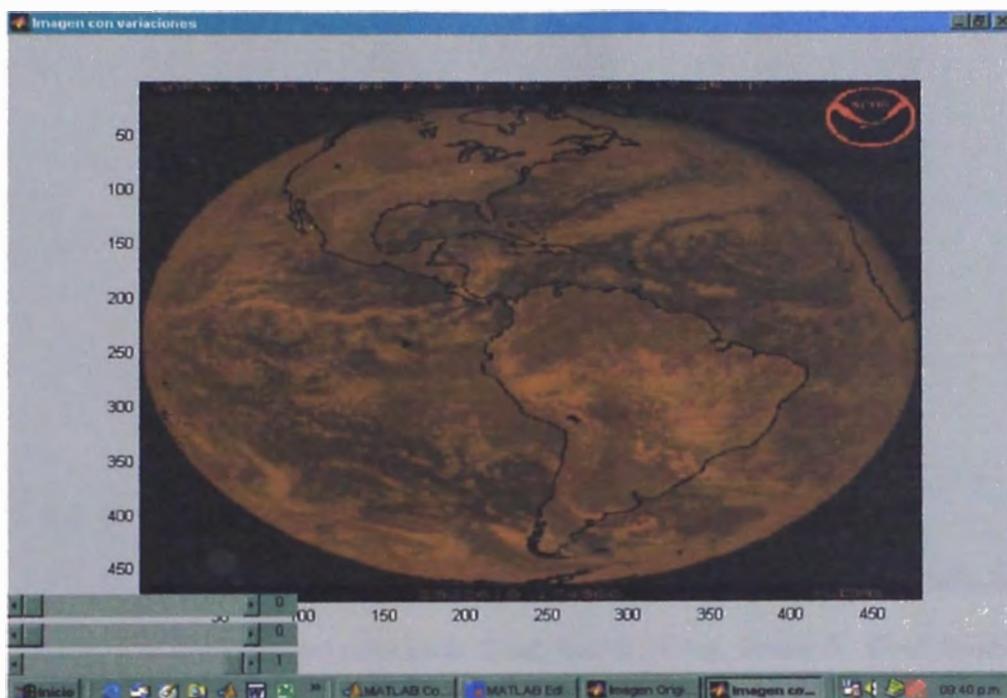


Figura 5.2: Resaltado del color rojo: $\text{Coef_Red}=1$, $\text{Coef_Green}=0$, $\text{Coef_Blue}=0$

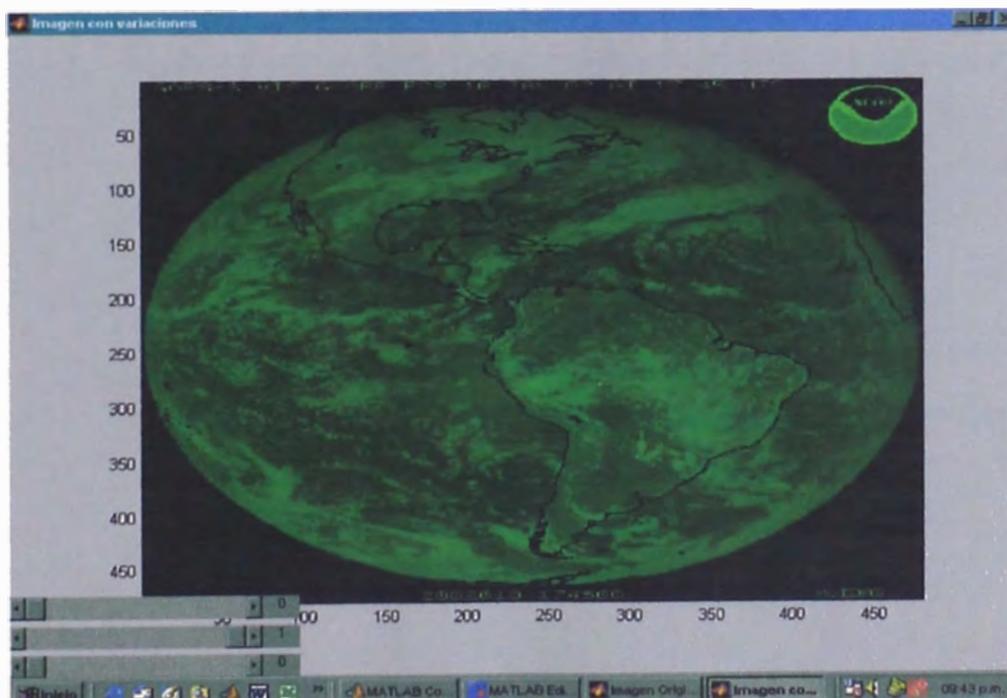


Figura 5.3: Resaltado del color verde: $\text{Coef_Red}=0$, $\text{Coef_Green}=1$, $\text{Coef_Blue}=0$

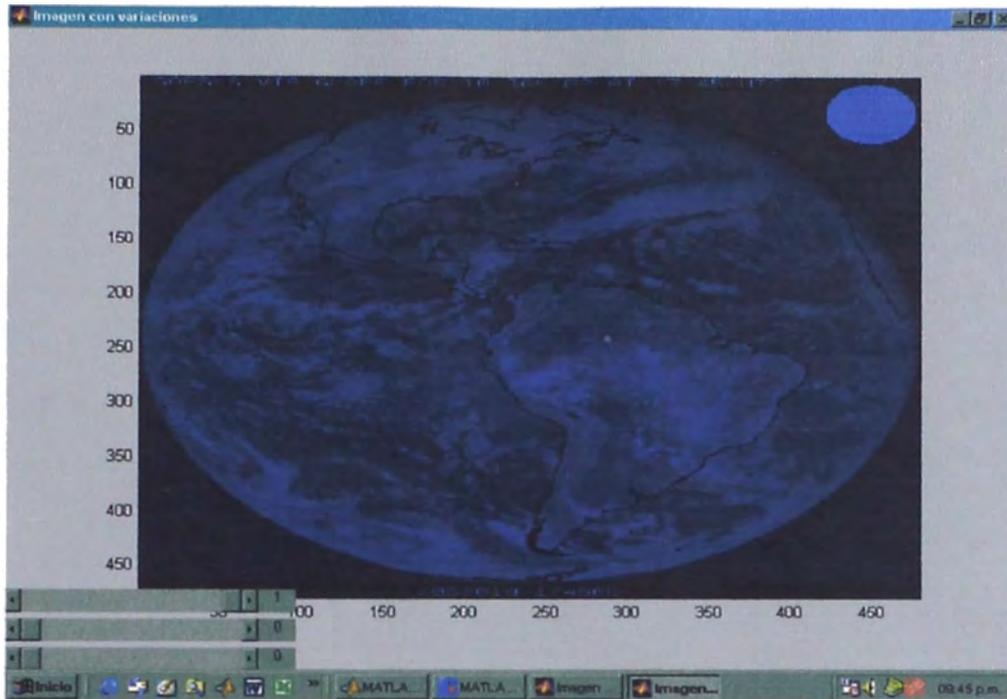


Figura 5.4: Resaltado del color azul: $\text{Coef_Red}=0$, $\text{Coef_Green}=0$, $\text{Coef_Blue}=1$

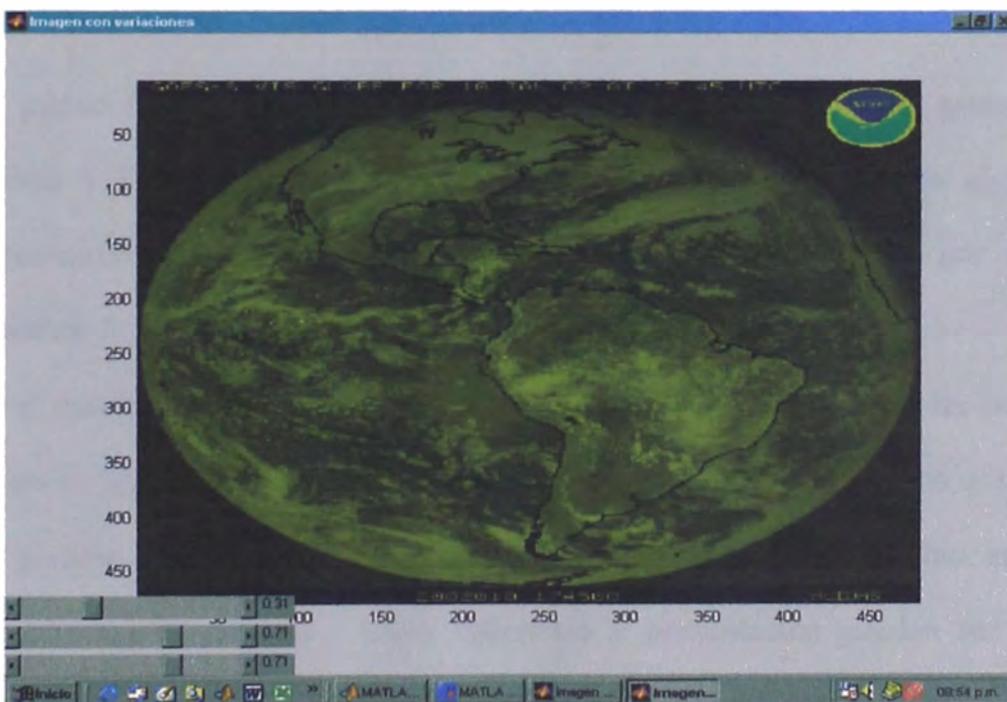


Figura 5.5: Variaciones con predominio del rojo y verde: $\text{Coef_Red}=0.711$,
 $\text{Coef_Green}=0.709$, $\text{Coef_Blue}=0.300$

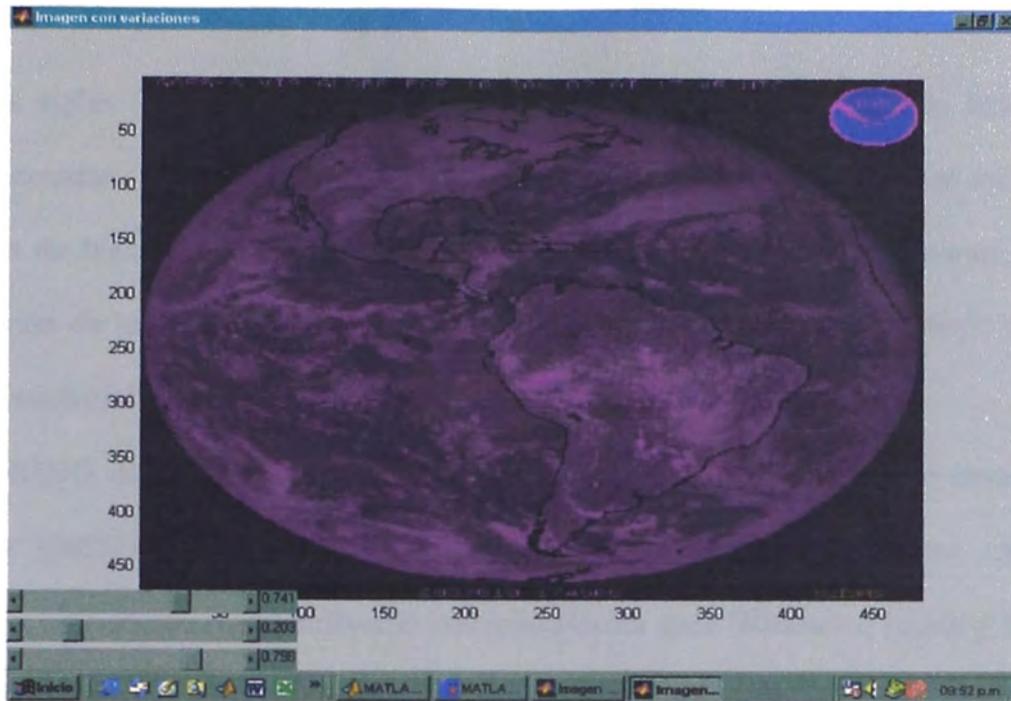


Figura 5.6: Variaciones con predominio del Rojo y Azul: $\text{Coef_Red}=0.713$,
 $\text{Coef_Green}=0.207$, $\text{Coef_Blue}=0.746$

5.1.2. Comentarios

- Se puede introducir variaciones en los parámetros de archivos gráficos usando rutinas y funciones de MATLAB, las cuales se fundamentan en algoritmos de procesamiento de señales, expuestos en el capítulo III, como por ejemplo la ecuación 3.1.
- En el caso particular de esta aplicación, se han hecho variaciones a las componentes de color del archivo y se consiguen variantes en la presentación de los mismos.
- Es posible introducir otro tipo de variaciones, tales como cambio en el brillo, tonalidades, textura, etc. Cuya aplicación y presentación pueden ser motivo de ulteriores trabajos de investigación.

5.2. Procesamiento de imágenes con el SPRING

Las siglas SPRING corresponden al Sistema de Procesamiento de Informaciones Georeferenciadas. Este es un sistema de información geográfica (GIS) y al mismo tiempo un sistema de tratamiento de imágenes obtenidas mediante percepción remota que realiza la integración de las representaciones de datos matriciales (“estructura raster”) y datos con estructura vectorial en un único ambiente.

SPRING es un producto desarrollado por el Instituto Nacional de Investigaciones Espaciales (INPE) de Brasil con la cooperación de otras instituciones científicas y tecnológicas. Consiste en un software multiplataforma para Windows, Linux y Solaris. Es de acceso libre, previa suscripción (Ver referencias de la INTERNET)

El SPRING se encuentra actualmente en su versión 3.5.1 y está dividido en tres módulos o aplicativos que son descritos a continuación:

- **impima:** Su objetivo es la lectura de imágenes de los satélites de LANDSAT, SPOT y NOAA.
- **spring:** Es el módulo principal para la entrada y procesamiento de datos que incluye el procesamiento de imágenes, análisis geográfico, consulta a bancos de datos, modelado digital de terrenos y la importación / exportación de datos.
- **scarta:** Tiene como objetivo la generación de mapas. Entre sus funciones está la generación interactiva de mapas, biblioteca de símbolos cartográficos y generación de salida HPGL y PostScript.

Para la entrada de imágenes de percepción remota en el SPRING las técnicas disponibles son:

- Lectura de cintas, CD-ROM o inclusive del disco duro, a través del módulo "Impima" y posteriormente el registro por el módulo "Spring" como apreciamos la situación de ima1 para ima2 e ima2 para ima3 en la figura 4.7.
- Importación directa por el módulo "Spring" a partir de otros formatos como TIFF, RAW y SITIM (situación de ima1 para ima3 en la figura siguiente).

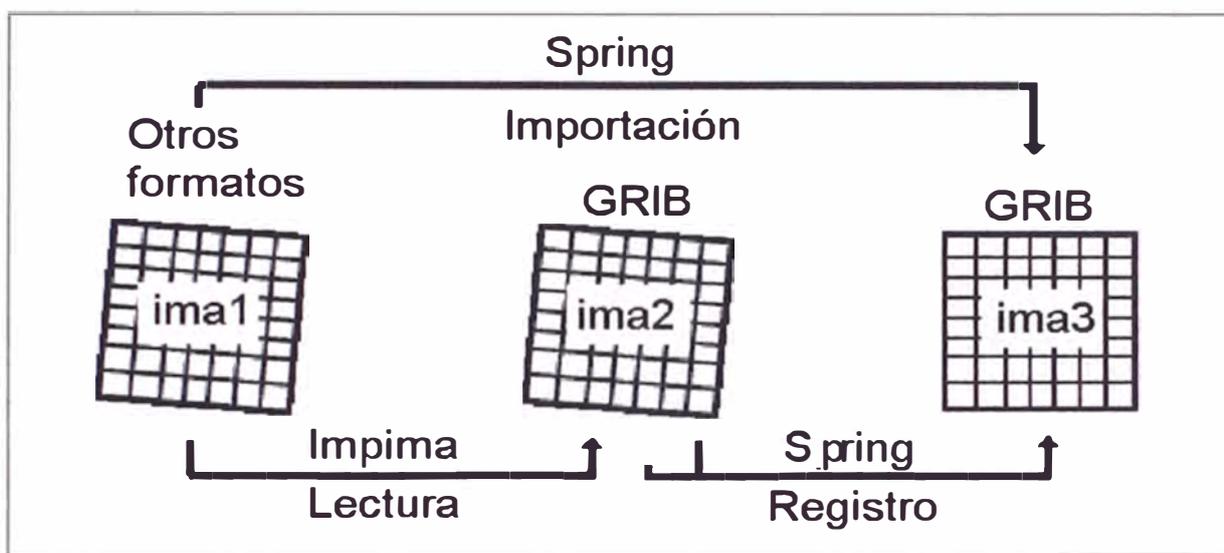


Figura 5.7: Como se puede observar, existen dos procedimientos diferentes para introducir una imagen en el módulo "Spring".

Veamos el significado de cada proceso:

- De **ima1 para ima2** es la utilización del módulo "Impima" para lectura de imágenes en diferentes formatos; BSQ, BIL, TIFF, RAW, GRIB y SITIM, y tiene como salida otra imagen en formato GRIB. En la imagen de salida la imagen puede ser menor o del mismo tamaño de la imagen de entrada;
- De **ima2 para ima3** se utiliza el módulo "Spring" para registrar la imagen GRIB leída por el "Impima". En este proceso el usuario debe corregir geográficamente la imagen, a través de puntos de control adquiridos por el usuario, y este archivo GRIB

es importado para un proyecto real previamente definido. Si se desea, se puede importar el archivo GRIB inclusive sin existir un proyecto, dejando que el sistema cree uno sin proyección cartográfica;

- De **ima1** para **ima3** se utiliza el "Spring" para importar imágenes en los diferentes formatos citados anteriormente. Esta importación puede ser para un proyecto real existente o a ser definido, desde que la imagen se ajuste perfectamente al área del proyecto, en función del número de líneas, columnas y resolución de la imagen. Se puede inclusive importar la imagen para un proyecto sin proyección, bastando informar los parámetros (resolución y número de líneas x columnas) de la misma.

NOTA: Internamente el módulo "Spring" almacena las imágenes en formato GRIB, donde cada banda (PI*) es representada por un archivo GRIB. Diferente de un archivo GRIB generado por el "Impima", que puede contener diferentes bandas de una misma escena.

5.2.1. Aplicaciones del SPRING para realzar y destacar un área determinada dentro de una imagen.

Para realizar estas aplicaciones se ha tenido las siguientes consideraciones:

- ❑ La imagen a procesar debe estar en el formato TIFF (Formato de archivo de imagen Targa –Traducido de ‘taged’).
- ❑ No se ha podido utilizar los bancos de datos de Spring, por lo que hemos creado un banco propio que fue denominado ‘BANCOSPRING’, dentro de esta carpeta se ha ingresado archivos de imágenes de formato TIFF para ser leídas por el sistema en uso.

(*) Siglas correspondientes a Plano de Información, son imágenes de una banda específica.

- Ha sido utilizado el software 'ACDSee' para realizar la conversión de imágenes satelitales al formato necesario (*.tif).

El módulo de lectura de imágenes INPIMA, solicita la inclusión de algunos parámetros que debemos tener presentes:

- a. **Especificar una BANDA:** En este lugar debemos tener presente que se refiere a las bandas espectrales en que transmite cada satélite, he aquí algunas:

- El LANDSAT /tm tiene siete (07) bandas espectrales, ver como referencia el capítulo II.
- El GOES retransmite en cinco (05) bandas espectrales.
- El SPOT/multilinear array tiene tres (03) bandas

- b. **Especificar la RESOLUCIÓN:** Se trata de la resolución espacial dada según el satélite y la banda utilizada, aquí especificamos algunas de importancia:

- En el LANDSAT /tm cada pixel es de treinta (30) metros.
- En el GOES, banda visible, es de un (01) kilómetro (Km.) y en las bandas de infrarrojo (4 y 5) es de cuatro (04) Km. y en su banda de vapor de agua (WV) es de ocho (08) Km.
- En el SPOT/multilinear array, es de veinte (20) metros y en pancromático es de diez (10) metros

5.2.2. Procedimiento de selección y visualización de imagenes TIFF:

- Inicializamos el Impima y abrimos el archivo Global que utilizamos en MATLAB, a fin de emplearlo en esta experiencia. Se trata de una imagen VIS del satélite GOES-8, por lo tanto corresponde escribir en los casilleros:

BANDA = 1,

RESOLUCIÓN = 1

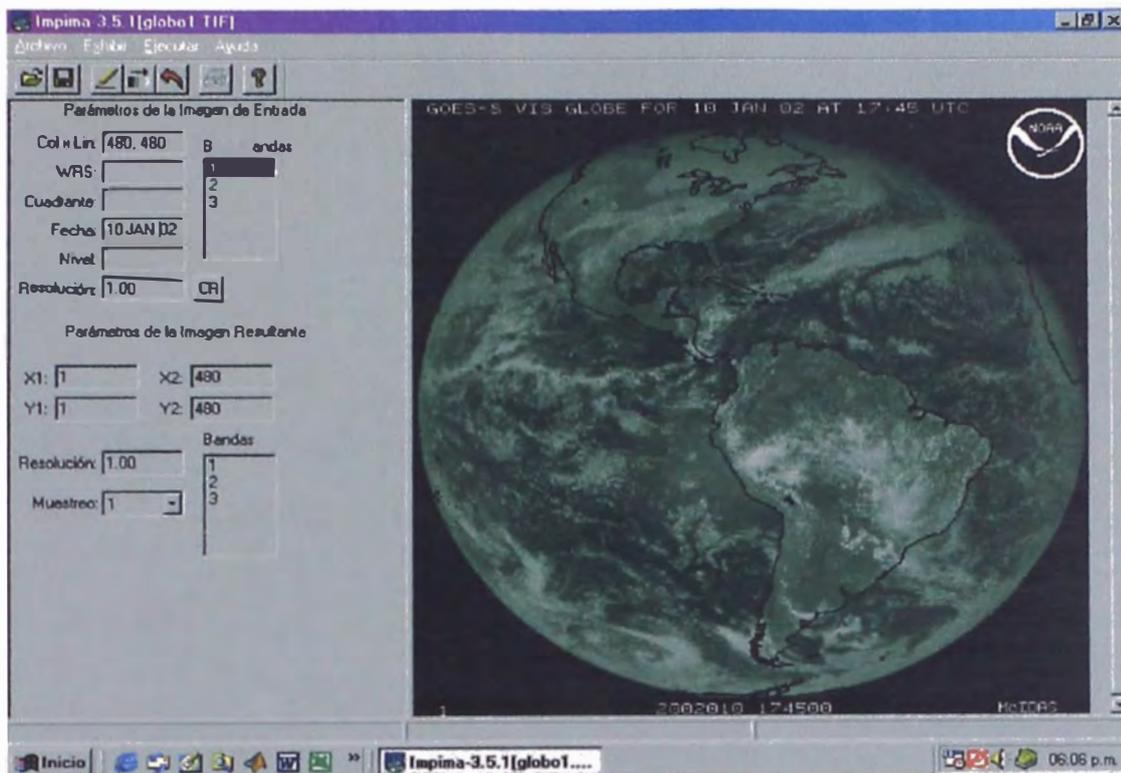


Figura 5.8: Imagen original VIS del GOES-8

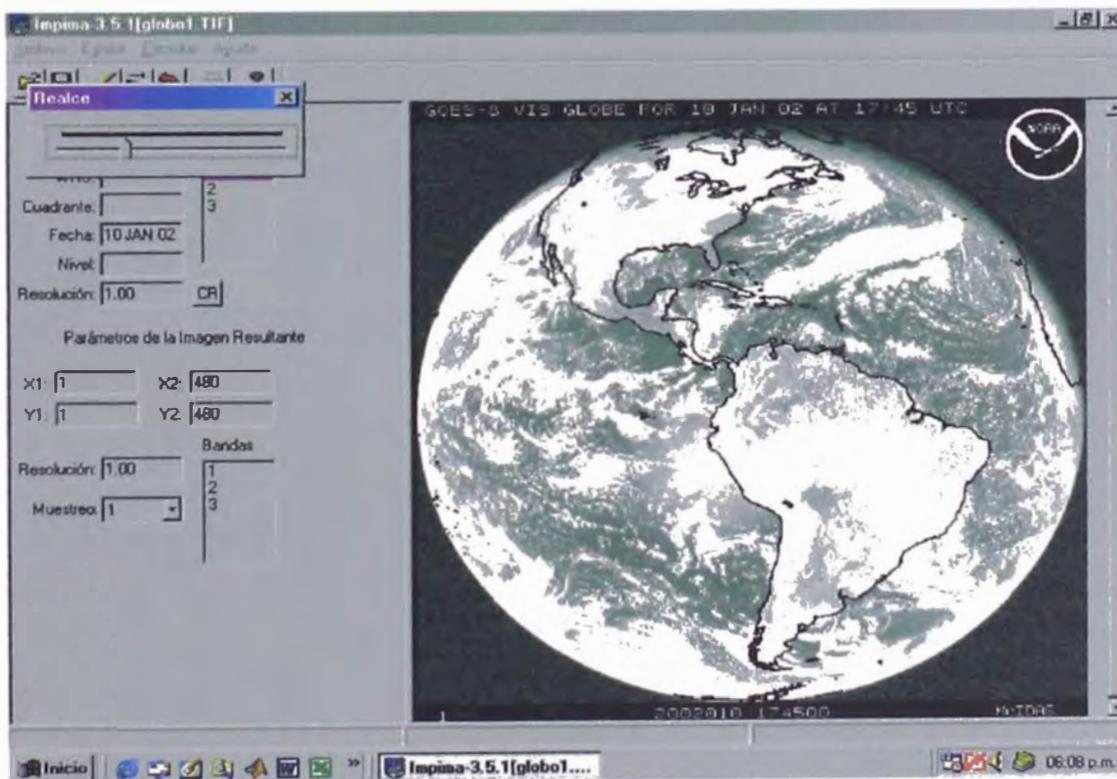


Figura 5.9: La imagen ha sido realzada y se distinguen mejor los contornos del continente

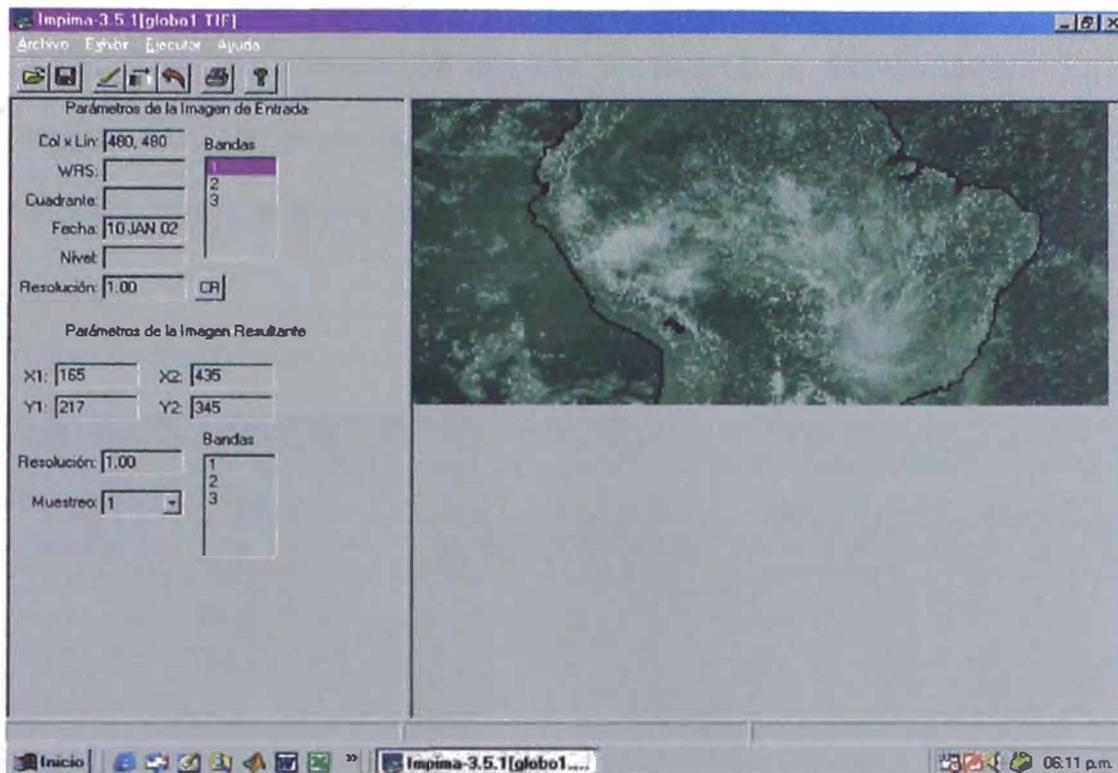


Figura 5.10: De la imagen original se ha realizado un 'zoom' para destacar la región central de Sudamérica, en este caso vemos el territorio peruano con los países vecinos y los dos océanos.

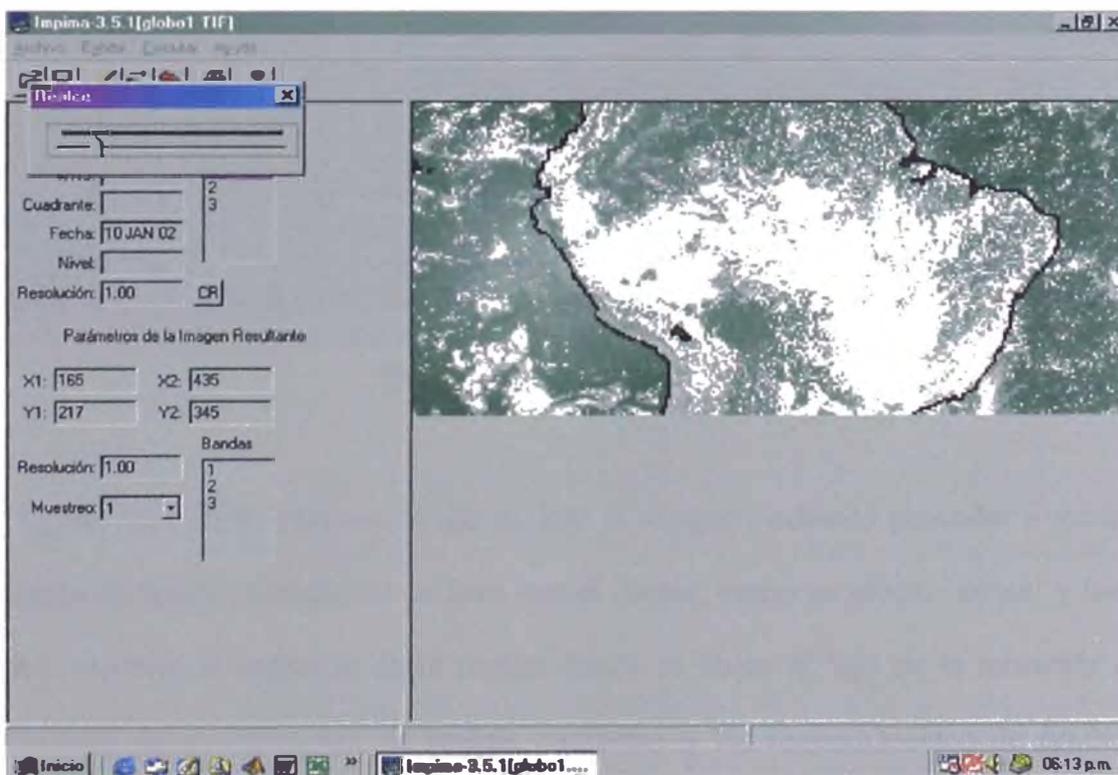


Figura 5.11: Del 'zoom' efectuado realizamos los contornos de la región seleccionada

- Nuevamente inicializamos el **Impima** y abrimos el archivo 'imagwv', a fin de emplearlo en esta experiencia. Se trata de una imagen WV del satélite GOES-8, por lo tanto corresponde escribir en los casilleros:

BANDA = 3

RESOLUCIÓN = 8

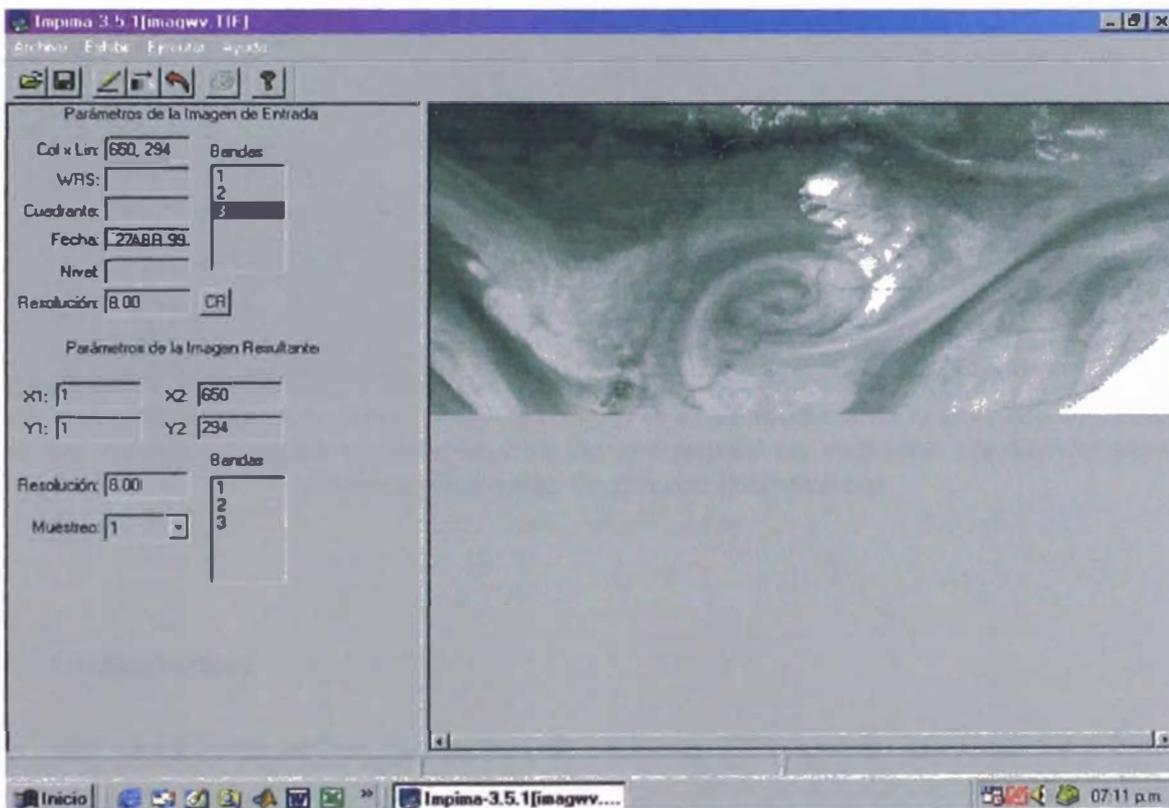


Figura 5.11: Imagen original WV del GOES de un ciclón de latitudes medias sobre Argentina y otras características nubosas.

Como en el caso anterior, luego de leer la imagen podemos proceder a modificarla, por ejemplo podemos seleccionar un área con el cursor, como un efecto 'zoom' y luego con [ejecutar] veremos el destaque de la región donde se ubica el 'ojo de la tormenta'. Cada procedimiento de modificación se realiza conforme a los requerimientos de predicción o diagnóstico del clima y entonces tiene un significado relevante para el usuario.

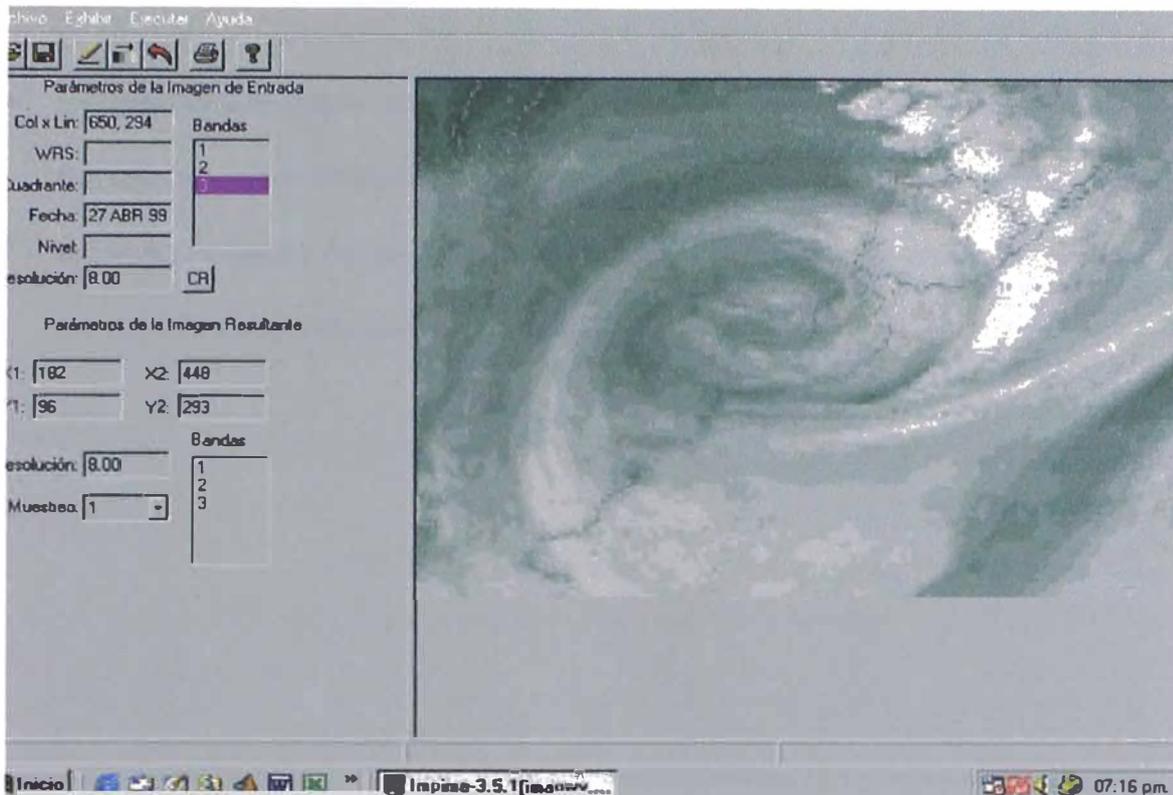


Figura 5.12: Apreciamos el 'zoom' sobre la imagen WV, en donde destaca el centro del ciclón así como una variedad de nubes en distintas altitudes que pueden ser evaluadas empleando una tabla relacional de niveles de gris con temperaturas.

5.2.3. Comentarios:

- Las variaciones en los parámetros de archivos TIFF usando los recursos y funciones del SPRING, se fundamentan en algoritmos de procesamiento de imágenes incorporados a un software dedicado. Pueden ser utilizados otros formatos que correspondan al diseño de este sistema tales como RAW y SITIM. Las imágenes transformadas son guardadas por SPRING en el formato GRIB ('Gridded Binary form').
- En los casos particulares de estas aplicaciones, se han hecho variaciones a los niveles de gris del archivo produciendo realces de contornos y se ha efectuado un acercamiento para la presentación de regiones específicas.

- Es posible introducir otro tipo de variaciones, tales como la transformación del formato de color RGB-HSI o la transformación inversa HSI-RGB, etc., además de todos los recursos de geoprocésamiento; cuyo desarrollo en otras aplicaciones puede ser materia de nuevos proyectos de investigación.

CONCLUSIONES

1. La interpretación de las imágenes de satélite y particularmente, la identificación del tipo de nubes y lo que puede inferirse de lo observado en las imágenes (en sus diferentes canales) y los procesos dinámicos y termodinámicos que tienen lugar en la atmósfera terrestre, se ha convertido, desde el lanzamiento de los primeros satélites meteorológicos, en una tarea fundamental de todos los centros dedicados a la predicción meteorológica.

2. Conforme se ha ido avanzando en el conocimiento e interpretación de la información satelital, su uso se ha ido extendiendo rápidamente, sobre todo en lo que respecta a las tareas de análisis, diagnóstico y predicción a corto plazo. Esto se ha debido básicamente a que las imágenes de satélite proporcionan una ayuda inestimable en la identificación del estado de desarrollo de los distintos sistemas atmosféricos, el seguimiento de perturbaciones que van de la escala planetaria a la escala convectiva, en el estudio y observación de las interacciones que se producen en el sistema atmosférico, validación de los modelos numéricos de predicción, etc.

3. En este informe hemos realizado un repaso de algunos conceptos relativos a la atmósfera y a la radiación electromagnética emitida por el sol y por el sistema tierra-atmósfera, fundamentales para comprender la razón de la elección de los distintos canales de los satélites. Hemos presentado el uso general de los distintos canales satelitales: Visible (VIS), infrarrojo (IR) y vapor de agua (WV) en relación con la interpretación de las imágenes de nubes vistas desde satélites así como algunos ejemplos vinculados a distintos tipos de nubes.

4. Hemos tratado acerca de las técnicas de tratamiento de imágenes, que son las herramientas fundamentales para interpretar, diagnosticar y predecir. El manejo cotidiano de estos recursos nos presenta un amplio espectro de posibilidades de investigación científica y tecnológica desde los algoritmos de tratamiento y transformación de imágenes hasta los equipos y sistemas que pueden ser implementados como aplicaciones dentro de las instituciones nacionales.

5. Además de lo expresado en los comentarios respectivos a las experiencias con MATLAB y SPRING, cabe mencionar que en el proceso de investigación se va encontrando otros sistemas de procesamiento que pueden ser tratados en un futuro próximo. Por ejemplo en la WEB de ASTRORED, México, se menciona el programa SURFER y en la WEB de PARALORZAS, España, hay un software de distribución gratuita denominado ESPAMETEO que ya lo hemos obtenido por INTERNET.

6. Sólo el procesamiento de imágenes satelitales aplicado a la meteorología presenta una amplia gama de posibilidades de investigación que recién comienza para muchos de nosotros. Este a su vez es apenas un segmento en cuanto a imágenes satelitales de diferente aplicación (geográfica, hidrológica, recursos naturales, etc.). Por el otro extremo, en el universo de la investigación biológica y todas las aplicaciones de la microscopía, hay muchas técnicas concomitantes que pueden ser aplicadas con software especializado.

7. Es recomendable instalar en nuestros laboratorios de investigación todos los sistemas de procesamiento que podamos obtener vía suscripción por distribución libre o por adquisición de la facultad. En muchos de estos casos más se requiere una inversión de tiempo de gestión que de recursos pecuniarios para optimizar nuestra formación y actualización profesional.

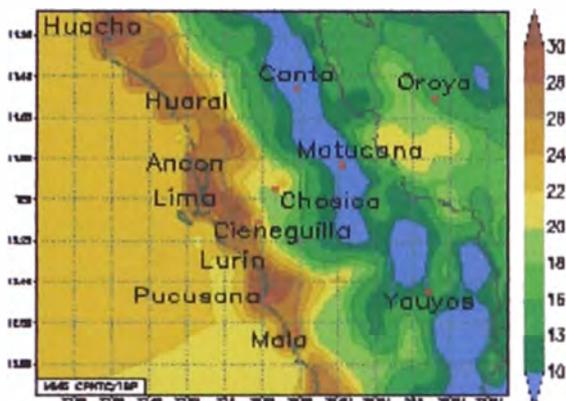
ANEXO 1

Informativo del Centro de Predicción Numérica del Instituto Geofísico del Perú (IGP)



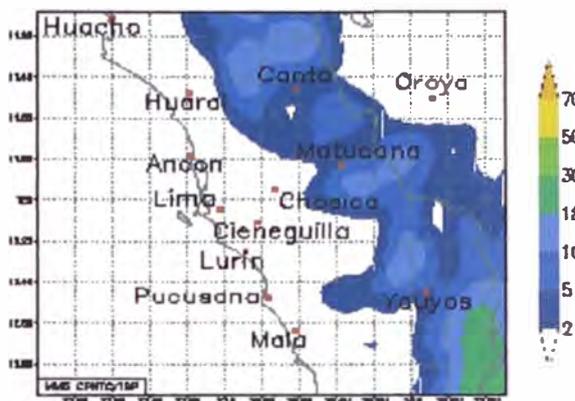
Pronóstico numérico para Lima

06 APR 2002



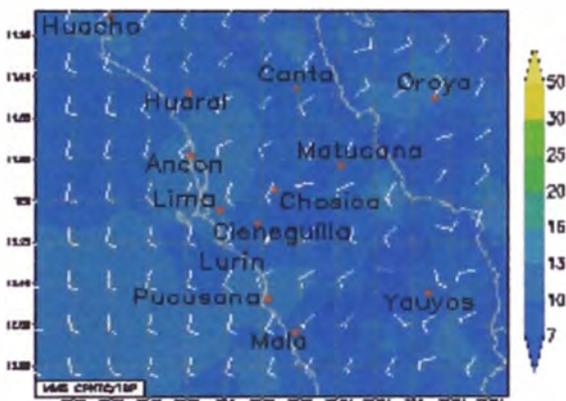
Temperatura del aire a la 1 pm
(42 horas de pronóstico)

06 APR 2002



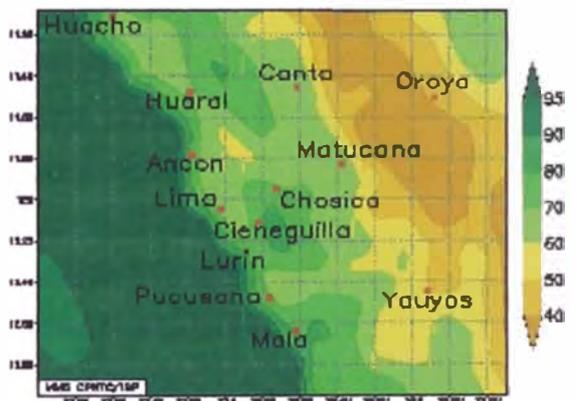
Precipitación acumulada de 1pm a 7pm
(48 horas de pronóstico)

06 APR 2002



Viento cerca a la superficie a la 1 pm
(42 horas de pronóstico)

06 APR 2002



Humedad relativa a la 1pm
(42 horas de pronóstico)



Comentarios y/o sugerencias, dirigirse a:
cpntc@chavin.lgp.gob.pe

Retornar a la página principal



ANEXO 2

Lista de satélites de percepción remota

ANEXO 2:

LISTA DE SATELITES DE PERCEPCIÓN REMOTA

Satélite (fecha de lanzamiento, país y operación)	Elementos de la órbita	Sensor observador			
		Nombre del Sensor	Espectro / frecuencia	IFOV	Cubrimiento
Landsat - 1 (1972) " - 2 (1975) (USA) Retirados	Sincronizada con el sol Altura: 915 km. Inclinación 99 ° Recurrencia: 18 días	MSS (Sistema barredor Multiespectral)	0.5 - 0.6 μ m 0.6 - 0.7 0.7 - 0.8 0.9 - 1.1	80 m	185 km.
		RBV (Cámara Vidicón de haz de retorno)	0.475 - 0.575 μ m 0.580 - 0.680 0.690 - 0.830	80 m	
Landsat - 3 (1978) (USA) Retirado	Sincronizada con el sol Altura: 915 km. Inclinación: 99 ° Recurrencia: 18 días	MSS (Sistema barredor Multiespectral)	0.5 - 0.6 μ m 0.6 - 0.7 0.7 - 0.8 0.9 - 1.1	80 m	185 km.
		RBV	0.505 - 0.750 μ m	38 m	98 km. x 2
Landsat - 4 (1982) Modo Standby " - 5 (1984) (USA) Operando	Sincronizada con el sol Altura: 705 km. Inclinación: 98 ° Recurrencia: 17 días	TM (Mapeador Temático)	0.45 - 0.52 μ m 0.52 - 0.60 0.63 - 0.69 0.75 - 0.90 1.55 - 1.75 2.08 - 2.35	30 m	185 km.
			10.40 - 12.50 μ m	120m	
		MSS (Sistema barredor Multiespectral)	0.5 - 0.6 μ m 0.6 - 0.7 0.7 - 0.8 0.9 - 1.1	80m	
Landsat - 6 (1993) Falló el lanzamiento " - 7 (1999) (USA) Operando	Sincronizada con el sol Altura: 705 km. Inclinación: 98 ° Recurrencia: 17 días	ETM + (Mapeador Temático mejorado plus)	0.50 - 0.90 μ m	13m x 15m	185 km.
			0.45 - 0.52 μ m 0.52 - 0.60 0.63 - 0.69 0.75 - 0.90 1.50 - 1.75 2.08 - 2.35	30 m	
			10.40 - 12.50 μ m	60 m	
SPOT -1 (1986) " - 2 (1990) Operando " - 3 (1993) (Francia) Se perdió	Sincronizada con el sol Altura: 832 km. Inclinación: 99 ° Recurrencia: 26 días	HRV (Alta Resolución visible)	0.50 - 0.59 μ m 0.61 - 0.68 0.79 - 0.89	20 m	1) 60 km. x 2
			0.51 - 0.73 μ m	10 m	
SPOT -4 (1996) (Francia) Operando	Sincronizada con el sol Altura: 822 km. Inclinación: 99 ° Recurrencia: 26 días	HRVIR (Alta Resolución visible e Infrarrojo Medio)	0.50 - 0.59 μ m 0.61 - 0.68 0.79 - 0.89 1.55 - 1.75	20 m	2) 60 km. x 2
		Pancromático	0.61 - 0.68 μ m	10 m	

Satélite (fecha de lanzamiento, país y operación)	Elementos de la órbita	Sensor observador			
		Nombre del Sensor	Espectro / frecuencia	IFOV	Cubrimiento
		VMI (Instrumento de monitoreo de vegetación)	0.43-0.4 μ m 0.50-0.59 0.61-0.68 0.79-0.89 1.58-1.75	1 Km	2000 Km.
ERS - 1 (1991) " - 2 (1994) (ESA- Agencia Espacial Europea) Operando	Sincronizada con el sol Altura: 785 km. Inclinación : 99 ° Recurrencia: 3 días 35 días 176 días	AMI (INSTRUMENTACION DE MICROONDAS ACTIVAS)			
		Modo SAR	5.3 GHz.	30 m	100 km.
		Modo Onda		5 km. x 5 km	-
		Modo Viento		50 km.	500 km.
		RA (Radar altímetro)	13.8 GHz.	-	-
		ATSR / M (Radiómetro barredor a lo largo de la trayectoria/ Resonancia de microondas)		1 km.	500 km
		Radiómetro IR Termal	1.6 μ m 3.7 11 12		
Resonancia de microondas	23.8 GHz. 36.5 GHz.	22 km.	-		
JERS - 1 (1992) (Japón) No opera	Sincronizada con el sol Altura: 568 km. Inclinación: 98° Recurrencia: 44 días	OPS (Sensor Optico) VNIR (Radiómetro visible e IR cercano)	0.52 - 0.60 μ m 0.63 - 0.69 0.76 - 0.86	18m x 24m	75 km.
		SWIR (Radiómetro de longitud de onda corta del infrarrojo)	1.60 - 1.71 μ m 2.01 - 2.12 2.13 - 2.25 2.27 - 2.40		
		SAR (Radar de Apertura Sintética)	1.275GHz Polarización HH	18m x 18m (3 Look)	
IRS - 1A (1988) " - 1B (1991) " - 1C (1993). Operando " - 1D (1997). Operando (India)	Altura: 904 km. Inclinación 99° Recurrencia: 22 días	LISS - I (Sistema de barrido Lineal de Imágenes)	0.45 - 0.52 μ m 0.52 - 0.60 0.63 - 0.69 0.76 - 0.90	73m.	146 Km.
		LISS - II	0.45 - 0.52 μ m 0.52 - 0.60 0.63 - 0.69 0.76 - 0.90	36.5m	73 Km. X 2

Satélite (fecha de lanzamiento, país y operación)	Elementos de la órbita	Sensor observador			
		Nombre del Sensor	Espectro / frecuencia	IFOV	Cubrimiento
		L I S S - III	0.52-0.59 μ m 0.62-0.68 0.77-0.86 1.55-1.70	23.5 m. (visible) 70.5 m. (RIR)	141 X 141 Km
		PAN (pancromáticos)	0.5 – 0.75 μ m	5.8 m	70 x 70 km
		WIFS (wide field sensor)	0.62 – 0.68 μ m 0.77 – 0.86	188 m	810 x 810 Km.
		S M M R (Barredor muticanal de Radiómetro de microondas)	6.6 GHz 10.69 18.0 21.0 27.0	121 x 79Km ² 74 x 49 44 x 29 39 x 25 21 x 14	660 Km
SEASAT - 1 (1978) (USA) No está operando	Sincronizada con el sol Altura: 790 km. Inclinación : 108° Recurrencia: 105 – 165 días	A L T Altímetro	13.5 GHz	1.6 – 12 km	2.4 – 12 Km
		S A S Escaterómetro de microondas	14.595 GHz.	50 x 50 Km ²	1500 Km
		S A R Radar de Apertura Sintética	1.2748 Ghz.	25 x 25 Km ² (4 look)	100 Km.
		V I R R Radiómetro Visible e Infrarrojo	0.5 – 0.7 μ m	2 Km.	2.280 Km.
			10.5 – 12.5 μ m	4 Km.	
RADARSAT (1994) (Canadá) Operando	No sincronizada con el sol Altura: 793 – 821 km. Inclinación : 99° Recurrencia: 24 días	S A R Radar de Apertura Sintética <i>Angulo de incidencia:</i> 20 – 49 °	5.3 GHz	25m x 28m (4 look)	100 Km.
		Modo Amplio <i>Angulo de incidencia:</i> 20 – 31°		30 – 48m x 28 m (4 look)	165 Km.
		Modo Amplio 2 Angulo de incidencia: 31 – 39 °		25 – 32 m x 28 m (4 look)	150 Km.
		Modo de Resolución fina <i>Angulo de incidencia:</i> 37 – 48 °		9 – 11 m x 9m (1 look)	45 Km.
		Modo ScanSAR (N) <i>Angulo de incidencia:</i> 20 – 40 °		50m x 50m (2 – 4 look)	305 Km.

Satélite (fecha de lanzamiento, país y operación)	Elementos de la órbita	Sensor observador			
		Nombre del Sensor	Espectro / frecuencia	IFOV	Cubrimiento
		Modo ScanSAR (W) <i>Angulo de incidencia:</i> 20 – 49 °		100 m x 100m (4 – 8 look)	510 Km.
		Modo Extendido (H) <i>Angulo de incidencia:</i> 50 – 60 °		19 – 22 m x 28m (4 look)	75 Km.
		Modo Extendido (H) <i>Angulo de incidencia:</i> 10 – 23 °		28 – 63 m x 28m (4 look)	170 Km.
TIROS – N / NOAA Series TIROS – N (1978) NOAA – 6 (1979) “ – 7 (1981) “ – 8 (1983) “ – 9 (1984) “ – 10 (1986) “ – 11 (1988) No operan “ – 12 (1993) Operando por requerimiento “ – I (1993) No opera “ – J (1995) Operando USA	Sincronizada con el sol Altura: 833 km. o Orbita: 870 Km. Inclinación : 99°	AVHRR (Radiómetro avanzado de alta resolución)	0.58 – 0.68µm ⁴⁾ 0.725 – 1.10 ⁵⁾ 3.55 – 3.93 10.30 – 11.30 11.50 – 12.50 ⁶⁾	1.1 Km.	2.700 Km.
		TOVS – SSU (Unidad ultrasónica de la estratósfera)	15 µ m 15 15	147 Km.	736 Km.
		TOVS – HIRS/2 (Alta resolución en resonancia y radiación de Infrarrojo)	14.96. 4.71 µm 14.49. 14.22 13.97. 13.64 13.35. 11.11 9.71. 8.16 7.33. 6.72 4.57. 4.52 4.46. 4.40 4.24. 4.00 3.76. 0.69	20 Km.	2.200 Km.
		TOVS – MSU (Unidad de resonancia de Microonda)	50.31 GHz 53.73 54.96 57.95	110 Km.	2.347 Km.
		SBUV / 2⁷⁾ Experimento de backscatter solar de rayos ultra violeta	0.2520 ~0.339µm 12 Bandas	169.3 Km.	-
		ERB⁸⁾ Experimento de balance de radiación de la tierra)	0.2 – 50.0 µm 8 Bandas	67.5 Km.	-
NOAA – siguiente serie NOAA –K (1998) Operando	Sincronizada con el sol Altura: 833 km. o Orbita: 870 Km. Inclinación 99°	AVHRR / 3 (AVHRR) Modelo 3	0.58 – 0.68 µm	0.5 Km.	2.700 Km.

Satélite (fecha de lanzamiento, país y operación)	Elementos de la órbita	Sensor observador			
		Nombre del Sensor	Espectro / frecuencia	IFOV	Cubrimiento
			0.82 – 0.87 1.57 – 1.78 ⁹⁾ 3.55 – 3.93 ⁹⁾ 10.30 – 11.30 11.50 – 12.40	1.0 Km.	
		TOVS – HIRS / 2	14.96, 4.71 μm 14.49, 14.22 13.97, 13.64 13.35, 11.11 9.71, 8.16 7.33, 6.72 4.57, 4.52 4.46, 4.40 4.24, 4.00 3.76, 0.69	20 Km.	2.200 Km.
		ASMU – A (Resonancia de microondas avanzado A)	23.0 – 90.0 GHz 15 Bandas	40 Km.	2.240 Km.
		AMSU – B	90.0– 183.0 GHz 5 Bandas	15 Km.	
		SBUV / 2 (Experimento de barredor solar de rayos ultra violeta)	0.2520 – 0.3398 μm 12 Bandas	169.3 kM	-
ADEOS (1996) No opera (Japón)	Sincronizada con el sol Altura: 797 km. Inclinación : 99° Recurrencia: 41 días	OCTS (Barredor de temperatura y color del Océano)	0.402 – 0.422 μm 0.433 – 0.453 0.480 – 0.500 0.510 – 0.530 0.555 – 0.575 0.655 – 0.675 0.745 – 0.785 0.845 – 0.885 3.55 – 3.85 8.25 – 8.75 10.5 – 11.5 11.5 - 12.5	700 m	1.400 Km.
		AVNIR (Radiómetro avanzado del visible E IR cercano)	0.40 – 0.50 μm 0.52 – 0.62 0.62 – 0.72 0.82 – 0.92 0.52 – 0.72 μm	16 m 8 m	80 Km. ¹⁰⁾
		NSCAT (Escaterómetro de la NASA)	13.995 GHz	25 Km.	1.200 Km.
		TOMS (Espectrómetro de Mapeo del Ozono total)	304.0 – 312.5 μm 325.0 – 317.5 332.6 – 360.0	42 Km.	2.795 Km.

Satélite (fecha de lanzamiento, país y operación)	Elementos de la órbita	Sensor observador			
		Nombre del Sensor	Espectro / frecuencia	IFOV	Cubrimiento
		IMG (Monitor Interferométrico para gases de efecto de invernadero)	3 – 15 μm	8 Km.	20 Km.
		POLDER (Polarización y direccionalidad de la reflectancia de la tierra)	0.433 – 0.453 μm ¹¹⁾ 0.480 – 0.500 0.510 – 0.530 0.555 – 0.575 0.660 – 0.680 ¹¹⁾ 0.760 – 0.770 0.860 – 0.900 ¹¹⁾ 0.945 – 0.955	5 Km.	1.440 Km. X 1.920 Km.
		ILAS (Resonancia atmosférica mejorado)	0.753 – 0.784 μm 6.0 – 6.8 7.3 – 11.8		
IKONOS (septiembre de 1999) (USA) Operando	Sincronizada con el sol Altura: 681 km. Inclinación : 98.1° Recurrencia: 2.9 días con 1 m. de resolución y 1.5 días con 1.5 m de resolución	Pancromático Multiespectral	00.45 - 0.90 μm #1: Azul: 0.45 - 0.52 #2: Verde: 0.52 – 0.60 #3: Roja 0.63 - 0.69 #4: IRC: 0.76 - 0.90 (igual que Landsat 4&5 TM Bandas #1-4)	1 m. 4 m.	 13 Km. en el nadir

- 1) Visión del Angulo en el Nadir: $\pm 27^\circ$, por 0.6° de inclinación
- 2) 4 pixeles de 1Km de información están agrupados en un pixel 4Km.
- 3) V Polarización.
- 4) 0.58 – 0.90 μm , Instalado en TIROS – N.
- 5) Adicionado a AVHRR / 2.
- 6) 10.5 – 11.5 μm como en el NOAA - 8
- 7) Instalado en NOAA – 9. H. I
- 8) Instalado en NOAA – 9. 10
- 9) Canal 1.57 – 1.78 μm y canal 3.55 – 3.93 μm dividido por el tiempo observado
- 10) Angulo apuntado: $\pm 40^\circ$.
- 11) 3 Diferentes direcciones de polarización.

ANEXO 3

Alternativas a la Transformada de Fourier: La Transformada de Hartley

ANEXO 3: ALTERNATIVAS A LAS TRANSFORMADAS DE FOURIER:

La Transformada de Fourier no es el único método matemático para convertir la información obtenida en función del tiempo en información en función de las frecuencias.

- Una importante innovación en análisis espectral en los últimos años ha sido desarrollada finalmente por la Transformada de Hartley. Como ya se ha visto antes, la Transformada de Fourier asume que los datos con los que se operan son complejos (por ejemplo cada número tiene su componente real y su componente imaginario). En muchas técnicas espectroscópicas esto no es cierto, así que simplemente se colocan ceros en todas las componentes imaginarias, con lo que se malgastan la mitad de los datos. Algunas herramientas de la FFT han sido diseñadas por tener la ventaja de engañar a la FFT haciéndola pensar que con las relaciones de simetría tiene la parte real y la parte imaginaria de los datos aunque no es así. (Esto compensa cualquier ventaja de rapidez que la Transformada de Hartley tenga sobre la FFT).

La Transformada de Hartley es muy parecida a la Transformada de Fourier, pero es más conveniente en algunos casos porque no usa números complejos. La Transformada de Hartley viene dada por :

$$H(\sigma) = \int I(x) [\cos(2\pi\sigma x) + \text{sen}(2\pi\sigma x)] dx$$

donde los coeficientes están definidos como en la Transformada de Fourier.

Ésta ecuación tiene algunas ventajas sobre la Transformada de Fourier, siendo la más notable la ausencia de i . La Transformada de Hartley es simplemente la suma de la Transformada real e imaginaria que se obtiene de la Transformada de Fourier. La parte real [$C(\sigma)$] y la parte imaginaria [$S(\sigma)$] de la Transformada de Fourier puede sacarse de la Transformada de Hartley haciendo

$$C(x) = \frac{H(\sigma) + H(-\sigma)}{2}$$
$$S(x) = \frac{H(\sigma) - H(-\sigma)}{2}$$

Estos algoritmos de Hartley devuelven los números de onda positivos a la 1ª mitad del conjunto de datos, y los núms. de onda negativos a la 2ª mitad del conjunto de datos en orden inverso (por ejemplo el último dato es el 1^{er} número de onda negativo).

- Métodos de máxima entropía: (MEMs) fueron creados principalmente por Burg, aunque luego han sido revisados y corregidos, para el procesamiento de datos geográficos. Este algoritmo ha sido empleado por algunos

para generar espectros con “supersolución”, eso quiere decir una resolución que en teoría excede la que había con los datos que se utilizan. El método MEM compensa la resolución limitada de la Transformada de Fourier y resulta muy atractivo para aplicaciones donde las frecuencias están muy próximas y hay que identificarlas. La Transformada de Fourier normal solo puede aumentar su resolución aumentando los datos transformados (ejemplo interferogramas). Esto supone registrar registrando las caídas de inducción libres durante intervalos de tiempo más largos en RMN. El método MEM extiende la amplitud longitud de sus datos suponiendo como actuaría la función de autocorrelación con grandes desviaciones.

Un 2º tipo de transformada puede ser construida usando aproximaciones estadísticas para suponer la correcta composición de frecuencias de la señal. Un ejemplo es la llamada Aproximación Bayesian, la cual produce unos espectros con una resolución extremadamente alta.

- Noy y Horliak han descrito una aproximación para utilizar una base extrapolada para realizar las transformadas. Para la velocidad, las ondas cuadradas de elementos preseleccionados son utilizadas para averiguar en los interferogramas por plasma de acoplamiento inductivo (ICP). Se utiliza un circuito integrado acumulador-multiplicador de alta velocidad para hacer los cálculos en tiempo real. Esto tiene la ventaja de dar la información buscada en tiempo real antes, pero sacrifica la mayor cantidad de información acerca del entorno químico y la estructura multiplete dada por los espectrógrafos por Transformada de Fourier. Si se quiere reprocesar los datos se pueden recuperar solo los datos de los elementos preseleccionados. No se pueden averiguar los datos acerca de elementos no previstos como se haría con la Transformada de Fourier.

- Bjerge y Small han descrito sus aplicaciones para un filtrado selectivo que permiten generar también información en tiempo real. Esto simplemente es un filtrado digital implementando un banco de filtros de paso-banda preajustados a frecuencias específicas.

[volver al menú](#)

ANEXO 4

Información sobre meteorología y géneros de nubes (Paralorzas, Espameteo, España)

ANEXO 4:



Las Nubes

Información Meteorológica

NUEVO!
NUEVO! NUEVO!

Con el afán de dar un buen servicio a nuestros visitantes, hemos terminado un programa que muestra de un vistazo los valores necesarios para hacerte tu propia previsión meteorológica.

Dicho programa se llama EspaMeteo. Si deseas mas información pulsa el logo.



!!!PRUEBALO!!!



Nubes y mas nubes

Para los que querais echar un rápido vistazo a los tipos de nubes más habituales, aqui teneis un micro curso.

Todos en algún momento hemos dirigido la vista al cielo y observado las nubes. Las hemos visto oscuras, blancas, finas, densas, otras que producen truenos, rayos, granizo y hasta imaginamos figuras conocidas.

Para un mejor conocimiento de las nubes es necesario recordar que el agua está en constante transformación, pasando por tres procesos importantes: la evaporación, la condensación y la

precipitación, los cuales en conjunto se conocen como el ciclo hidrológico. Las nubes son el producto de la condensación del agua cuando -por algún mecanismo- el aire húmedo sube y se enfría. Es importante aclarar que las nubes no están hechas únicamente de vapor de agua como pudiera creerse, sino que además están constituidas por gotitas de agua y/o cristales de hielo que por su tamaño, forma y peso se encuentran suspendidas en el aire.

El tiempo reinante depende mucho del tipo de nubes que se formen en el cielo y, por eso, los meteorólogos se interesan por el estudio de la estructura y evolución de las mismas. Con el fin de facilitar su estudio, los científicos han clasificado a las nubes de distintas formas, por ejemplo por su aspecto y por la altura a la que se encuentran.

Y porqué la nubes son blancas?

Las gotas de agua que forman las nubes son mucho más grandes que las moléculas que dispersa la luz azul. Las nubes dispersan y reflejan todos los colores visibles que llegan a ellas. Por eso es que las nubes son blancas. Si la nube es muy densa, la luz no puede atravesarla totalmente, resultando en bases oscuras.

Aunque las nubes pueden considerarse como entidades individuales, su aspecto, siempre cambiante, puede entenderse como una clara prueba del comportamiento de la atmósfera algún tipo de circulación atmosférica tiende a producir nubes u otros a dispersarías De igual forma, diferentes combinaciones de presión, temperatura u humedad inhiben la formación de nubes. mientras otras pueden producir una espectacular sucesión de tipos o modelos. Las nubes se forman cuando el aire se eleva o se enfría hasta su punto de rocío, momento en el que el vapor de agua se condensa en diminutas gotitas de agua o en cristales de hielo. Estas gotículas son tan pequeñas o ligeras que flotan en el aire sin tener apenas peso suficiente para caer a tierra. Hay dos tipos básicos de nubes: nube estratiforme, que se forma con aire estable que se ve obligado a elevarse suavemente a lo largo de una rampa, y nube de desarrollo vertical, o convectiva, producida si el aire es inestable y las burbujas de aire liviano se elevan espontáneamente mediante corrientes de convección.

Las áreas de nubes en capa más extensas se forman a lo largo de los frentes y en vaguadas o senos de baja presión, donde las corrientes que convergen en las capas inferiores de la atmósfera obligan a elevarse al aire. Los tipos principales conocidos como estratos, nimbostratos, altostratos y cirrostratos de acuerdo con su altura y su espesor son bastante uniformes y suelen producir cielos encapotados. Los nimbostratos (nubes de lluvia) suelen aparecer como una masa gris oscura sin forma aparente, ya que toda su estructura o detalles se esconden tras la lluvia o nieve que cae. El altostrato es más alto y es más delgado, permitiendo que se trasluzca una luz solar bastante pálida, por fin, los cirrostratos, las más altas, están compuestas de cristales de hielo y suelen producir hermosos efectos ópticos, como las columnas y los halos solares. Por contraste, las nubes de desarrollo vertical o convectivas tienen, por regla general, una base muy baja pero un considerable desarrollo vertical una consecuencia visible del hecho de que están formadas por bolsas de aire cálido e inestable que se eleva con bastante rapidez. El tipo más común es el cúmulo, nube blanca con apariencia algodonosa típica del agradable tiempo veraniego, tendente a incrementarse durante el día cuando el sol más calienta, y que desaparece por la noche, cuando cesa la convección por el enfriamiento del suelo. En el mar, los cúmulos tienden a ser menos variables, porque la temperatura superficial del mar permanece estática a lo largo del día. La base de esta nube acostumbra a ser plana indicando el nivel al cual se ha alcanzado la temperatura del punto de rocío, mientras que el techo en forma de "coliflor" muestra el nivel alcanzado por las 'burbujas' ascendentes de aire húmedo y cálido. Las zonas de cielo claro entre las nubes cumuliformes son debidas a corrientes descendentes que surgen como compensación a las ascendencias de las células convectivas.

Con aire más inestable, la cima de las nubes cumuliformes evoluciona hasta que finalmente su techo adopte una apariencia fibrosa, mostrando que sus niveles más altos han alcanzado el nivel de congelación. Esta nube congelada está formada por cristales de hielo y con frecuencia los vientos de niveles superiores la empujan horizontalmente para formar una estructura característica en yunque, la inconfundible "marca registrada" de una nube cumulonimbo madura o una "masa de cúmulos", que preceden a una tormenta.

El vapor de agua no se condensa automáticamente tan pronto como el aire se satura; de hecho, el aire producido en condiciones de laboratorio, perfectamente limpio, puede alcanzar una humedad relativa del 80 por ciento antes de que se empiecen a formar las gotitas de forma espontánea. En

la naturaleza esto no sucede: el aire está lleno de finas partículas (aerosoles) que actúan como núcleos y promueven la condensación tan pronto como se ha alcanzado la saturación. Las gotitas así formadas son diminutas incluso en comparación con las más pequeñas de la lluvia: su diámetro medio es de 20 micras (una milésima de milímetro). De forma similar, en una nube, el aire se puede enfriar por debajo de 0°C sin que las gotitas de agua se transformen en cristales de hielo. La congelación espontánea sólo aparece a -40°C o menos, pero la presencia de núcleos de hielo asegura que la congelación empiece normalmente a -20°C; una vez formados unos pocos cristales de hielo, el proceso se acelera rápidamente.

En cuanto a su aspecto, las nubes se clasifican en:

Estratiformes - desarrolladas horizontalmente, de poco espesor vertical y se extienden como un manto uniforme en el cielo, cubriendo una gran área; la lluvia es de carácter leve o continuo.

Cumuliformes - desarrolladas verticalmente en grandes extensiones; surgen aisladas; por lo general la lluvia es de fuerte intensidad, pero de carácter local. Pueden ser líquidas (constituidas por gotitas de agua), sólidas (constituidas por cristales de hielo) o mixtas (constituidas por gotitas de agua y cristales de hielo).

Esta nomenclatura está basada en los nombres latinos stratus (allanado o extendido) y cumulos (cúmulo o montón).

Tipos de nubes

Las nubes están divididas en 4 grandes grupos. Cada grupo depende de la altura a la que se encuentre la base de las nubes:

Grupo	Altura de la Base de las Nubes	Tipo de Nubes
Nubes altas	Trópicos: 6000-18000m Latitudes medias: 5000-13000m Region polar: 3000-8000m	Cirrus Cirrostratus Cirrocumulus
Nubes Medias	Trópicos: 2000 - 8000m Latitudes medias: 2000-7000m Region polar: 2000-4000m	Altostratus Alto cumulus
Nubes Bajas	Trópicos: superficie-2000m Latitudes medias: superficie-2000m Region polar: superficie-2000m	Stratus Stratocumulus Nimbostratus
Nubes con Desarrollo Vertical	Trópicos: hasta los 12000m Latitudes medias: hasta los 12000m Region polar: hasta los 12000m	Cumulus Cumulonimbus

Si quieres ver fotos de nubes según tipo o buscarlas por su nombre científico, aquí tienes un pequeño atlas de nubes.

Nombre o grupo:



Nombre



Mnemotécnico



Enviar

GENEROS DE NUBES

Las nubes se clasifican en diez tipos principales denominados géneros, estos a su vez se subdividen en especies y variedades. Por esta razón se dice que las nubes son como las familias, y cada una de ellas tiene su nombre y apellido.

La descripción y abreviaturas de los diez géneros de nubes son:

Cirrus (Ci): nubes separadas en forma de filamentos blancos y delicados, o de bancos, o de franjas estrechas, blancas del todo o en su mayor parte. Estas nubes tienen un aspecto delicado, sedoso o fibroso y brillantes.

Cirrocumulus (Cc): banco, manto o capa delgada de nubes blancas, sin sombras propias, compuestas de elementos muy pequeños en forma de glóbulos, de ondas, etc., unidos o no, y dispuestos más o menos regularmente; la mayoría de los elementos tienen un diámetro aparente inferior a un grado. Son señales de corrientes en chorro y turbulencia.

Cirrostratus (Cs): velo nuboso transparente, fino y banquescino, de aspecto fibroso (como de cabello) o liso, que cubre total o parcialmente el cielo, dejando pasar la luz del sol y la luna. No precipitan y por lo general producen fenómenos de halo (solar o lunar).

Altostratus (As): manto o capa nubosa grisácea o azulada, de aspecto estriado, fibroso o uniforme, que cubre total o parcialmente el cielo y que presenta partes suficientemente delgadas para dejar ver el sol, al menos vagamente, como a través de un cristal sucio. Está compuesta de gotitas superenfriadas y cristales de hielo; no forman halos; precipitan en forma leve y continua.

Alto cumulus (Ac): banco, o manto o capa de nubes blancas o grises, o a la vez blancas y grises, que tienen, generalmente sombras propias, en forma algodonada, compuestas de losetas, guijarros, rodillos, etc., de aspecto, a veces, parcialmente fibroso o difuso, aglomerados o no. Forman el popular "cielo empedrado".

Stratus (St): nubes muy bajas, originándose desde alturas cercanas al suelo hasta los 800 metros. Se presentan en capas nubosas por generalmente grises, con bases bastante uniformes. Cuando el sol es visible a través de la capa su contorno se distingue con facilidad. El stratus no produce fenómenos de halo, salvo en algunas ocasiones a muy bajas temperaturas. Aparecen con frecuencia en las mañanas sobre zonas montañosas. Las nieblas y neblinas son stratus que se forman sobre el suelo. La precipitación que produce es de tipo llovizna.

Stratocumulus (Sc): banco, manto o capa de nubes grises o blanquecinas, o ambos colores a la vez, que tienen casi siempre partes oscuras, compuestas de losas, rodillos, etc., de aspecto no fibroso (salvo el caso de "virga"), pegados o no. Dentro de esta nube los aviones experimentan cierta turbulencia.

Nimbostratus (Ns): capa nubosa gris, frecuentemente sombría, cuyo aspecto resulta velado por las precipitaciones más o menos continuas de lluvia o de nieve, las cuales, en la mayoría de los casos, llegan al suelo. El espesor de estas capas es en toda su extensión suficiente para ocultar completamente el sol. Produce precipitación intermitente y algunas veces intensa.

Cumulus (Cu): nubes aisladas, generalmente densas y de contornos bien delimitados, que se desarrollan verticalmente en protuberancias, cúpulas o torres, cuya gruesa parte superior se asemeja a menudo a una coliflor o a una palomita de maíz. Las porciones de estas nubes iluminadas por el sol son casi siempre blancas y brillantes; su base, relativamente oscura, es casi siempre horizontal. Son muy frecuentes sobre tierra durante el día y sobre el agua en la noche. Pueden ser de origen orográfico o térmico (convectivas). Presentan precipitaciones en forma de aguaceros.

Cumulonimbus (Cb): nube densa y potente, de considerable dimensión vertical, en forma de montaña o de enormes torres. Una parte de su región superior es generalmente lisa, fibrosa o estriada y casi siempre aplanada, esta parte se extiende frecuentemente en forma de yunque o de vasto penacho. Son las nubes que originan las tormentas, tornados, granisos. La base se encuentra

entre 700 y 1.500 m, y los topes (la parte superior de la nube) llegan a 24 y 35 km de altura. Están formadas por gotas de agua, cristales de hielo, gotas superenfriadas, focos de nieve y granizo. La turbulencia en los alrededores de estas nubes es muy fuerte, motivo por el cual los aviones deben evitarlas. Se acostumbra acomodar los distintos géneros de nubes según la altura a la que con mayor frecuencia se desarrollan sus bases. Así, los géneros de nubes se distribuyen según la altura de sus bases en: Nubes bajas: cumulus, stratus, stratocumulus, cumulonimbus. Nubes medias: altocumulus, altostratus y nimbostratus. Nubes altas: cirrus, cirrostratus y cirrocumulus. Nubes de desarrollo vertical: cumulonimbus. Se suele clasificar al cumulonimbus como un tipo especial de nube (nubes de desarrollo vertical), pues por sus dimensiones verticales y características físicas muy particulares, se distingue de todas las demás; algunos han dado por llamarle "la madre de las nubes".

Especies y variedades

- **Fibratus:** filamentos, sin ganchos o penachos en Ci y Cs.
- **Uncinus:** un cirro que acaba en gancho o penacho.
- **Spissatus:** cirro denso que forma a menudo la cima del Cb.
- **Nebulosus:** en forma de fino velo. en Cs y St.
- **Stratiformis:** en una amplia capa Ac y Sc.
- **Lenticularis:** lente bien definida o almendradas en Cc, Ac y Sc.
- **Castellanus:** como la almena de un castillo en Ci, Cc, Ac y Sc.
- **Floccus:** en pequeños penachos cumuliformes con la parte inferior rasgada en Ci, Cc, Ac y a veces en Sc.
- **Fractus:** en pedacitos rasgados, irregulares en St, Cu.
- **Humilis:** cúmulo con muy poco crecimiento vertical.
- **Mediocris:** cúmulo moderado con cimas deformadas.
- **Congestus:** cúmulo grande completamente "coliflor".
- **Calvus:** Cb con las partes superiores empezando a convertirse en fibrosas.
- **Capillatus:** Cb con características de cirro en la parte superior.

[Volver al Inicio](#)



BIBLIOGRAFÍA

- Algorithms for Image Processing and Computer Vision, 1997
James R. Parker
(Wiley Computer Publishing)
- An Introduction to Satellite Image Interpretation, 1997
E.D.Conway
(The Hopkins University Press, Baltimore)
- Atlas of satellite observations related to global change, 1993
R.J.Gurney; J.L.Foster; C.L.Parkinson, editors
(Cambridge University Press)
- Diccionario enciclopédico de términos técnicos (E/S), 1980/97
Javier L. S. Collazo
(McGraw-Hill/Interamericana de México)
- MATLAB, User's Guide, 1992/1994
(The Math Works Inc., Natick, MA)
- Satellite Meteorology; An introduction, 1995
S.Q.Kidder; T.H.Vonder Haar
(Academic Press, NY)
- Señales y sistemas, 1998
A. V. Oppenheim; A.S. Willsky; S.H.Nawab
(Prentice Hall)

- Solución de problemas de ingeniería con MATLAB, 1997
Delores M. Etter
(Prentice Hall)
- Textural features for image classification, 1973
R.M.Haralick, K.Shanmugam, I.Dinstein
IEEETrans.SMC-3:610-621.
- The Image Processing Handbook, 1999
John C. Russ
(CRC PRESS * IEEE PRESS)
- Tratamiento digital de imágenes, 1992/96
Rafael C. Gonzalez, Richard E. Woods
(Addison-Wesley/Diaz de Santos)
- Weather Satellites: Systems, data and Environmental Applications, 1990
P.K.Rao; S.H.Holmes; R.K.Anderson; J.S.Winston; P.E.Lehr, editors
503 AMS, Boston
- Referencias en la INTERNET

ALLMETSAT: <http://almetsat.com/img/>

ASTRORED: <http://www.astrored.org>

CONIDA: <http://www.conida.gob.pe>

ESPAMETEO: <http://www.paralorzas.com>

IGP: <http://www.met.igp.gob.pe>

IGP: cpntc@chavin.igp.gob.pe

MEDIOAMBIENTE: http://www.medioambiente.gov.ar/clima/imagen_goes

NASA: <http://www.earth.nasa.gov/goes>

NOAA: <http://www.saa.noaa.gov>

SENAMHI: <http://www.senamhi.gob.pe/>

SPRING: <http://www.inpe.br./spring/home>