

**UNIVERSIDAD DE MAGALLANES**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA**  
**DEPARTAMENTO DE ELECTRICIDAD**

**ANÁLISIS DE DATOS DIGITALES DE LOS SENSORES**  
**SATELITALES NOAA-AVHRR: EJEMPLOS DE APLICACIÓN**  
**EN LA REGIÓN DE MAGALLANES Y ANTÁRTICA CHILENA**

**AUTOR: LUIS MARCELO GALLARDO MARUSICH**

**PROFESOR GUÍA: VÍCTOR PÉREZ M.**

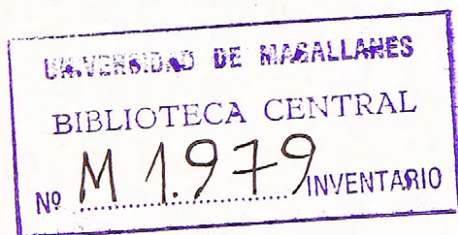
**PROFESOR PATROCINANTE: GINO CASASSA R.**

**PUNTA ARENAS, 1998**

UNIVERSIDAD DE MAGALLANES  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
DEPARTAMENTO DE ELECTRICIDAD

ANÁLISIS DE DATOS DIGITALES DE LOS SENSORES  
SATELITALES NOAA-AVHRR: EJEMPLOS DE APLICACIÓN  
EN LA REGIÓN DE MAGALLANES Y ANTÁRTICA CHILENA

Trabajo de titulación presentado en conformidad a los  
requerimientos para obtener el título de  
INGENIERO CIVIL EN ELECTRICIDAD.

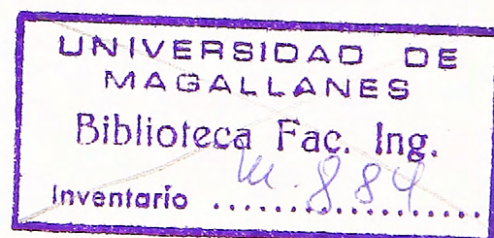


AUTOR: LUIS MARCELO GALLARDO MARUSICH

PROFESOR GUÍA: VÍCTOR PÉREZ M.

PROFESOR PATROCINANTE: GINO CASASSA R.

PUNTA ARENAS, 1998

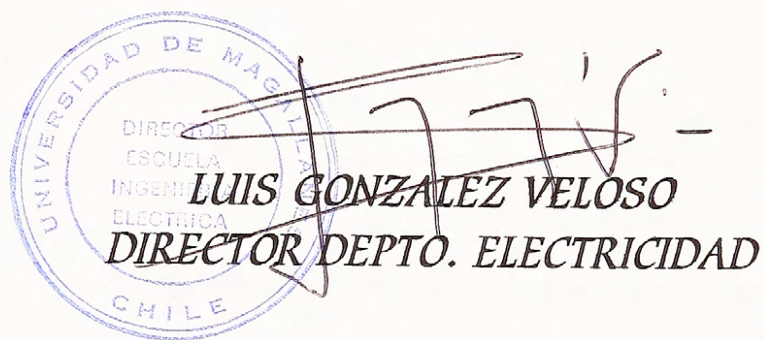


ESTA MEMORIA HA OBTENIDO LA SIGUIENTE CALIFICACIÓN:

NOTA MEMORIA : 98

NOTA EXAMEN : 98

NOTA FINAL : 98



*PUNTA ARENAS, agosto 31 de 1998.*

## AGRADECIMIENTOS

## AGRADECIMIENTOS

Esta tesis de titulación se la dedico en primer lugar a toda mi familia, con especial mención de mi madre por sus constantes “retos”, “empujones” y amor para salir adelante; a mi padre por su infinita paciencia y consejos; a mi hermano por las “largas conversaciones nocturnas acerca de nuestro futuro”; a mis abuelos Rebeca y Boriboy lamentablemente enfermos, y a mis abuelos María y Pablo por su eterno amor. Los quiero antes que nada, no lo olviden.

Estoy en permanente deuda con mi Profesor Patrocinante Don Gino Casassa R. quien me ofreció el tema, me apoyó siempre, aguantó mis temporales desapariciones, y tuvo la más grande paciencia para atender mis requerimientos. También entra en este recuento mi Profesor Guía Don Víctor Pérez S., por su generosidad hacia mi persona, y por haberme escuchado y atendido en el momento que lo requerí.

Un especial abrazo a Don Rubén Carvallo B. por haberme tendido su mano durante mi proyecto de especialidad, en un momento en que lamentablemente no sentí apoyo de la gente a mi alrededor, y que sin quien no hubiese podido egresar de mi carrera. Muchas gracias por su solidaridad, apoyo y rectitud; su actitud no la podré olvidar jamás.

Quisiera agradecer a mis amigos de siempre Carlos Cárdenas, Luis Ladouch y Boris Jelincic'; si todo va bien, espero poder celebrar con ustedes mi titulación; además a los profesores integrantes de la comisión Don Bedrich Magas K., José Rosales y Rolando Aguilar por leer y corregir en tiempo récord esta memoria.

Por el apoyo estructural agradezco al grupo encargado del laboratorio de ozono de la Universidad de Magallanes, quienes aportaron con las imágenes, manuales y programas computacionales. En especial destaco al actual profesor Don Rolando Aguilar por toda la ayuda directa que me brindó; te quedo debiendo una salida (cóbrala cuando quieras!).

No puedo olvidarme de ti, Marisol Kusánovic', y de tu madre; son muy pocos los que tienen la suerte de contar con amigas a toda prueba como ustedes. Sus retos y apoyo

incondicional me sirvieron para enderezar mi camino, excepto en aquella parte de mi vida que ustedes saben bien, y retomar los objetivos claves que a veces olvidaba.

A ti Boris Mihovilovic', amigo de toda una vida, por la esperanza depositada en mi y por estar en los momentos precisos en que necesitaba sentir una mano solidaria.

Al personal de la Universidad de Magallanes, profesores, compañeros y funcionarios que mantuvieron la fe en mi, y que ayudaron a completar mi formación como profesional y como persona.

También incluyo en esta lista a alguna polola que alguna vez me empujó a terminar mi tesis de titulación.

Finalmente agradezco a Dios por su inmenso amor, a pesar que muchas veces olvidaba que siempre permanecía a mi lado, y que es la razón de mi existencia.

Gracias a todo y todos

MARCELO

## RESUMEN

## RESUMEN

El presente trabajo de titulación es un estudio de las imágenes digitales obtenidas mediante los sensores AVHRR de los satélites NOAA, específicamente la obtención de temperaturas superficiales del mar, índices vegetacionales e identificación de hielo marino de la región de Magallanes y Antártica Chilena.

El desarrollo de la tesis comienza con una revisión de los principios físicos involucrados en el tema, y su conexión directa con el procesamiento e interpretación de imágenes satelitales.

Luego se describió y analizó el sistema NOAA-AVHRR instalado en la Universidad de Magallanes, incluyendo formato digital de los datos, recepción, archivo, procesamiento y exportación a distintos formatos.

Como parte de esta memoria se desarrolló el programa MAGMASAT\_NOAA (Marcelo Gallardo Marusich Aplicaciones Satelitales NOAA), en el lenguaje IDL 4.0, para procesar los datos y obtener los productos antes mencionados, en un ambiente Windows de fácil manejo, que no exige tener grandes conocimientos del tema para la elaboración de productos, pero sí una cierta experiencia en interpretación de imágenes satelitales, de forma de sacar más provecho a la información obtenida.

Finalmente, se establecen las conclusiones obtenidas a través del desarrollo de este trabajo y de las mejoras futuras que se pudieran aplicar, para lograr el éxito total y comercial de este sistema.

## INTRODUCCIÓN

## INTRODUCCIÓN

El análisis de imágenes captadas por sensores a bordo de satélites artificiales y el manejo digital de los datos por medio de computadoras, han revolucionado el estudio de la superficie terrestre y de los recursos naturales.

Existen dos tipos de sensores satelitales: pasivos y activos. Los sensores pasivos capturan la radiación emitida y/o reflejada por la superficie terrestre, energía que proviene del Sol. En cambio los sensores activos transmiten una señal electromagnética desde el satélite hacia la Tierra, recibiendo una señal reflejada en la superficie, siendo por tanto estos sensores radares espaciales. Posteriormente, los datos satelitales son transmitidos hacia estaciones terrestres para su almacenamiento, calibración y distribución a los usuarios. Tanto en el caso de los sensores activos como pasivos, se realiza un procesamiento cuantitativo y cualitativo de los datos proporcionados, obteniéndose como producto una imagen digital con valiosa información de las diferentes características de la superficie terrestre.

Gracias a un proyecto auspiciado por la Overseas Development Agency (ODA) del Gobierno Británico, se instaló en la Universidad de Magallanes (UMAG) una estación receptora de datos digitales de los satélites norteamericanos NOAA (U.S. National Oceanic and Atmospheric Administration), principalmente para estudios de monitoreo y predicción de la radiación ultravioleta y del ozono de la zona, pero también para el desarrollo de otras aplicaciones, tales como recursos pesqueros, forestales, hídricos, etc.

Los satélites NOAA orbitan la Tierra una vez cada 100 minutos, a una altura aproximada de 850 km, y cuentan a bordo con instrumentos TOVS (Tiros Operational Vertical Sounder) y AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer), un radiómetro que barre la superficie terrestre en cinco diferentes longitudes de onda: rojo visible, infrarrojo cercano, infrarrojo medio, y dos infrarrojos termales. La transmisión a la estación terrestre ubicada en la UMAG es recibida en tiempo real mediante una antena direccional instalada en el techo del Centro

Austral Antártico. La resolución espacial de la información AVHRR es de 1.1 km. Los datos son adquiridos en una trayectoria de 2400 km de ancho máximo, lo cual permite realizar estudios de carácter regional cubriendo extensas zonas. Los datos TOVS permiten obtener información de la atmósfera en sí, en el espectro infrarrojo, visible y microondas. En cambio, los datos AVHRR son útiles para inferir condiciones de la superficie terrestre.

Algunas de las posibles aplicaciones de los datos satelitales NOAA-AVHRR son:

- estudios oceanográficos.
- pesquería.
- vegetación.
- cobertura de nieves.
- estudios de glaciares.
- monitoreo de actividad volcánica.
- detección de incendios.
- rugosidad de la superficie terrestre.

## ÍNDICE

## ÍNDICE

<b>AGRADECIMIENTOS</b> .....	i
<b>RESUMEN</b> .....	iv
<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	iv
<b>ÍNDICE</b> .....	ix
<b>CAPITULO 1: PRINCIPIOS FÍSICOS DE LA PERCEPCIÓN REMOTA</b>	
1.1 Teoría electromagnética.....	2
1.2 Polarización.....	11
1.3 Efecto Doppler.....	13
1.4 Radiación termal.....	14
1.5 Efectos atmosféricos sobre las ondas electromagnéticas.....	22
1.6 Interacción de las ondas electromagnéticas con la superficie terrestre.....	29
1.6.1 Firmas espectrales de los minerales, de las rocas y de los suelos.....	34
1.6.2 Emisión térmica.....	39
<b>CAPITULO 2: DESCRIPCIÓN DE LOS INSTRUMENTOS AVHRR Y SU SISTEMA RECEPTOR DE DATOS EN TIERRA</b>	
2.1 Características generales de los satélites NOAA.....	42
2.2 Instrumentos AVHRR.....	45
2.3 Sistema de comunicaciones de los satélites NOAA.....	51
2.3.1 Tipos de modulación empleadas por el sistema de comunicaciones de los satélites NOAA.....	53
2.4 Descripción técnica del sistema de recepción satelital.....	55

2.4.1	Requerimientos básicos para una estación de recepción de imágenes	
	HRPT.....	55
2.4.2	Sistema BURL de recepción de datos HRPT.....	59
2.5	Sistema controlador de la antena.....	66
2.6	Sistema LARST.....	68

### **CAPITULO 3: CALIBRACIÓN DE DATOS AVHRR**

3.1	Calibración de los datos AVHRR de los canales 3, 4 y 5.....	72
3.1.1	Satélites NOAA 6-12.....	72
	3.1.1.1 Cálculos realizados por el sistema LARST.....	72
	3.1.1.2 Cálculos realizados por el programa MAGMASAT_NOAA.....	75
3.1.2	Correcciones para el satélite NOAA 14 realizadas por	
	MAGMASAT_NOAA.....	78
3.2	Calibración de los datos AVHRR de los canales 1 y 2.....	80
3.2.1	Cálculos realizados por el programa MAGMASAT_NOAA.....	80

### **CAPITULO 4: DETECCIÓN Y ELIMINACIÓN DE LAS NUBES DESDE LAS IMÁGENES HRPT/AVHRR**

4.1	Generalidades.....	86
4.2	Algoritmo para la detección de pixeles con presencia de nubes.....	90
	4.2.1 Verificación gruesa nubes.....	90
	4.2.2 Coherencia espacial de la temperatura.....	91
	4.2.3 Límite dinámico visible.....	91
	4.2.4 Ángulo cenital satelital límite.....	92
	4.2.5 Razón dinámica Ch2/Ch1.....	93
	4.2.6 Razón dinámica Ch2/Ch1.....	94

4.2.7	Diferencia de temperatura en los canales 4 y 5.....	94
4.2.8	Diferencia de temperatura en los canales 4 y 3.....	95
4.2.9	Diferencia de temperatura en los canales 3 y 5.....	95

## **CAPITULO 5: PROGRAMA MAGMASAT\_NOAA**

5.1	Generalidades.....	98
5.2	Interactive Data Language.....	98
5.3	MAGMASAT_NOAA.....	102

## **CAPITULO 6: APLICACIONES DE LAS IMÁGENES NOAA-AVHRR**

6.1	Generalidades.....	121
6.2	Mediciones infrarrojas multicanales de la temperatura superficial del mar.....	121
6.3	Identificación de áreas con hielo marino.....	126
6.4	Índices vegetacionales.....	129
6.5	Ejemplos de aplicación.....	132

<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>188</b>
--------------------------	------------

### **APÉNDICE:**

<b>APÉNDICE A:</b> Espectro electromagnético.....	<b>191</b>
<b>APÉNDICE B:</b> Glosario.....	<b>192</b>
<b>APÉNDICE C:</b> Estructura de la trama de datos HRPT.....	<b>196</b>
<b>APÉNDICE D:</b> Estructura de los datos TLE.....	<b>199</b>
<b>APÉNDICE E:</b> Estructura interna de un bloque.....	<b>200</b>
<b>APÉNDICE F:</b> Número central de onda para los satélites NOAA-9/10/11/12/14.....	<b>204</b>

<b>APÉNDICE G:</b> Algoritmo de la temperatura superficial del mar.....	206
<b>APÉNDICE H:</b> Referencias.....	211

**CAPITULO 1**

**PRINCIPIOS FÍSICOS DE LA PERCEPCIÓN REMOTA**

## CAPÍTULO 1: PRINCIPIOS FÍSICOS DE LA PERCEPCIÓN REMOTA

### 1.1 TEORÍA ELECTROMAGNÉTICA

A continuación se discuten los principios básicos de la propagación electromagnética, y de la generación de la radiación termal. La energía electromagnética, como la luz visible, ondas de radio, rayos ultravioleta, rayos X y otros, se comporta de acuerdo a la teoría básica de las ondas, con una velocidad de propagación en el vacío idéntica a la velocidad de la luz desplazándose en forma armónica y sinusoidal.

La energía electromagnética se describe por medio de las ecuaciones de Maxwell, que en ausencia de cargas libres tienen la forma:

$$\left. \begin{aligned} \vec{\nabla} \cdot \vec{E} &= 0 \\ \vec{\nabla} \cdot \vec{B} &= 0 \\ \vec{\nabla} \times \vec{E} + \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} &= 0 \\ \vec{\nabla} \times \vec{B} - \frac{\mu\epsilon}{c^2} \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (1.1)$$

con  $\vec{E}$ : campo eléctrico.

$\vec{B}$ : campo magnético.

$\epsilon$ : permitividad eléctrica relativa.

$\mu$ : permitividad magnética relativa.

$c$ : velocidad de la luz en el vacío.

Además  $c = (\epsilon_0 \mu_0)^{-1/2}$ , siendo:

$\epsilon_0$ : permitividad dieléctrica (eléctrica) en el vacío

$\mu_0$ : permeabilidad magnética en el vacío.

El campo eléctrico y magnético satisfacen las siguientes ecuaciones:

$$\left. \begin{aligned} \nabla^2 \mathbf{E} - \frac{\mu\epsilon}{c^2} \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} &= 0 \\ \nabla^2 \mathbf{B} - \frac{\mu\epsilon}{c^2} \frac{\partial^2 \mathbf{B}}{\partial t^2} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (1.2)$$

Los campos  $\mathbf{E}$  y  $\mathbf{B}$  son función vectoriales periódicas, siendo siempre perpendiculares a la dirección de propagación. Por lo tanto:

$$\begin{aligned} \vec{\mathbf{E}} &= E_x \mathbf{i} \\ \vec{\mathbf{B}} &= B_y \mathbf{j} \end{aligned} \quad (1.3)$$

siendo  $\mathbf{i}, \mathbf{j}$ : vectores unitarios en las direcciones  $x$  e  $y$  respectivamente.

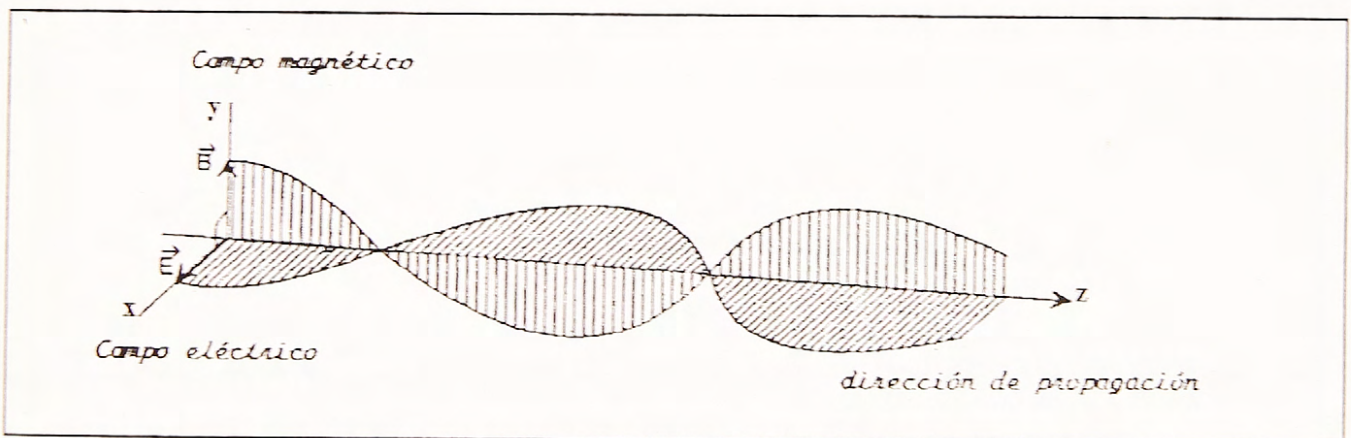


Figura 1.1.- Representación esquemática de una onda electromagnética.

Una solución posible para la ecuación (1.2) es:

$$E_x = E_0 \cos(\omega t - kz) \quad (1.4)$$

donde  $E_0$  es la amplitud del campo eléctrico,  $\omega$  es la frecuencia angular, y  $k$  el número de la onda, siendo la propagación a lo largo del eje  $z$ , y orientado hacia el eje  $x$ .

Reemplazando la ecuación (1.4) en la ecuación (1.2), se tiene :

$$\left. \begin{aligned} \omega^2 &= \frac{c^2 k^2}{\mu\epsilon} \\ \omega &= ck(\mu\epsilon)^{-\frac{1}{2}} \end{aligned} \right\} \quad (1.5)$$

Si definimos  $\nu$ : frecuencia cíclica

$\lambda$ : longitud de onda

entonces  $\omega = 2\pi\nu$

$$k = \frac{2\pi}{\lambda}$$

En otras palabras, la longitud de onda es la distancia que existe desde una máxima de la onda a la siguiente, y el número de máximos que pasa por un punto fijo en el espacio, por unidad de tiempo, es la frecuencia de la onda.

Reemplazando lo anterior en la ecuación (1.5) :

$$\left. \begin{aligned} 2\pi\nu &= \frac{2\pi c}{\lambda} (\mu\epsilon)^{-\frac{1}{2}} \\ \nu &= c\lambda^{-1} (\mu\epsilon)^{-\frac{1}{2}} \end{aligned} \right\} \quad (1.6)$$

Además la velocidad de la onda está dada por :

$$V = c(\epsilon\mu)^{-\frac{1}{2}} = \frac{c}{n} \quad (1.7)$$

donde  $n$  es el índice de refracción del medio en el cual se propaga la onda.

Desarrollando la ecuación (1.7) :

$$\begin{aligned} \frac{c}{n} &= c(\epsilon\mu)^{-\frac{1}{2}} \\ n &= (\epsilon\mu)^{\frac{1}{2}} \end{aligned} \quad (1.8)$$

Todo lo anteriormente discutido tiene referencia con la propagación de una onda electromagnética sólo en términos del vector campo eléctrico  $E$ . Sin embargo el mismo razonamiento se aplica para el campo magnético  $B$ .

$$B = B_0 \cos(\omega t - kz) \quad (1.9)$$

La ecuación anterior describe a una onda armónica simple, en que el vector  $B$  es perpendicular a la dirección de propagación. De hecho los campos eléctrico y magnético  $E$  y  $B$  son perpendiculares entre sí, y la dirección del vector  $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$  es paralela a la dirección de propagación. Se denomina vector de Poynting y representa el flujo de tiempo y energía por unidad de área en la dirección de propagación. Luego en la ecuación (1.9), la dirección de propagación es en el eje  $z$ , siendo la dirección del campo eléctrico a lo largo del eje  $x$ , y del campo magnético en el eje  $y$ .

Si  $E_0$  y  $B_0$  son las amplitudes de los campos eléctricos y magnéticos de una onda, y ya que  $E$  y  $B$  oscilan en fase, se tiene que:

$$E/B = E_0/B_0 = Z/\mu\mu_0 \quad (1.10)$$

donde  $Z$ : impedancia del medio.

$$Z = (\mu\mu_0/\epsilon\epsilon_0)^{1/2} = Z_0(\mu/\epsilon)^{1/2} \quad (1.11)$$

con  $Z_0$ : impedancia del vacío.

$$Z_0 = (\mu_0/\epsilon_0)^{1/2} \approx 377\Omega$$

La energía media de la densidad de flujo de una onda electromagnética (potencia por unidad de área normal a la dirección de propagación), está dada por:

$$F = (E_0)^2/2Z \quad (1.12)$$

Una radiación se distingue de otra por su frecuencia (longitud de onda), siendo el **espectro electromagnético** todo el margen de las frecuencias posibles. Si bien no existe una línea divisoria clara entre las regiones espectrales, se han hecho divisiones del espectro debido más bien a los diversos métodos de sensado y generación existentes para cada tipo de radiación, más que por diferencias en las características de la energía a distintas longitudes de onda.

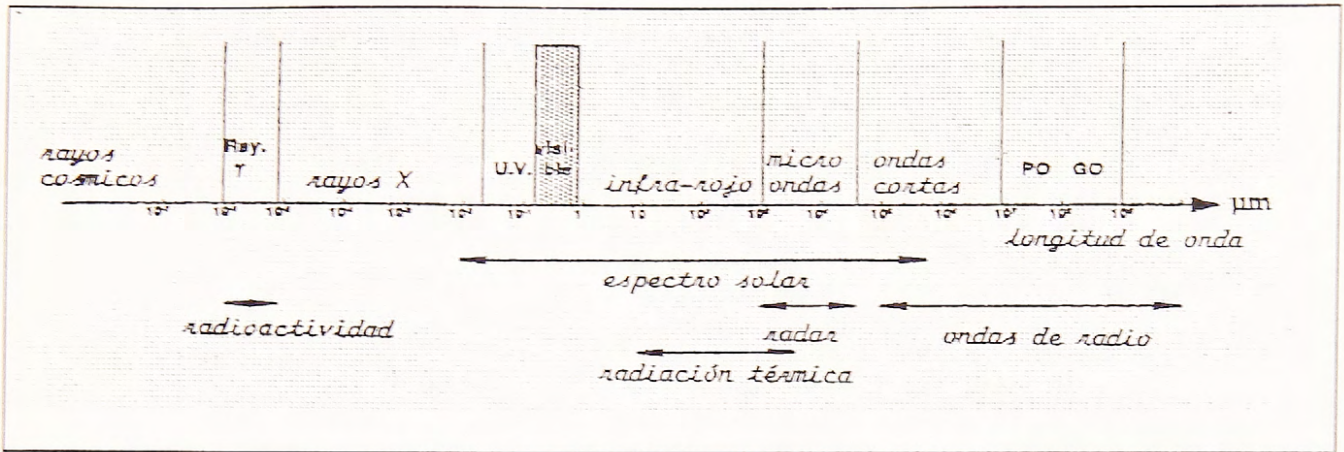


Figura 1.2.- Representación de las ondas electromagnéticas según su longitud de onda.

Si un medio es dispersivo, vale decir que presenta pérdidas, la constante dieléctrica y el índice de refracción tendrán una componente real y otra imaginaria:

$$\varepsilon = \varepsilon' - i\varepsilon'' \quad (1.13)$$

De manera análoga:

$$n = n' - ik \quad (1.14)$$

en que  $\varepsilon'$ : componente real de la permitividad eléctrica relativa.

$\varepsilon''$ : componente imaginaria de la permitividad eléctrica relativa.

$n'$ : componente real del índice de refracción.

$k$ : componente imaginaria del índice de refracción.

En un medio en que todos los átomos han sido ionizados, el índice de refracción es puramente real a altas frecuencias, y puramente imaginario a frecuencias bajas (lo cual es importante en la percepción remota cuando se consideran efectos de la ionósfera).

Usando las ecuaciones (1.5), (1.13) y (1.14):

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon &= n'^2 - 2n'ki - k^2 \\ \varepsilon' &= n'^2 - k^2 \\ \varepsilon'' &= 2n'k \\ k &= \frac{\varepsilon''}{2n'} \end{aligned} \right\} \quad (1.15)$$

Ahora, al representar la ecuación (1.4) del campo eléctrico en una forma exponencial, se obtiene:

$$E_x = E_0 e^{i(\omega t - kz)} \quad (1.16)$$

Pero

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{\omega}{v\lambda} = \frac{\omega}{v \frac{c}{(\varepsilon\mu)^{1/2}}} = \frac{\omega}{\frac{c}{n}} = \frac{\omega n}{c} \quad (1.17)$$

y si se reemplaza lo anterior en la ecuación (1.16):

$$E_x = E_0 e^{i\left(\omega t - \frac{\omega n}{c} z\right)} = E_0 e^{i\omega\left(t - \frac{n}{c} z\right)} \quad (1.18)$$

Utilizando la ecuación (1.14) del índice de refracción para un medio dispersivo y reemplazándolo en la ecuación (1.4):

$$\left. \begin{aligned} E_x &= E_0 \exp \left[ i\omega \left( t - \frac{n'z}{c} + \frac{ikz}{c} \right) \right] \\ E_x &= E_0 \exp \left[ i\omega \left( t - \frac{n'z}{c} \right) \right] \exp \left[ -\frac{\omega kz}{c} \right] \end{aligned} \right\} \quad (1.19)$$

que representa una onda periódica que decrece en amplitud exponencialmente con la distancia  $z$ . La longitud de viaje de la onda en que su amplitud disminuye en un factor  $r$ , se denomina longitud de absorción ( $l_a$ ), pero como la intensidad es proporcional al cuadrado de la amplitud (ver la ecuación 1.12), implica que la intensidad cae en un factor  $r^2$ ; luego se tiene lo siguiente:

$$l_a = \frac{c}{\omega k} = \frac{\lambda_0}{2\pi k} \quad (1.20)$$

con  $\lambda_0$ : longitud de onda de la radiación en el vacío

Muchos materiales son dispersivos sólo en un grado mínimo, así que se puede considerar que:

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon'' &\ll \varepsilon' \\ k &\ll n' \\ \delta &\ll 1 \end{aligned} \right\} \quad (1.21)$$

usando la ecuación (1.13) :

$$\left. \begin{aligned} n' &\approx \sqrt{\varepsilon'} \\ k &\approx \frac{\varepsilon''}{2\sqrt{\varepsilon'}} \end{aligned} \right\} \quad (1.22)$$

y reemplazando en la ecuación (1.5), tenemos finalmente que la longitud de absorción es :

$$l_a = \frac{\lambda_0 \sqrt{\epsilon'} }{\pi \epsilon''} \quad (1.23)$$

Anteriormente se habló de medios dispersivos, es decir en donde varían las propiedades dieléctricas ( $\epsilon$  índice refractivo), con la frecuencia de la onda. La siguiente relación representa la velocidad en un medio dispersivo, velocidad a la cual la cresta de la onda continúa viajando en la dirección de propagación:

$$v = \frac{\omega}{k} \quad (1.24)$$

Al modular la onda de alguna forma, por ejemplo dividiéndola en pulsos, con una determinada modulación, se puede incorporar información a ésta. La velocidad a la cual viaja el tren de pulsos, define la velocidad de grupo:

$$v_g = \frac{\partial \omega}{\partial k} \quad (1.25)$$

donde  $\omega$  : frecuencia angular.

$k$  : número central de la onda definida en la ecuación (1.5).

## 1.2 POLARIZACIÓN

El hecho que el campo eléctrico y magnético sean perpendiculares con respecto a la dirección de propagación de una onda y entre sí, no es suficiente para definir la orientación de ésta, sino que está determinada por la polarización de la radiación, es decir hacia donde se orientan los campos cuando la onda viaja en alguna dirección. Hay ocasiones en que la polarización es de interés en la percepción remota (la luz natural del Sol, originalmente no polarizada, puede adquirir una cierta polarización como consecuencia de la reflexión sobre ciertas superficies); es de esta forma en que se puede obtener información sobre estos medios mediante dispositivos especiales.

- si el vector campo eléctrico permanece sólo en un plano, se dice que la radiación está **polarizada en el plano** (Fig. 1.3).

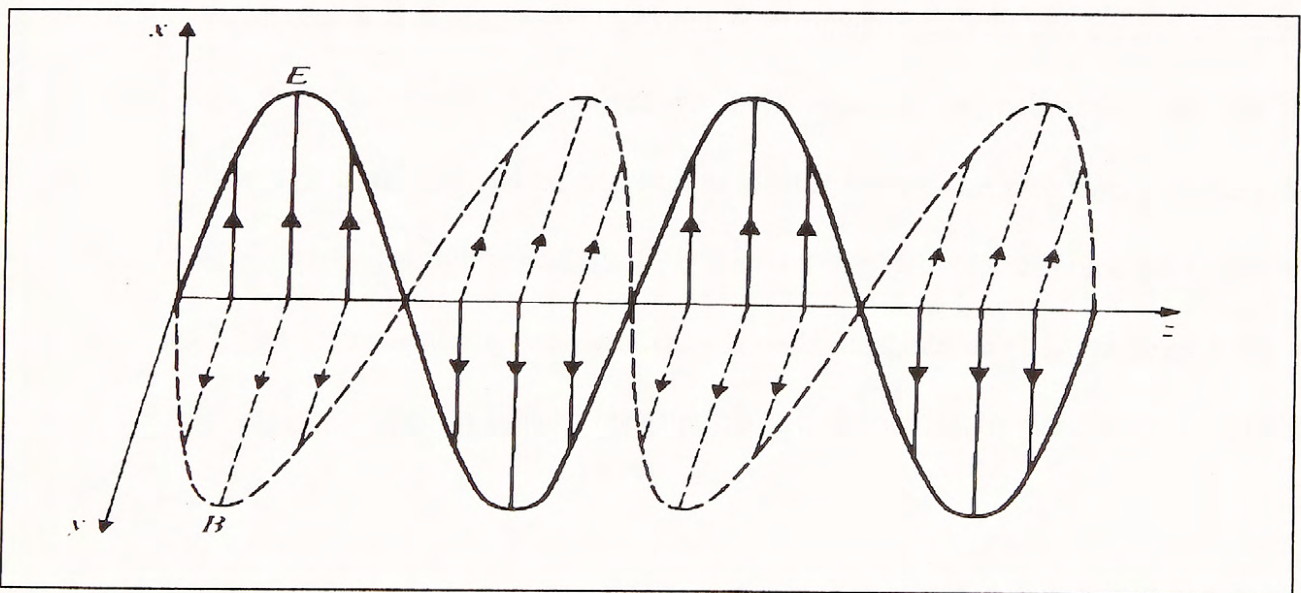


Figura 1.3.- Onda polarizada en el plano

- si el campo eléctrico describe hélices elípticas, entonces la radiación está **elípticamente polarizada**.

- si el campo eléctrico rota en torno al eje de propagación, tal que el extremo de cada vector describe una hélice, la radiación estará **circularmente polarizada** (a la izquierda o derecha, según el sentido de giro) (Fig. 1.4).

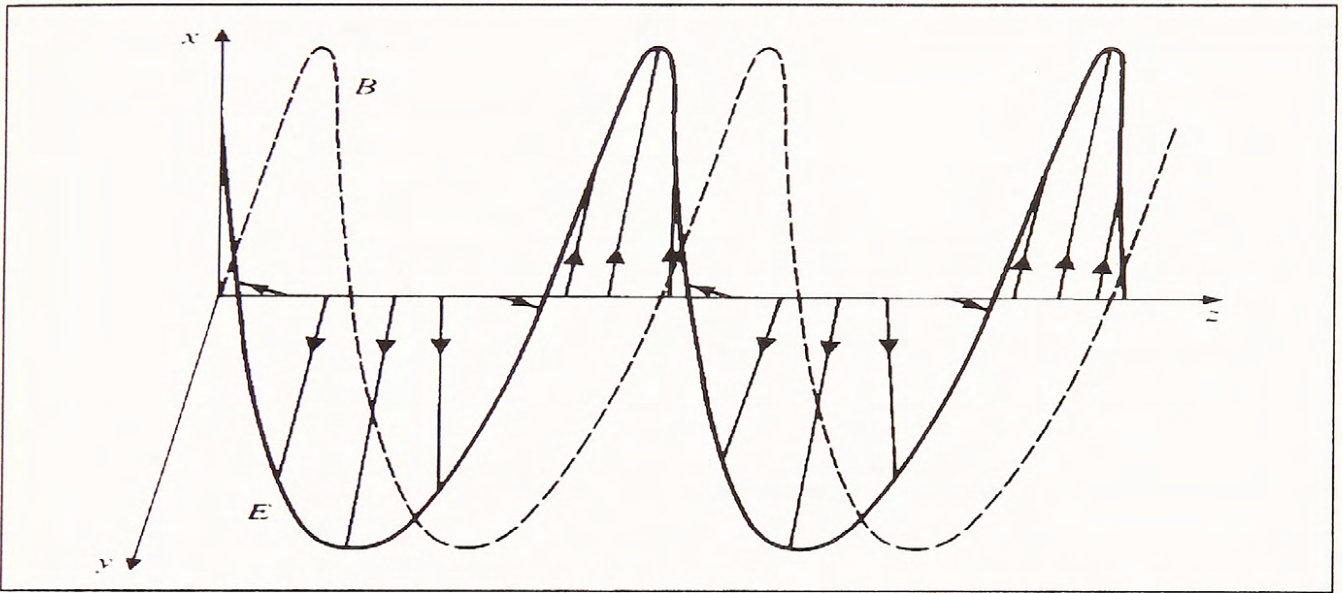


Figura 1.4.- Onda polarizada circularmente a la derecha.

En general la polarización de una onda electromagnética será una mezcla de varios tipos, incluyendo una componente aleatoriamente polarizada, o no polarizada, en que la orientación de los vectores del campo eléctrico cambia aleatoriamente. **La reflexión y dispersión pueden cambiar el estado de la polarización.** Si se tiene un dispositivo electrónico para detectar radiación polarizada circularmente hacia la derecha, y la onda incidente en el artefacto es hacia la izquierda, nada se detectará; esto es sumamente importante a la hora de diseñar cualquier sistema de percepción remota.

### 1.3 EFECTO DOPPLER

Si una fuente de radiación electromagnética de frecuencia  $f$  está en movimiento con respecto a un observador con una velocidad relativa  $v$ , éste la detectará a una frecuencia diferente  $f'$ . Si la fuente se aproxima al observador,  $f'$  será mayor que  $f$ , y al contrario, si la fuente se aleja del observador, entonces  $f'$  será menor que  $f$ .

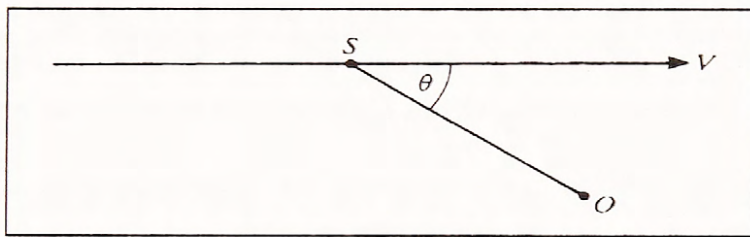


Figura 1.5.- La fuente de radiación electromagnética está ubicada en S, viajando con velocidad  $v$ . El observador se ubica en O.

El efecto Doppler es el mismo para un observador aproximándose a la fuente que alejándose (no así cuando se trata de ondas de sonido). La relación que representa este efecto es:

$$\frac{f'}{f} = \frac{\left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)^{1/2}}{\left(1 - \frac{v \cos \theta}{c}\right)} \quad (1.26)$$

Si  $|v/c| \ll 1$ , lo que siempre es verdad para los casos de interés, la ecuación anterior (1.26) se puede aproximar por:

$$\frac{f'}{f} = 1 + \frac{v \cos \theta}{c} \quad (1.27)$$

## 1.4 RADIACIÓN TERMAL

Todos los objetos cuya temperatura esté sobre el cero absoluto ( $0^{\circ}\text{K}$  ó  $-273^{\circ}\text{C}$ ) emiten radiación termal, que se puede detectar con un radiómetro que comúnmente se utiliza en los sistemas de percepción remota denominados 'pasivos', vale decir que no emiten radiación. Dentro de la porción del infrarrojo del espectro, debiera hacerse notar que sólo la energía termal infrarroja está directamente relacionada con la sensación de calor, no así el infrarrojo cercano o medio. Se considera  $dA$  un área pequeña, y la potencia que le llega en la dirección  $\theta$ , en un rango de direcciones que esté dentro de un ángulo sólido de  $d\Omega$  esteroradianes.

Definiendo la **radiancia (L)** que llega a  $dA$  como la potencia incidente de una onda, desde una dirección en particular, siendo:

$$d\phi = L dA d\Omega \cos\theta \text{ ( W mt}^{-2} \text{ sr}^{-1} \text{ )} \quad (1.28)$$

donde  $\phi$  es el flujo radiante (ver la figura 1.6). Si la radiancia no depende de  $\theta$  y de  $\phi$ , es decir si es la misma en todas direcciones, la fuente se denomina Lambertiana<sup>1</sup>. Una superficie cualquiera es raramente Lambertiana. Este concepto es muy importante, ya que la energía medida mediante sensores en teledetección es proporcional a la radiancia de la fuente observada (superficie terrestre). Luego, la radiancia será constante si el medio en que se propaga no es absorbente ni dispersiva, es decir si tiene un índice de refracción constante. Así:

$$\phi = dA \int_0^{2\pi} L \cos\theta d\Omega \quad (1.29)$$

que es la potencia total sobre  $dA$  en  $2\pi$  esteroradianes.

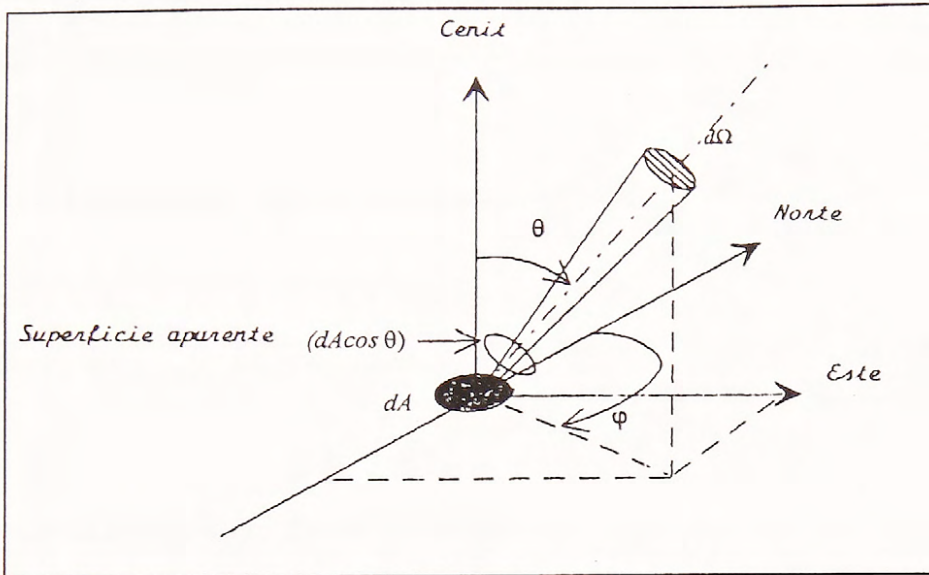


Figura 1.6.- Radiancia de una fuente extendida  $dA$ .<sup>1</sup>

Además, definimos:

$$\phi = E_{\text{irradiancia}} dA \quad (1.30)$$

donde  $E_{\text{irradiancia}}$  ( $\text{W m}^{-2}$ ) es la **irradiancia** (potencia recibida por unidad de superficie proveniente de todas las direcciones en un medio-espacio, hemisferio); en otras palabras, el elemento de superficie  $dA$  recibe una irradiancia  $E$ , proveniente del semi-espacio superior, y se comporta en relación al sensor como una fuente de radiancia  $L$  en la dirección  $\theta$ . Si se emite radiación desde  $dA$ , el término que representa toda la radiación que deja esta área es la **excitancia** o **emitancia** ( $M$ ), es decir la radiancia integrada en todas las direcciones de un semi-espacio (sobre un hemisferio); y la potencia total emitida por toda la fuente en un margen dado de direcciones se llama **intensidad radiante**,  $I$  ( $\text{W sr}^{-1}$ ). Luego :

$$M = \frac{d\phi}{dA} \left( \text{W mt}^{-2} \right) \quad (1.31)$$

<sup>1</sup> Para mayores referencias ver "1.6 INTERACCIÓN DE LAS ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS CON LA SUPERFICIE TERRESTRE".

<sup>1</sup> Ver "APÉNDICE B, GLOSARIO".

$$\phi_{\text{total}} = I d\Omega \quad (1.32)$$

Para una superficie Lambertiana, se tiene la siguiente relación:

$$M = \pi L \quad (1.33)$$

En efecto, de acuerdo con la definición de radiancia:

$$\frac{d^2\phi}{dA^2} = L \cos\theta d\Omega \quad (1.34)$$

$$\frac{d\phi}{dA} = M = \int L \cos\theta d\Omega \quad (1.35)$$

Ahora, el elemento de un ángulo sólido  $d\Omega$  bajo el cual se ve el elemento de superficie de una esfera originada por las direcciones  $(\theta, \varphi)$ ,  $(\theta + d\theta, \varphi)$ ,  $(\theta + d\theta, \varphi + d\varphi)$  y  $(\theta, \varphi + d\varphi)$  es :

$$d\Omega = \sin\theta d\theta d\varphi \quad (1.36)$$

Por lo tanto, la integración sobre un hemisferio se escribe:

$$M = L \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^{\pi/2} \cos\theta \sin\theta d\theta \quad (1.37)$$

Correspondiendo la primera integral a  $2\pi$  y la segunda a  $1/2$ , se tiene :

$$M = \pi L \quad (1.38)$$

Este desarrollo matemático tiene por objeto simplemente demostrar que, aunque el ángulo sólido bajo el cual se ve el hemisferio superior sea  $2\pi$ , la excitancia de una superficie Lambertiana se obtiene multiplicando la radiancia por  $\pi$ .

Esto se comprende de manera intuitiva: la radiancia está definida por unidad de superficie aparente; supongamos un elemento de superficie Lambertiana, de superficie definida y constante. La medida de la energía emitida por este objeto será constante a condición de realizar mediciones en ángulos sólidos más y más grandes a medida que se alejan de la normal a la superficie. La excitancia es un concepto importante en la percepción remota, ya que un elemento de superficie en tierra reemite la energía recibida en todo el hemisferio por encima del plano horizontal local. En el rango visible, la irradiancia de la superficie terrestre es debida al Sol, y teniendo éste una posición precisa en la bóveda celeste, se podría pensar que se va a definir una irradiancia direccional. No es así por una razón muy simple: gracias a la atmósfera que dispersa la luz del Sol, las radiaciones visibles no sólo llegan de la dirección del Sol, sino de todas las direcciones del hemisferio superior. Esto permite ver claro en una calle a la sombra. Así, la radiancia solar es una suma de radiancias directas y difusas, siendo éste el motivo de esfericidad de la radiación reflejada.

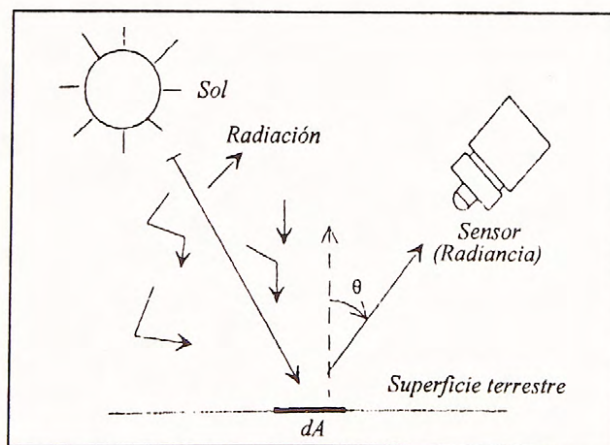


Figura 1.7.- Irradiancia de una superficie.

Ahora bien, la radiación termal tiene una distribución en longitud de onda (frecuencia), y en dirección. Entonces :

$$d\phi = L_{\lambda} \cos\theta \, dA \, d\Omega \, d\lambda = L_{\nu} \cos\theta \, dA \, d\Omega \, d\nu \quad (1.39)$$

donde :  $L_{\nu}$  ( W m<sup>-3</sup> sr<sup>-1</sup> )

$L_{\lambda}$  ( W m<sup>-2</sup> sr<sup>-1</sup> Hz<sup>-1</sup> )

son la radiancia espectral, relacionándose entre sí del modo siguiente :

$$\frac{L_{\lambda}}{L_{\nu}} = \left| \frac{d\nu}{d\lambda} \right| = \frac{c}{\lambda^2} = \frac{\nu^2}{c} \quad (1.40)$$

Se define como **cuerpo negro**, a un cuerpo ideal en equilibrio termodinámico con su medio ambiente, que absorbe totalmente la radiación que recibe y emite una radiación máxima en todas las longitudes de onda. Planck demostró que un cuerpo negro es Lambertiano, y calculó su **radiancia espectral** usando la mecánica cuántica:

$$L_{\nu} = \frac{2h\nu^3}{c^2} \left( e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1 \right)^{-1} \quad (1.41)$$

$$L_{\lambda} = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \left( e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1 \right)^{-1} \quad (1.42)$$

siendo h (constante de Planck) = 6,626076 x 10<sup>-34</sup> (J seg)

K (constante de Boltzmann) = 1,380658 x 10<sup>-23</sup> (J K<sup>-1</sup>)

Es decir, la radiancia emitida en una gama espectral determinada depende sólo de la temperatura del cuerpo.

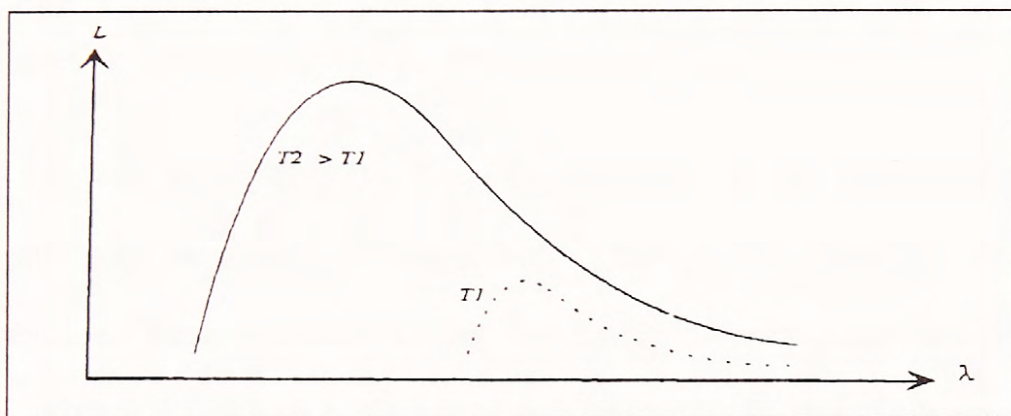


Figura 1.8.- Curva teórica de la radiancia en función de la longitud de onda, para dos objetos que se comportan como cuerpos negros, de diferentes temperaturas. Para una temperatura  $T_2$  superior a  $T_1$ , la radiación emitida es mucho más importante, cumpliéndose esto en todas las longitudes de onda. La dependencia de la temperatura es en efecto muy fuerte. El máximo de la curva de radiancia se desplaza en  $L$  hacia las longitudes de onda corta cuando la temperatura aumenta. Las ondas electromagnéticas de longitud de onda corta (de mayor frecuencia) se caracterizan por radiaciones más energéticas<sup>1</sup>.

La radiancia total saliendo de un cuerpo negro está dada al integrar la ecuación (1.42), con respecto a la longitud de onda.

$$L = \int_0^{\infty} L_{\lambda} d\lambda = \frac{2\Pi^4 K^4}{15c^2 h^3} T^4 \quad (1.43)$$

y la excitancia radiante total es:

$$M = \int_0^{\infty} M_{\lambda} d\lambda = \frac{2\Pi^5 K^4}{15c^2 h^3} T^4 = \sigma T^4 \quad (1.44)$$

<sup>1</sup> Un aumento de temperatura tiene tendencia a excitar más a los átomos y así aumentar la frecuencia ondulatoria.

donde :

$$\sigma = \frac{2 \Pi^5 K^4}{15 c^2 h^3} = 5.67 \times 10^{-8} \text{ (W m}^{-2} \text{ K}^{-4} \text{)} \quad (1.45)$$

la cual es la constante de Stefan-Boltzmann. La ecuación (1.44) es la ley de Stefan-Boltzmann, que indica que toda la materia, a temperaturas sobre el cero absoluto, emite radiación electromagnética en forma continua. Luego, los objetos terrestres son también fuentes de radiación, aunque con magnitudes y composiciones espectrales considerablemente diferentes a la del Sol. Esta ley expresa cómo la energía irradiada de cualquier objeto es función de la temperatura superficial de éste. Se puede determinar la longitud de onda (dominante), a la cual  $L_\lambda$  alcanza su máximo (Ley de Wien), que se encuentra al diferenciar la ecuación (1.42) :

$$\lambda_{\max} = \frac{c_w}{T} \text{ (}\mu\text{ m)} \quad (1.46)$$

donde  $c_w = 2,898 \times 10^{-3} \text{ (}^\circ\text{K m)}$ .

Luego, para un cuerpo negro la longitud de onda de máxima excitancia radiante, ocurre cuando ésta varía en proporción inversa con la temperatura absoluta del cuerpo. Se observa este fenómeno cuando un metal, como el fierro, es calentado. A medida que se calienta cambia de color sucesivamente hacia longitudes de onda más cortas: del rojo al naranja, al amarillo, y eventualmente al blanco.

La temperatura ambiental media de la Tierra (la temperatura de su materia superficial) es de unos 279°K (7°C). Desde el punto de vista de la ley de Wien, esto significa que la máxima excitancia aparece a longitudes de onda de alrededor de 9,7  $\mu\text{m}$ , si irradiara como un

cuerpo negro. Debido a que esta radiación se relaciona con el calor terrestre, esta energía es llamada **infrarroja termal**. Por otro lado, ante la presencia del Sol, la Tierra recibe radiación incidente desde él, la cual es posteriormente reflejada. La línea de división entre longitudes de onda infrarrojas reflejadas y emitidas está aproximadamente a los  $3 \mu\text{m}$ . Bajo esta longitud de onda, la energía que predomina es la reflejada, y sobre ésta prevalece la energía emitida. En cambio el Sol puede ser considerado como un cuerpo negro con una temperatura de superficie igual a  $6000^\circ\text{K}$ , siendo la longitud de onda del máximo de emisión de  $\lambda_{\text{máx}} = 0.48 \mu\text{m}$ , lo que corresponde más o menos al máximo de sensibilidad del ojo humano (color rojo).

También es importante definir un **cuerpo gris**, que a diferencia de un cuerpo negro no absorbe toda la radiación recibida, siendo una parte reflejada o transmitida (un cuerpo natural puede en general asimilarse a un cuerpo gris). Por lo tanto a igual temperatura un cuerpo gris no emite tanto como un cuerpo negro. En equilibrio termodinámico con su medio ambiente, el coeficiente de emisividad es igual al coeficiente de absorción, y depende de la temperatura. Notemos que es afortunado que los objetos que nos rodean sean cuerpos grises; permite verlos gracias a la reflexión de la parte de la radiación solar que no absorben.

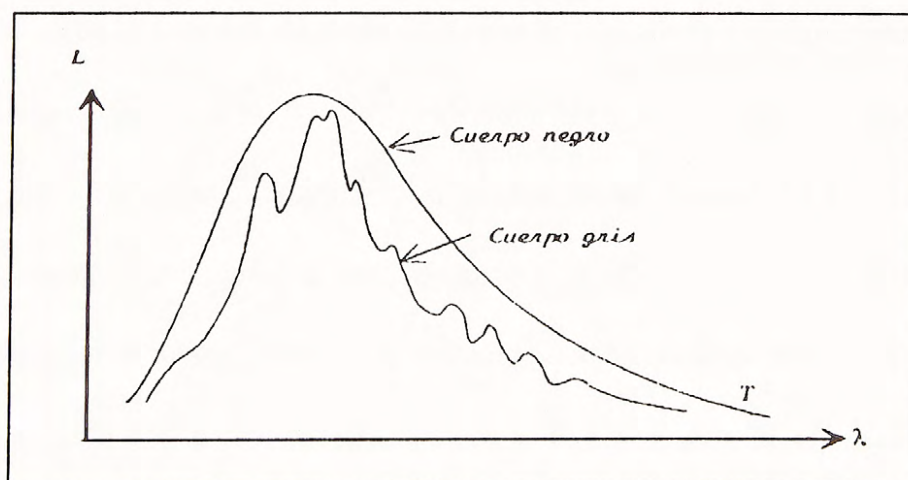


Figura 1.9.- Radiancias espectrales de un cuerpo gris y de un cuerpo negro, correspondientes a una misma temperatura dada.

## 1.5 EFECTOS ATMOSFÉRICOS SOBRE LAS ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS

Para los sistemas satelitales de sensado remoto, es importante tener en cuenta los fenómenos físicos que ocurren en la atmósfera, dado que las ondas electromagnéticas tienen que viajar a través de ella en al menos una dirección, como en los sistemas de percepción remota pasivos, y en algunos casos de ida y retorno, como ocurre en los sistemas activos (como los que utilizan señales de radar-SAR).

En la atmósfera se distinguen principalmente dos procesos: la dispersión y la absorción.

a) **Dispersión:** es la diseminación imprevisible de la radiación por múltiples reflejos debido a partículas en suspensión. Aquí se pueden distinguir los siguientes tres casos :

- **Dispersión de Rayleigh**, que se debe a la interacción de moléculas u otras partículas, que son mucho menores en diámetro que la longitud de onda de la radiación que atraviesa la atmósfera. Este fenómeno es inversamente proporcional a la cuarta potencia de la longitud de onda ( $\lambda^{-4}$ ), por lo que afecta principalmente las longitudes de onda cortas (bajo los  $0.4 \mu\text{m}$ ), vale decir la región del espectro que comprende del azul hasta los rayos ultravioleta. Así, un haz de luz 'blanca' del Sol, viajando a través de una columna de aire, se verá afectada en forma selectiva por la dispersión, en el sentido que la mayor parte de la luz azul será reflejada en múltiples direcciones. Es esta la razón por la cual el cielo aparece azul. En cambio, al amanecer o atardecer el Sol aparece rojo, incluso en ausencia de dispersión, debido a partículas de polvo y al ángulo de incidencia de la radiación recibida en la atmósfera. Se debe hacer notar también que el proceso de dispersión de Rayleigh, en general, aumenta el grado de polarización de la radiación diseminada, dominando bajo variadas condiciones

atmosféricas. Este efecto es la principal causa que produce imágenes borrosas; visualmente disminuye el contraste. En el infrarrojo cercano, al ser las longitudes de onda más grandes, la dispersión es menor. Esto explica la nitidez de las sombras en las fotografías infrarrojas; en las partes ocultas de la radiación solar directa, llega menos radiación difusa en el margen visible, estas partes en la sombra tienen así límites muy nítidos. Dado que la dispersión de Rayleigh es modelable con precisión, se puede entonces fácilmente corregir la **reflectancia aparente**<sup>1</sup> de la dispersión de Rayleigh en la parte superior de la atmósfera.

- **Dispersión de Mie**, se presenta cuando la longitud de onda de la radiación es del mismo tamaño que el diámetro de las partículas en suspensión en la atmósfera. La dispersión de Mie es inversamente proporcional a la primera potencia de la longitud de onda ( $\lambda^{-1}$ ), y afecta principalmente a las longitudes más grandes. Es la dispersión predominante y es muy importante en la presencia de gotas de agua y polvo en suspensión en la atmósfera, para todas las longitudes de onda, en el espectro visible y del infrarrojo.
- **Dispersión no selectiva**, ocurre cuando la longitud de onda es mucho menor que el diámetro de las partículas en suspensión, siendo que el diámetro de las partículas atmosféricas está comprendido entre los 5 a 100  $\mu\text{m}$ . La dispersión no selectiva afecta a las ondas visibles, infrarrojo cercano y medio, todas por igual y en consecuencia, es independiente de la longitud de onda.

b) **Absorción**: es la pérdida efectiva de la energía en una longitud de onda dada del espectro electromagnético, debido a la absorción a nivel molecular. Algunas moléculas que causan este

---

<sup>1</sup> Ver "APÉNDICE B, GLOSARIO".

fenómeno son el vapor de agua, el dióxido de carbono y el ozono. Es así como el ultravioleta-B (en torno a  $0.3 \mu\text{m}$ ) es absorbida por el ozono; en cambio las radiaciones visibles y el infrarrojo cercano son poco absorbidas por los gases atmosféricos.

Existen básicamente tres mecanismos de absorción de la energía para una onda electromagnética incidente:

- **Transición Electrónica**, que denota el cambio de un electrón a un nivel más alto de energía. Las longitudes de onda involucradas son del orden de  $1 \mu\text{m}$ .
- **Vibración de Átomos en una Molécula**, debido a la interacción entre átomos (comportamiento similar al de un resorte). Las longitudes de onda involucradas son particularmente las visibles e infrarrojas ( $0.4 - 10^3 \mu\text{m}$ ).
- **Energía Rotacional de una Molécula**, que afecta a la región de las microondas ( $10^3 - 1.5 \cdot 10^4 \mu\text{m}$ ).

Un análisis de la dispersión o de la absorción debido a los aerosoles, que se puede cuantificar con el **espesor óptico**<sup>1</sup>, no es posible sin conocer el contenido y concentración de gases en la atmósfera.

En la siguiente tabla se pueden observar los elementos más frecuentes en la atmósfera, y a qué longitudes de onda afectan debido a los fenómenos anteriormente mencionados.

---

<sup>1</sup> Ver "APÉNDICE B, GLOSARIO".

Tabla 1.1- Elementos encontrados más frecuentemente en la atmósfera.

BANDAS VISIBLES E INFRARROJA	
Molécula	Longitud de onda ( $\mu\text{m}$ )
agua	0.9, 1.1, 1.4, 1.9, 2.7, ~6
oxígeno	0.8
dióxido de carbono	2.7, 4.3, ~14
ozono	9.5
REGIÓN DE LAS MICROONDAS	
Molécula	Longitud de onda (GHz)
agua	22, 235, 183.3
oxígeno	60, 118.75

Existe en la atmósfera una capa especialmente importante que afecta algunas longitudes de onda; esta es la **ionósfera**, que es el estrato donde se produce ionización en exceso, producto de la radiación ultravioleta y rayos X provenientes del Sol. Si llamamos  $n_e$  a la densidad de los electrones en la ionósfera, entonces el índice refractivo ( $n$ ) es:

$$n = \left[ 1 - n_e e^2 / m \omega^2 \epsilon_0 \right]^{1/2} \quad (1.47)$$

Y si se cumple que la frecuencia del plasma  $\omega_p \ll \omega$ ,  $n$  es real y se aproxima por :

$$n \approx 1 - \frac{\omega_p^2}{2 \omega^2} \quad (1.48)$$

con :

$$\omega_p^2 = \frac{n_e e^2}{\epsilon_0 m} \quad (1.49)$$

Sin embargo se puede ver que si  $\omega < \omega_p$ , el índice de refracción será puramente imaginario, y la onda será fuertemente atenuada. Como la densidad de los electrones en la ionósfera es del orden de  $10^{12} \text{ m}^{-3}$ ,  $\omega_p$  será de alrededor de  $5 \times 10^7 \text{ seg}^{-1}$  ó 9 MHz; sin embargo, esta capa es muy variable espacial y temporalmente, debido a variaciones en la densidad de los electrones. Así que para frecuencias bajo 9 MHz este estrato es 'opaco' a las radiaciones, y a medida que sobrepasa este límite se produce menor absorción. Como consecuencia de las variaciones de absorción y dispersión con la frecuencia es que aparecen las **ventanas espectrales**, que se refiere a un rango en el espectro electromagnético en que sólo una pequeña parte de la radiación solar es absorbida o dispersada, o en otras palabras, en que la mayoría de la energía es transmitida a través de la atmósfera con pérdidas mínimas. Estas ventanas son particularmente importantes para la transmisión o reflexión de señales hacia o desde la Tierra. En el espectro visible existe una ventana amplia del ultravioleta al infrarrojo. En el infrarrojo existen dos muy importantes, donde la radiación electromagnética es transmitida casi en un 100%, y donde están concentrados la mayoría de los sensores pasivos de teledetección satelital. Luego, en el rango de las microondas existe una gran ventana transparente, empezando en los 1.0 cm de longitud de onda.

En la siguiente figura se pueden observar estas ventanas.

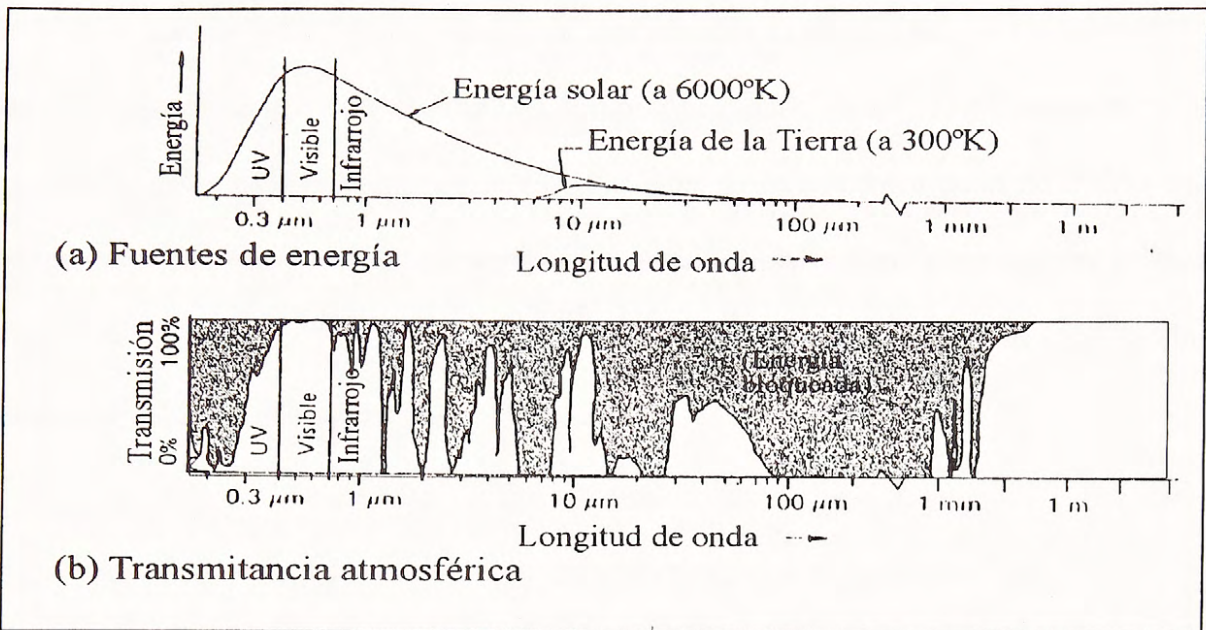


Figura 1.10.- Transmitancia espectral media de la atmósfera (porcentaje de radiación solar que llega hasta la superficie de la Tierra, dividido por longitud de onda).

Los rayos recibidos por el sensor no provienen solamente del objeto estudiado, sino también de reflexiones múltiples en la atmósfera, y de reflexiones “parásitas” sobre otros objetos. Estos efectos perturbadores influyen por supuesto en los valores numéricos registrados, pero contribuyen igualmente, de manera general, a reducir el contraste del objeto estudiado en relación a su medio ambiente. También los estudios multitemporales se ven dificultados debido a los efectos atmosféricos. En efecto, dos imágenes de una misma zona tomadas en dos fechas diferentes son difícilmente comparables en su estado bruto debido a:

- variaciones de la irradiación solar en el momento del paso del satélite. Estas variaciones son especialmente debido a las fluctuaciones de la distancia Tierra-Sol y al ángulo cenital solar<sup>1</sup> que es función de la fecha y de la hora.
- variaciones del estado de la atmósfera y de la geometría del receptor satelital, (para ángulos de visión diferentes, el espesor de la atmósfera atravesada no es el mismo).

<sup>1</sup> Ver “APÉNDICE B, GLOSARIO”.

La cuantificación de los efectos atmosféricos es posible en una cierta medida, pero algunos efectos son difíciles de modelar, tal como el contenido en aerosoles, como se mencionó anteriormente. Independientemente de la consideración de la influencia de la atmósfera sobre la respuesta espectral, los estudios multitemporales conducen a realizar correcciones geométricas para tener en cuenta el hecho que las órbitas son diferentes, que los parámetros del satélite han cambiado entre las dos fechas, etc.

## 1.6 INTERACCIÓN DE LAS ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS CON LA SUPERFICIE TERRESTRE

Las ondas electromagnéticas provenientes del Sol o de un sistema de sensado remoto activo, pueden ser reflejadas, transmitidas y/o absorbidas. Es importante considerar la forma en que un objeto refleja esta energía, dependiendo de las irregularidades de su superficie. Así podemos definir dos extremos; en el primer caso se trata de la **reflexión especular**, produciéndose en superficies planas o muy suaves, en donde el ángulo de reflexión es igual al ángulo de incidencia; es entonces una reflexión según una dirección privilegiada. En general se produce cuando las “rugosidades”<sup>1</sup> de la superficie del cuerpo son del mismo orden de magnitud (o inferior) a la longitud de onda utilizada. En el espectro solar de 0.4 a 2  $\mu\text{m}$ , la reflexión es de tipo especular sobre superficies lisas como metal pulido, agua en reposo o incluso un espejo. Además la onda reflejada es en general polarizada. El segundo caso es la **dispersión de Lambert**, que provoca que las superficies irregulares reflejen radiación de modo uniforme en todas las direcciones (radiancia de salida isotrópica). Una superficie Lambertiana perfecta dispersará toda la radiación incidente sobre ella, no existiendo absorción. Los casos anteriores son ideales, pero sirven para establecer límites para el comportamiento de la radiación, dependiendo de las características físicas de la superficie. Sin embargo, a menudo sucede que la dispersión de una superficie real es suficientemente similar a un caso ideal, como para ser descrita como **cuasi-especular** o **cuasi-Lambertiana**.

---

<sup>1</sup> Una superficie es rugosa si la dimensión característica de los elementos reflectantes es del orden de magnitud o superior a la longitud de onda de la radiación. Por ejemplo, una superficie puede ser rugosa en el rango del espectro visible ( $\lambda=0.5\mu\text{m}$ ) y lisa para las microondas (de algunos centímetros).

En base a todo lo anterior se puede definir **reflectividad** o **albedo** ( $r$ ), como la razón entre la energía total reflejada o excitancia  $M$ , con respecto a la energía total incidente o irradiancia ( $E_{\text{irradiancia}}$ ), y está dada por :

$$r = \frac{M}{E_{\text{irradiancia}}} \quad (1.50)$$

con  $M$  : excitancia.

$E_{\text{irradiancia}}$  : irradiancia.

El albedo es una medida de la capacidad de una superficie para reflejar la energía incidente. El albedo está relacionado con la emisividad por :

$$r = 1 - \varepsilon \quad (1.51)$$

con valores que van entre cero y uno. En el caso de la reflexión de la radiación solar por la superficie terrestre, las reflexiones especulares registradas en teledetección son extremadamente raras; es preciso, en efecto, que el tamaño de la superficie lisa sea al menos el del pixel (lo que puede ser el caso sobre el agua libre). Un cuerpo que da lugar a una reflexión especular aparece entonces oscuro (o negro) sobre las imágenes, salvo si se observa en la adecuada dirección. Por el contrario, la mayoría de los cuerpos actúan como difusores y se registra la energía reflejada difusa cualquiera que sea la dirección de la observación del sensor.

Un gráfico de la reflectividad de un objeto, como función de la longitud de onda, es llamada curva de reflectividad espectral, mostrando las regiones del espectro electromagnético donde mejor reflejarán las ondas incidentes. Diferentes materiales tendrán diferentes formas de curvas de reflectancia espectral, siendo esto una base para identificar el objeto al ser detectado

remotamente, como suelos, materias vegetales, etc. En la siguiente tabla se pueden observar algunos objetos y su respuesta espectral.

Tabla 1.2 - Elementos encontrados más frecuentemente en teledetección, y su respuesta espectral.

Material	Albedo %
agua (escurriendo)	1-10
agua (en reposo)	2
nieve (vieja)	45-70
nieve (nueva)	75-90
nubes (bajas)	5-65
nubes (altas)	30-85
hielo	25-40
arena	20-40
pasto	5-30
bosque	5-10
suelo	5-30
áreas urbanas	5-20

La energía reflejada por la superficie terrestre es función de:

- la dirección del Sol en relación con el objeto observado. Se trata de la dirección de la energía incidente, caracterizada por los ángulos  $\theta_i$ ,  $\phi_i$ , (siendo la fuente incidente el Sol, ver Fig. 1.11).

- la dirección según la cual el sensor enfoca el objeto observado. Se trata de la dirección de la energía reflejada, caracterizada por los ángulos  $\theta_r$ ,  $\phi_r$  (ver la figura 1.11).

Al dispersarse la reflectancia en dos direcciones, la del Sol y la del sensor, se utiliza el término de reflectancia bidireccional. La reflectancia es además función de la longitud de onda de observación ( $\lambda$ ).

Debido a la difusión de la radiación solar en la atmósfera, la irradiancia recibida por un elemento de la superficie terrestre no proviene únicamente de la dirección del Sol (irradiancia directa) sino de todo el hemisferio superior (irradiancia difusa). A pesar de que la radiación incidente está integrada en todo el hemisferio superior, la energía de radiación difusa incidente depende de la altura del Sol: la radiación es más importante cuando el Sol está alto en el cielo que cuando está bajo en el horizonte ( $\theta_i$  grande), debido al flujo recibido por unidad de superficie horizontal irradiada, ya que la irradiancia depende del coeficiente  $\cos\theta_i$ . Además la capa de la atmósfera atravesada es mayor en el caso de una incidencia oblicua; se produce un fenómeno de atenuación de la radiación. Las proporciones relativas de la radiación directa y difusa varían durante el día<sup>1</sup>. He ahí por qué la potencia recibida por la superficie terrestre (o radiación incidente), depende de los ángulos que definen la dirección del Sol.

El estado de las superficies naturales es caracterizado por la reflectancia, la cual en la mayoría de los objetos ha sido medida en toda una gama del espectro solar, tanto en el laboratorio como en el terreno. Para tener acceso a la reflectancia, los radiómetros clásicos permiten hacer una medición de radiancia del objeto observado y de la radiación recibida, en un espectro específico. Esta última medición es directa (detección que mide la energía proveniente de todo el hemisferio superior), o indirecta (medida de la radiancia reenviada por un difusor lambertiano perfecto: las superficies de color blanca y mate que supuestamente reenvían toda la

<sup>1</sup> En un día muy claro, con el Sol en el cenit, se tiene un 90% de irradiación directa y 10% de irradiación difusa; al final del día el porcentaje de irradiación difusa es más importante.

radiación recibida de manera equivalente en todas las direcciones). Para evitar los efectos direccionales de superficie, se considera la media de varias series de mediciones, con un Sol bastante alto (ángulo cenital incidente,  $\theta_i < 40^\circ$ ) y diferentes ángulos de visión (al nadir<sup>1</sup>, cara y de espaldas al Sol, ángulo cenital de visión,  $\theta_r < 30^\circ$ ). Se obtiene así la firma espectral de una cierta superficie (suelo desnudo, pradera, bosque, etc.) en un cierto estado (suelo seco o húmedo, pradera verde o seca...). Estas mediciones realizadas en el suelo son muy útiles para definir las bandas espectrales de los sensores a bordo; se buscará en efecto realizar mediciones en una gama de longitud de onda donde la información es característica. Eso sí, hay que tener en consideración que ciertos efectos que aparecen en una banda espectral a nivel del suelo no serán detectables al nivel del satélite, debido a la perturbación ocasionada por la atmósfera para estas bandas.

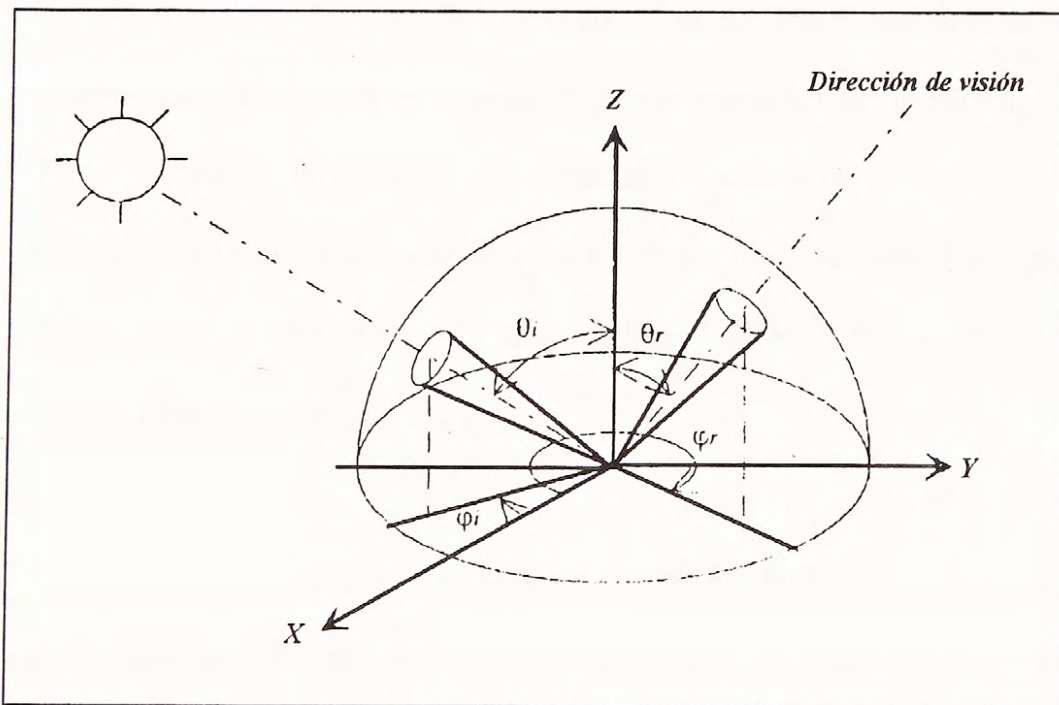


Figura 1.11.- Concepto de reflectividad.

<sup>1</sup> Ver "APÉNDICE B, GLOSARIO"

### 1.6.1 Firmas espectrales de los minerales, de las rocas y de los suelos

La estructura de los minerales es tal, que existen numerosas bandas de absorción debido a las transiciones electrónicas y a las vibraciones iónicas. A continuación se hablará de ellas con mayor profundidad.

- El hierro en los minerales: aunque los minerales sean de naturaleza muy diversa, el hierro produce transiciones electrónicas con gran frecuencia. El mecanismo de transferencia de carga entre los átomos de hierro y de oxígeno produce fenómenos de absorción desde el ultravioleta hasta los  $0.55 \mu\text{m}$ . Así los silicatos y los óxidos ricos en hierro aparecerán más bien amarillos, naranjas y rojos. Las variaciones de reflectancia en el ultravioleta, debido a la presencia o no del hierro, no son detectables por teledetección debido a la no transmisión por la atmósfera de la radiación ultravioleta. Por el contrario, la presencia de hierro es detectable en el visible y el infrarrojo cercano gracias a los iones de  $\text{Fe}^{2+}$  y  $\text{Fe}^{3+}$ : los iones ferrosos  $\text{Fe}^{2+}$  producen una fuerte banda de absorción a  $1.1 \mu\text{m}$ ; los iones férricos  $\text{Fe}^{3+}$  producen dos fuertes bandas a los  $0.4 \mu\text{m}$  y a los  $0.7 \mu\text{m}$ .
- El agua en los minerales: las bandas de absorción debido a los procesos vibratorios son importantes en los minerales que contienen agua, iones hidroxilos o carbonatos. La presencia de agua se traduce por dos bandas características de  $1.4 \mu\text{m}$  y  $1.9 \mu\text{m}$ . La presencia simultánea de estas 2 bandas indica que el agua no está asociada a la estructura cristalina, mientras que la presencia de una sola banda de  $1.4 \mu\text{m}$  indica que se trata de iones hidroxilos ligados a la red cristalina. Esta banda es algunas veces ampliada de  $1.5$  a  $1.7 \mu\text{m}$ . El modo fundamental de vibración del ion OH da una banda de absorción hacia  $2.8 \mu\text{m}$ .

- Las rocas: están formadas de minerales, pero su superficie está fuertemente alterada por la acción de los agentes atmosféricos. En las regiones de afloramientos, se observan rocas naturales, y no minerales puros. La alteración de las rocas crea una película superficial que se le denomina **pátina**, la cual está constituida por productos de la descomposición de los minerales y algunas impurezas. La reflectancia está modificada por esta pátina; para las rocas oscuras (basalto), la pátina aumenta la reflectancia; para las rocas claras, la disminuye. La presencia de líquenes altera además la medición; la presencia de agua en los líquenes o la capa de alteración, se traduce por bandas de absorción de  $1.4 \mu\text{m}$  y  $1.9 \mu\text{m}$ . Es preciso también considerar que a menudo las rocas están recubiertas de vegetación (distinta a los líquenes), por lo cual no se pueden observar directamente. Sin embargo, se llega a veces a diferenciarlas por el estudio de la vegetación que les está asociada.
- Los suelos: en cuanto a ellos, resultan de la transformación de los productos de alteración de las rocas. Así, como los minerales, presentan el mismo crecimiento regular de la reflectancia del visible al infrarrojo cercano. Las bandas de absorción debido al agua ( $1.4$  y  $1.9 \mu\text{m}$ ) están presentes. Cuando la humedad del suelo aumenta, se observa una disminución de la reflectancia en el conjunto de las longitudes de onda. Este fenómeno proviene del hecho que en un suelo seco, el espacio entre las partículas está ocupado por el aire. La reflectancia está entonces ligada al índice de refracción de las interfases aire-partículas. Cuando el suelo está húmedo, una parte de las microcavidades está ocupada por el agua: el índice de refracción agua-partícula es más débil que el índice aire-partícula, por lo tanto la reflectancia es más débil. Numerosos estudios de teledetección conducen a diferenciar los suelos desnudos de las superficies cubiertas por vegetación. Es importante entonces saber reconocerlos. Si bien, la forma

general de su firma espectral es semejante, es preciso recordar que los niveles de reflectancia pueden variar en proporciones bastantes amplias.

- Reflectancia de las cubiertas vegetales: es muy importante su estudio en el visible e infrarrojo. Diferentes estudios conducidos en laboratorios muestran que las propiedades ópticas de las hojas (absorbencia y reflectancia) están ligadas a su estructura, dependiente a su vez de la evolución biológica de las hojas, que va a determinar, entre otras cosas la producción de materia seca. Así, independiente del aspecto concerniente a la cartografía de los cultivos y de los bosques, el agrónomo, a partir de la información de reflectancia de las superficies vegetales en estados claves de su evolución, tendrá acceso a indicadores de rendimientos y a parámetros que permitan determinar los flujos de CO<sub>2</sub> entre la Tierra y la atmósfera, flujo cuya importancia se destaca hoy día como vital en todos los estudios relacionados con el medio ambiente. Las propiedades ópticas de una cubierta vegetal activa son muy diferentes a las de un suelo desnudo.

En el espectro visible (0.4-0.7  $\mu\text{m}$ ) la radiación es en su mayor parte absorbida por los pigmentos foliares (clorofila, caroteno, xantófila, antocianas) en la fotosíntesis (utilización de la energía radiante para la síntesis de materia orgánica). La reflectancia es más débil a medida que la fotosíntesis es más intensa. Los principales pigmentos son las clorofilas a y b, con bandas de absorción en el azul y el rojo. He aquí el por qué la cubierta vegetal activa aparece verde.

En el espectro infrarrojo cercano (0.7 - 1.3  $\mu\text{m}$ ), tanto los pigmentos foliares como la celulosa, que constituye las paredes celulares, son transparentes. La radiación recibida es entonces reflejada o transmitida. Al aumentar las longitudes de onda del visible al infrarrojo cercano, pasamos muy bruscamente de una reflectancia muy débil a una muy

fuerte (cerca del 50% de la reflectancia). Este cambio importante ha conducido a los agrónomos a la elaboración de numerosos "índices de vegetación" que destacan el valor de esta separación, con el fin de medir la actividad fotosintética de la planta. Se puede observar por otra parte que este límite (lugar donde la reflectancia aumenta bruscamente), es variable según la vegetación. En el infrarrojo medio, la reflectancia de las plantas está sobre todo afectada por su contenido de agua.

- **Nieve:** como los familiarizados con la montaña han observado frecuentemente, la nieve fresca es una de las superficies naturales más reflectantes en el espectro visible; su reflectancia va a disminuir en el infrarrojo cercano con las bandas de absorción de agua. Esta alta reflectancia proviene de la estructura de la nieve fresca: red poco densa de pequeños cristales de hielo en medio de mucho aire. Tenemos por lo tanto reflexiones múltiples en las interfases aire-hielo. Con el tiempo la nieve se funde y se recristaliza en cristales más gruesos, lo que conduce a una disminución de la reflectancia. La reflectancia del hielo está muy ligada a las impurezas que contiene, siendo, por ejemplo, ciertos glaciares muy poco reflectantes. En cambio sobre una capa de hielo liso, la reflectancia especular es muy importante: la medición de la reflectancia va a depender fuertemente del ángulo de visión, tratándose de una superficie típicamente no lambertiana.
- **Agua:** el agua tiene propiedades ópticas muy diferentes a las del hielo o nieve. Si es clara se ve a través de ella; la energía recibida es entonces transmitida o absorbida. Menos del 5% de la radiación recibida en este caso es reflejada en la banda visible, y todavía menos en el infrarrojo cercano. El agua tiene un coeficiente de absorción diferente según las longitudes de onda: es más débil para las radiaciones azules y verdes que penetran más profundamente. El color azul del agua se explica por la

penetración de la luz azul difusa del cielo. Este color es menos absorbido por el agua que las radiaciones rojas; el agua refleja entonces una mayor proporción de radiaciones azules. Se debe considerar que cuando las superficies de aguas son lisas, se tienen reflectancias especulares que se pueden observar desde algunos ángulos de visión.

- **Superficies artificiales:** las superficies artificiales presentan niveles de reflectancia muy variables. Lo que interesa retener es simplemente que las reflectancias en la banda visible e infrarrojo cercano son poco diferentes. Sobre esta superficie la reflectancia especular puede ser también muy importante (por ejemplo techos de aluminio).

### 1.6.2 Emisión térmica

En el espectro denominado infrarrojo térmico, la irradiación solar que llega a la superficie de la Tierra es despreciable ante la emisión térmica de la superficie terrestre misma. Así, pues, la medición de la radiancia obtenida por un radiómetro en el espectro de 8-14  $\mu\text{m}$  permite en principio obtener la temperatura de superficie de los diversos objetos observados, con la condición de conocer su emisividad. Cuando un sensor está ubicado en un satélite a más de 800 km de altitud, una parte de la energía registrada se debe en parte a la emisión térmica de la atmósfera, aunque para gamas bien precisas la atmósfera es más o menos transparente a la radiación: si absorbe muy poco, entonces también reemite muy poco. Para el infrarrojo termal existe una “ventana atmosférica” en la gama de 8-14  $\mu\text{m}$ , siendo la razón por la cual esta banda es muy utilizada en la percepción remota.

La temperatura de las diferentes superficies observadas no depende únicamente de la cantidad de energía recibida, sino también de la naturaleza de la superficie y de su inercia térmica. Así la Tierra es más cálida que el océano durante el día, mientras que en la noche ocurre lo inverso, pues el agua al tener una mayor inercia térmica que el suelo se recalienta más lento durante el día y se enfría más lento durante la noche.

Contrariamente a la reflectancia en el rango visible, que entrega sólo una información de superficie, la inercia térmica entrega información sobre las propiedades físicas del volumen del material; en el caso de las rocas y de los suelos, el ciclo diurno de enfriamiento y de calentamiento penetra hasta una profundidad de algunas decenas de centímetros.

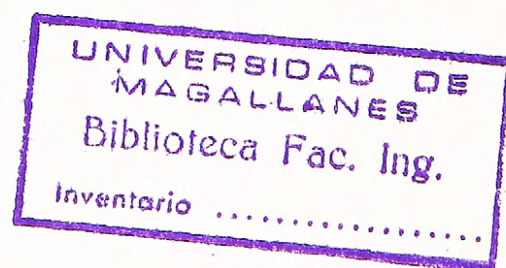
En meteorología, en el espectro infrarrojo termal utilizado en teledetección (8-14  $\mu\text{m}$ ), las nubes son prácticamente asimilables a cuerpos negros y tienen una emisividad de 0,98. La determinación de su radiancia permite entonces acceder a su temperatura, muy ligada a su altitud. Los satélites meteorológicos gracias a la repetitividad de sus observaciones permiten seguir el desplazamiento de masas nubosas.

En la nieve y en el agua, se tiene una emisividad más o menos constante, igual a 0,99. Por el contrario el suelo y las rocas tienen una emisividad muy dependiente de la longitud de onda. En efecto, para la mayoría de los minerales, se producen fenómenos de vibración de los enlaces químicos a ciertas longitudes de onda. Para estos niveles de energía la emisividad es entonces más reducida.

Así la radiancia obtenida en una banda espectral sobre un objeto determinado es transformada en temperatura brillante con la ayuda de la ecuación de Planck<sup>1</sup>. En percepción remota satelital se trata de una temperatura brillante en la parte superior de la atmósfera. La diferencia entre esta temperatura y la temperatura de la superficie puede alcanzar 15°K, según el contenido atmosférico de vapor de agua de la atmósfera y la emisividad considerada de la superficie en el suelo. Ciertas técnicas que utilizan la comparación de la radiancia obtenida por dos canales próximos (11 y 12  $\mu\text{m}$ ), permiten determinar en parte la emisión y la absorción térmica propia de la atmósfera y reducen la indeterminación sobre la temperatura de superficie a menos de 4°K.

---

<sup>1</sup> Para mayor información, referirse a la ecuación (3.6) del tercer capítulo.



## CAPITULO 2

### DESCRIPCIÓN DE LOS INSTRUMENTOS AVHRR Y SU SISTEMA RECEPTOR DE DATOS EN TIERRA

## CAPÍTULO 2: DESCRIPCIÓN DE LOS INSTRUMENTOS AVHRR Y SU SISTEMA RECEPTOR DE DATOS EN TIERRA

### 2.1 CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LOS SATÉLITES NOAA

Con el lanzamiento de la serie Tiros-N, la primera de la nueva serie de satélites meteorológicos de la NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration, Administración Nacional Oceánica y Atmosférica de los Estados Unidos de Norteamérica), se generó una nueva clase de imágenes satelitales, cuya calidad revolucionó el ambiente mundial. Estos la envían en forma digital, consistente en ráfagas de “unos y ceros” que contienen información en forma numérica acerca del valor de radiaciones terrestres, sistema que es conocido como HRPT (High Resolution Picture Transmission, Transmisión de Imágenes de Alta Resolución).

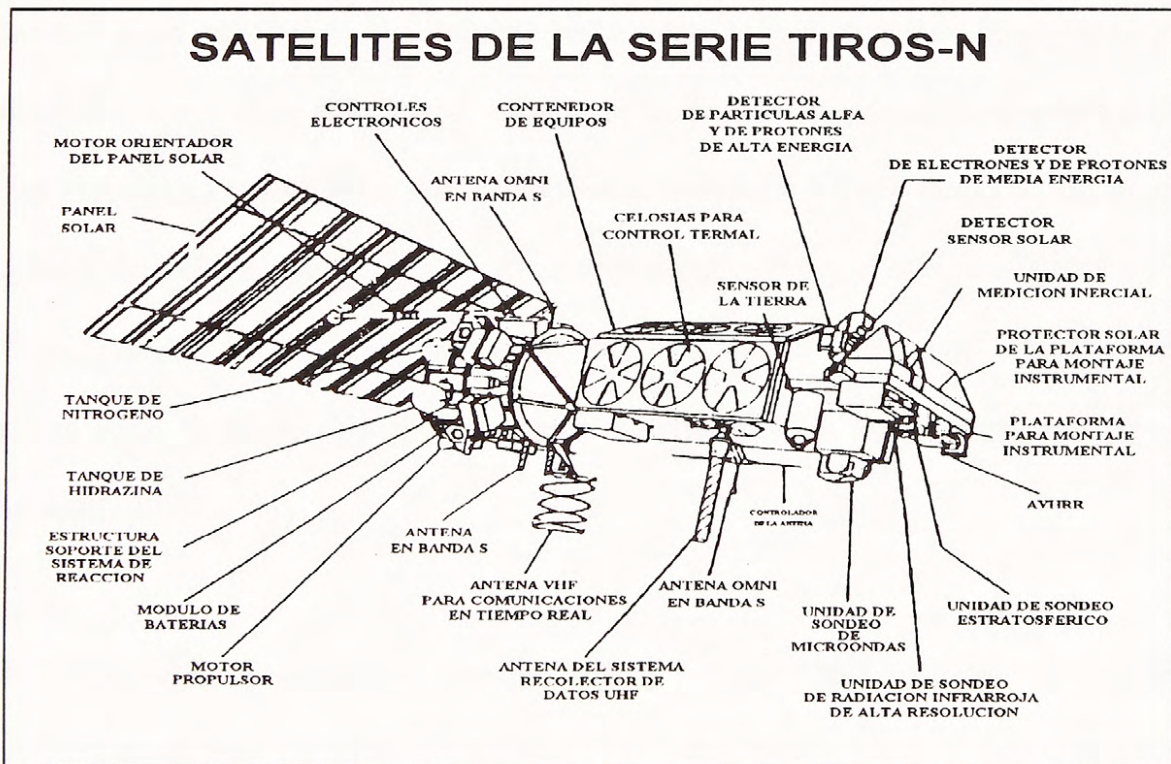


Figura 2.1.- Dibujo de los satélites de la serie Tiros, mostrando sus subsistemas más importantes (Schwalb, 1978).

Estos satélites meteorológicos cumplen una trayectoria de vuelo conocida como asíncrona, polar o sincrónica al Sol<sup>1</sup>, es decir su movimiento es de traslación por sobre los polos norte y sur, muy cerca de ellos, cumpliéndolo en forma periódica en el tiempo. Ellos tienen un periodo orbital de aproximadamente 102 minutos, a una altura sobre la Tierra de 833 km.

Esta órbita polar fue elegida porque ofrece la mejor geometría de vuelo al satélite, y le permite tener una visión panorámica de la superficie terrestre. Debido al tipo de movimiento, la nave cruza la zona de recepción a la misma hora solar local (horario de referencia) cada día y durante las veces que suceda este cruce.

El satélite presenta una serie de instrumentos instalados a bordo de la estructura espacial, y que son esenciales para llevar a cabo la recepción y posterior transmisión de la señal deseada. Los de mayor relevancia son los siguientes:

**AVHRR** (Advanced Very High Resolution Radiometer, Radiómetros Avanzado de Muy Alta Resolución): es un instrumento que consiste básicamente en una estructura de espejos rotatorios que escudriñan la superficie de la Tierra, a través de las pasadas que describe el satélite sobre ésta. Mide las radiaciones superficiales que son enviadas desde tierra (por medio de plataformas de transmisión). Las salidas de estos detectores son digitalizadas y procesadas a bordo, a fin de generar dos señales; una de baja resolución para transmisión analógica en VHF, y otra para transmisión en la banda S, la cual es de mayor resolución. Más adelante se verán con mayor profundidad.

**TOVS** (TIROS Operational Vertical Sounder, Sondas Verticales para Operación de los TIROS<sup>2</sup>): conjunto de instrumentos para recolectar datos como temperatura, vapor de agua, concentración de ozono, oxígeno, etc., de la atmósfera terrestre, y otras mediciones de la columna atmosférica

---

<sup>1</sup> Ver "APÉNDICE B, GLOSARIO".

<sup>2</sup> Tiros: Television and Infrared Observation Satellite, Satélite de Observación por Televisión e Infrarrojo.

que son de menor interés para el tema en desarrollo, ya que nos concentraremos en las propiedades de la superficie terrestre.

**TIP** (TIROS Information Processor, Procesador de Información del TIROS): son todos aquellos instrumentos y equipos necesarios para establecer contacto con la base de recepción satelital terrestre, y que rigen el comportamiento electrónico del satélite. Una de las funciones básicas de estos equipos es la de corregir los posibles cambios de trayectoria o desperfectos internos.

Toda la información entregada por estos instrumentos es combinada mediante una multiplexación (PCM), y difundida en la banda S, conformando la señal HRPT a la que se ha hecho mención, y cuyas características de interés se verán más adelante.

Tabla 2.1.- Parámetros orbitales de mayor importancia de los satélites NOAA.

Altitud (para un observador ubicado en la Tierra y con una visión perpendicular a la nave)	833 km
Inclinación (con respecto a su eje de simetría central)	98.74°
Periodo nodal (tiempo de demora a su movimiento alrededor de la Tierra)	101.58 min
Regresión nodal	25.4° / órbita
Órbitas por día	14.18
Duración del paso sobre la estación terrena	15 a 16 min
Diámetro del círculo de recepción	6200 km

## 2.2 INSTRUMENTOS AVHRR

Los instrumentos AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer, Radiómetros Avanzados de Muy Alta Resolución), son sistemas de barrido transversal de cuatro o cinco canales espectrales. Los satélites TIROS-N, NOAA-6, NOAA-8 y NOAA-10 tienen cuatro canales, y los NOAA-7, NOAA-9, NOAA-11, NOAA-12, NOAA-13 y NOAA-14 tienen cinco instrumentos AVHRR a bordo. Se ha dispuesto de cinco canales en el formato de datos para todos los satélites, por lo que el canal 5 es una repetición del canal 4, cuando sólo se cuenta con cuatro instrumentos. La ventaja de tener cinco canales AVHRR es que proveen una mejor corrección para la atenuación atmosférica. Estos sensores fueron diseñados para investigaciones multiespectrales de parámetros meteorológicos, oceanográficos, e hidrológicos, midiendo la radiancia reflejada y emitida en cinco bandas espectrales, partiendo de la parte visible del espectro hasta el infrarrojo termal.

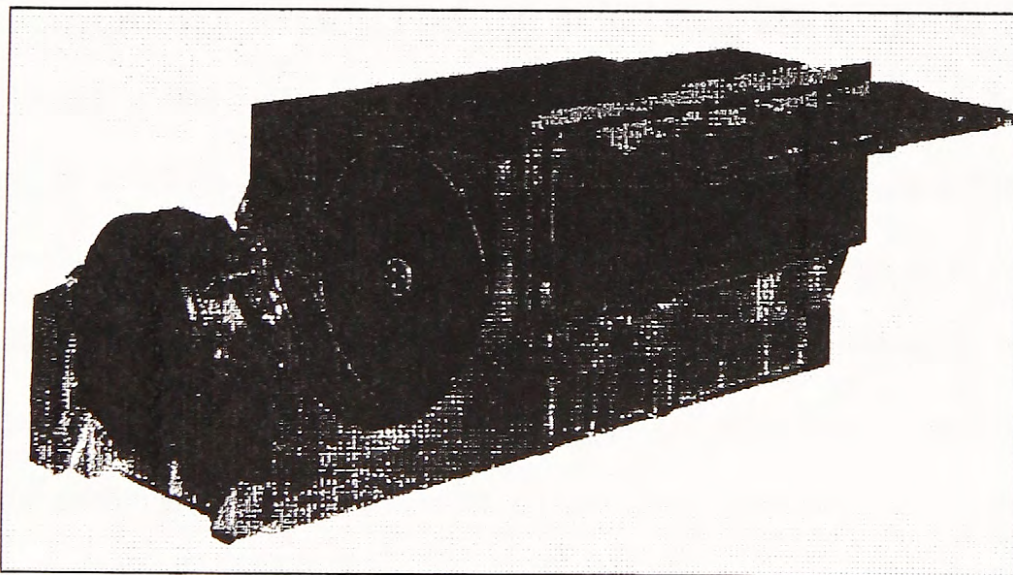


Figura 2.2.- Instrumento AVHRR a bordo del satélite NOAA-11 (ITT Aerospace Division).

La cobertura es global, en el día y en la noche, con un campo instantáneo de visión (Instantaneous Field of View, IFOV<sup>1</sup>) de aproximadamente 1.4 miliradianes, obteniendo un

<sup>1</sup> Ver "APÉNDICE B, GLOSARIO".

alcance de 1.1 km en el nadir<sup>1</sup>, para una altitud nominal de 833 km. El barrido transversal de los sensores alcanza un ancho de hasta 2700 km. Esta separación es mayor que la que existe entre trayectos orbitales sucesivos, y provee una cobertura completa de la Tierra.

Los anchos de la banda espectral, en micrómetros, de los sensores AVHRR para la serie TIROS-N, son los mostrados en la Tabla 2.2; además se incluye el IFOV en miliradianes para cada canal.

Tabla 2.2.- Respuesta espectral en  $\mu\text{m}$  de cada sensor para los diferentes satélites

CANAL	TIROS-N	NOAA-6,8,10	NOAA-7,9,11,12,14	NOAA-13	IFOV (mrad)
1	0.55-0.90	0.58-0.68	0.58-0.68	0.58-0.68	1.39
2	0.725-1.10	0.725-1.10	0.725-1.10	0.725-1.0	1.41
3	3.55-3.93	3.55-3.93	3.55-3.93	3.55-3.93	1.51
4	10.5-11.5	10.5-11.5	10.3-11.3	10.3-11.3	1.41
5	10.5-11.5	10.5-11.5	11.5-12.5	11.4-12.4	1.30

Los AVHRR tienen un sistema de barrido transversal que usa un espejo a 45°, rotando a 360 revoluciones por minuto, alrededor de un eje paralelo a la superficie de la Tierra. El proceso mide las longitudes de onda visibles e infrarrojas al mismo tiempo, construyendo una imagen en dos dimensiones en el proceso; el movimiento del satélite a través de su órbita causa el registro de líneas sucesivas en forma continua. La imagen total se compone de 2048 pixeles, pudiéndose recibir muchas líneas, dependiendo esto sólo de las estaciones en Tierra que siguen la trayectoria del satélite a medida que se mueve; en este proceso hay seis líneas transmitidas por segundo. Como se dijo anteriormente, cada pixel representa 1.1 km en el nadir, pero a medida que la medición se aleja de este punto, el pixel progresivamente se va elongando y deteriorando (en los bordes del barrido la resolución puede llegar a 4 km de longitud). Se puede ver en la figura 2.3 un diagrama esquemático del proceso. El espejo en sí mismo es de forma elíptica, de aproximadamente 20.95 cm por 29.21 cm, y es lo suficientemente largo como para abarcar el

<sup>1</sup> Ver "APÉNDICE B, GLOSARIO".

campo de visión del lente telescópico, el cual es de 20.32 cm de diámetro (ver la figura 2.2). La luz que proviene de la escena es reflejada por el espejo y pasa, a su vez, por un afocal de 20.3 cm de apertura; éste, por su parte, la deja pasar hacia una entrada y un colimador que la concentra sobre un elemento dispersor (rejilla óptica), el que separa la energía radiante en bandas espectrales discretas (de distinta longitud de onda), enviándola posteriormente a un conjunto de cinco detectores electrónicos sensibles a las longitudes de onda visible, infrarrojo e infrarrojo cercano (ver la figura 2.4). Los canales visible e infrarrojo cercano utilizan detectores de silicio; en cambio el detector de la banda infrarroja es una aleación de metales.

Los datos AVHRR son transmitidos básicamente en dos formatos diferentes; APT (Analogue Picture Transmission, Transmisión de Imagen Análoga), y HRPT (High Resolution Picture Transmission, Transmisión de Imágenes de Alta Resolución). El formato APT es una representación análoga simple de las imágenes, la cual es útil para una apreciación cualitativa de la imagen, consistentes en que básicamente dos de los cinco canales son escogidos, transmitidos cada tres líneas de datos (a un rango de dos líneas por segundo, o comúnmente 120 líneas por minuto), resultando en una resolución espacial equivalente de 4 km. Los datos digitales HRPT se utilizan para trabajos detallados cuantitativos, y estos consisten de 10 bits para los cinco canales AVHRR de 2048 pixeles por línea de datos, los cuales son codificados en palabras de 16 bits, y añadidos con la demás información enviada por el satélite. Ya que el sensor fue inicialmente diseñado para observar una gran cantidad de condiciones ambientales, la gama de sensibilidades de cada canal es muy grande, por lo que en la práctica sólo una pequeña parte de todo el margen disponible de 1024 niveles es ocupado en una imagen.

Una vez que la luz llega a los detectores, generan una corriente eléctrica proporcional, la cual es amplificada y convertida en un número digital (Digital Number, DN). Los efectos de la polarización se minimizaron en forma práctica al elegir en forma apropiada la orientación de los componentes ópticos internos. Este número digital corresponde a una medición

en bruto del sensor, proporcional al número de fotones y así al monto de energía que ingresa a la apertura del sensor y alcanza al detector.

La correspondencia entre el número digital y el monto de radiación es compleja, pudiendo ser alterada por diversos factores tales como efectos señal-ruido en la inducción de corrientes eléctricas en el sensor; pérdida de información debido a la discretización en un número digital; degradación de los componentes ópticos; cambios en las características de ganancia de los componentes de los amplificadores eléctricos, e incluso el aumento de ruido producto de otros sistemas pertenecientes al satélite. Es la calibración radiométrica el proceso que establece una relación entre la energía radiante que ingresa al instrumento y los valores grabados. En general, la calibración radiométrica involucra exponer al radiómetro a fuentes de radiación conocidas y bien documentadas, y luego determinar la relación directa entre la salida del radiómetro y la intensidad de la radiación incidente.

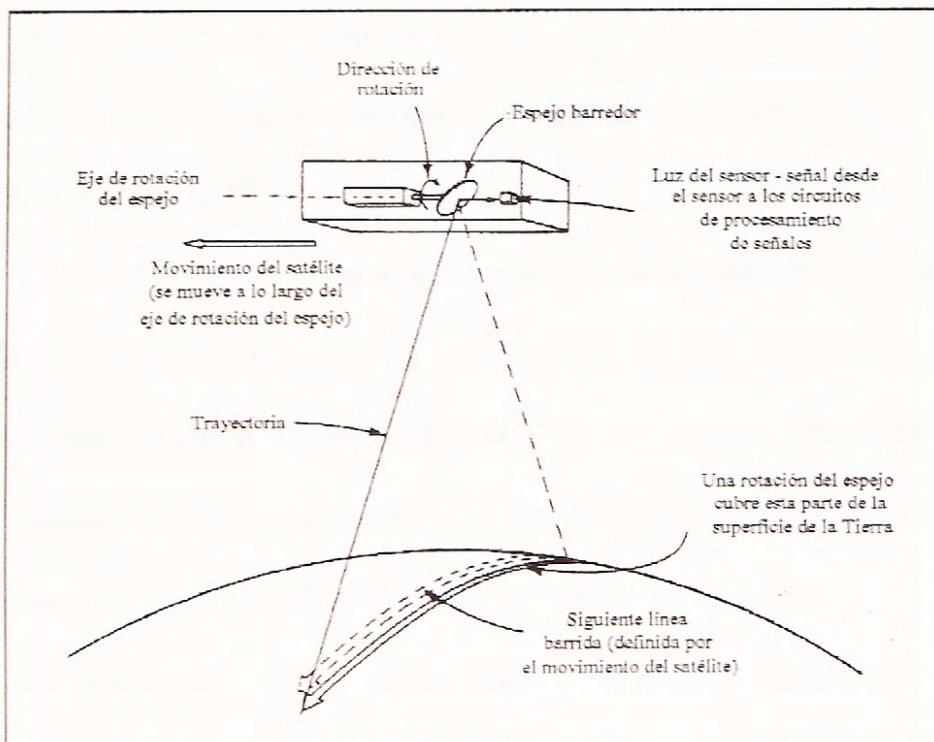


Figura 2.3.- Barrido de un instrumento AVHRR abordo de los satélites NOAA.

El instrumento está diseñado para mantener una temperatura constante de operación para los detectores infrarrojos y proveer una razón señal-ruido de 3:1, con una precisión en albedo<sup>1</sup> de 0,5%. Cada sensor AVHRR barre la Tierra a 51.282 milisegundos, tiempo en el cual cada salida de datos análogos de cada canal es digitalizado. Como se mencionó anteriormente, el barrido es a una tasa de seis líneas por segundo, y el tiempo de muestreo de los sensores AVHRR es de 39,936 muestras por segundo por canal, correspondiendo cada una de ellas a un ángulo de rotación del sistema sensor de 0,95 miliradianes. A esta tasa de muestreo hay 1,362 muestras por IFOV. Para un total de 2048 muestras por canal por barrido de la Tierra, el espejo rotatorio del instrumento debe hacer un giro de +/-55,4 grados desde el nadir (subpunto de observación). Durante un barrido, los sensores 'observan' el espacio frío, y un cuerpo negro interno. La temperatura del blanco interno es monitoreada por termómetros de resistencia de platino instaladas en la carcasa del instrumento, y el espacio se supone que tiene una temperatura correspondiente a un cuerpo negro de 3° Kelvin. De esta forma se hace una calibración lineal interna de los canales infrarrojos, usando el espacio exterior como cuerpo negro estable; no se realiza calibración en vuelo de los canales visibles, aunque el espacio exterior está disponible como punto de referencia.

La modificación no lineal a esta calibración es llevada a cabo tiempo después en el post-procesamiento, y toma en cuenta la no-linealidad de los sensores, la medición de la temperatura del objetivo interno, el cálculo de la radiancia del objetivo, las reflexiones y emisiones internas, etc. Aunque esto varía de instrumento en instrumento, el objetivo del diseño es que tengan una temperatura diferencial de ruido equivalente de 0,12 °K.

Los errores de posición de montaje de los instrumentos son minimizados por el Sistema de Control y Determinación de Altitud (Altitude Determination and Control System, ADACS) a bordo de los satélites. El sistema los orienta de forma que el instrumento siempre apunte al sub-punto o nadir del satélite. Los errores residuales, de posición, son incluidos en los

---

<sup>1</sup> Ver "APÉNDICE B, GLOSARIO".

datos transmitidos a tierra. Eventualmente hay software que usarán estas imprecisiones para corregir los errores posicionales, aumentando notoriamente la exactitud de la ubicación de los datos con respecto a la Tierra.

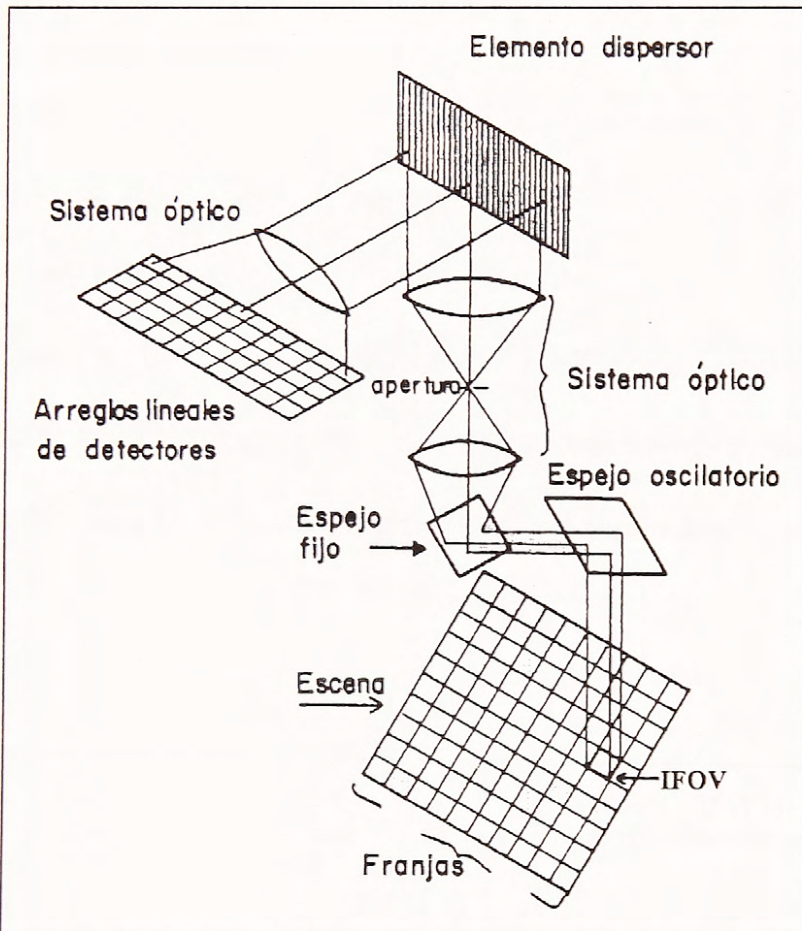


Figura 2.4.- Arreglos lineales de los detectores AVHRR, para medir un IFOV en varias bandas a la vez (Lira, 1987).

## 2.3 SISTEMAS DE COMUNICACIONES DE LOS SATÉLITES NOAA

Los satélites de la serie TIROS-N contienen varios módulos electrónicos, incluyendo:

- dos transmisores de banda S (1698 ó 1707 MHz, según la serie del satélite) para transmisión en tiempo real de imágenes AVHRR (lectura directa), y de datos de telemetría del satélite.
- un transmisor en banda S de respaldo (1702.5 MHz) para transmisión en tiempo real de imágenes AVHRR (lectura directa), y de datos de telemetría del satélite.
- un transmisor de 137 MHz, para imágenes de baja resolución.

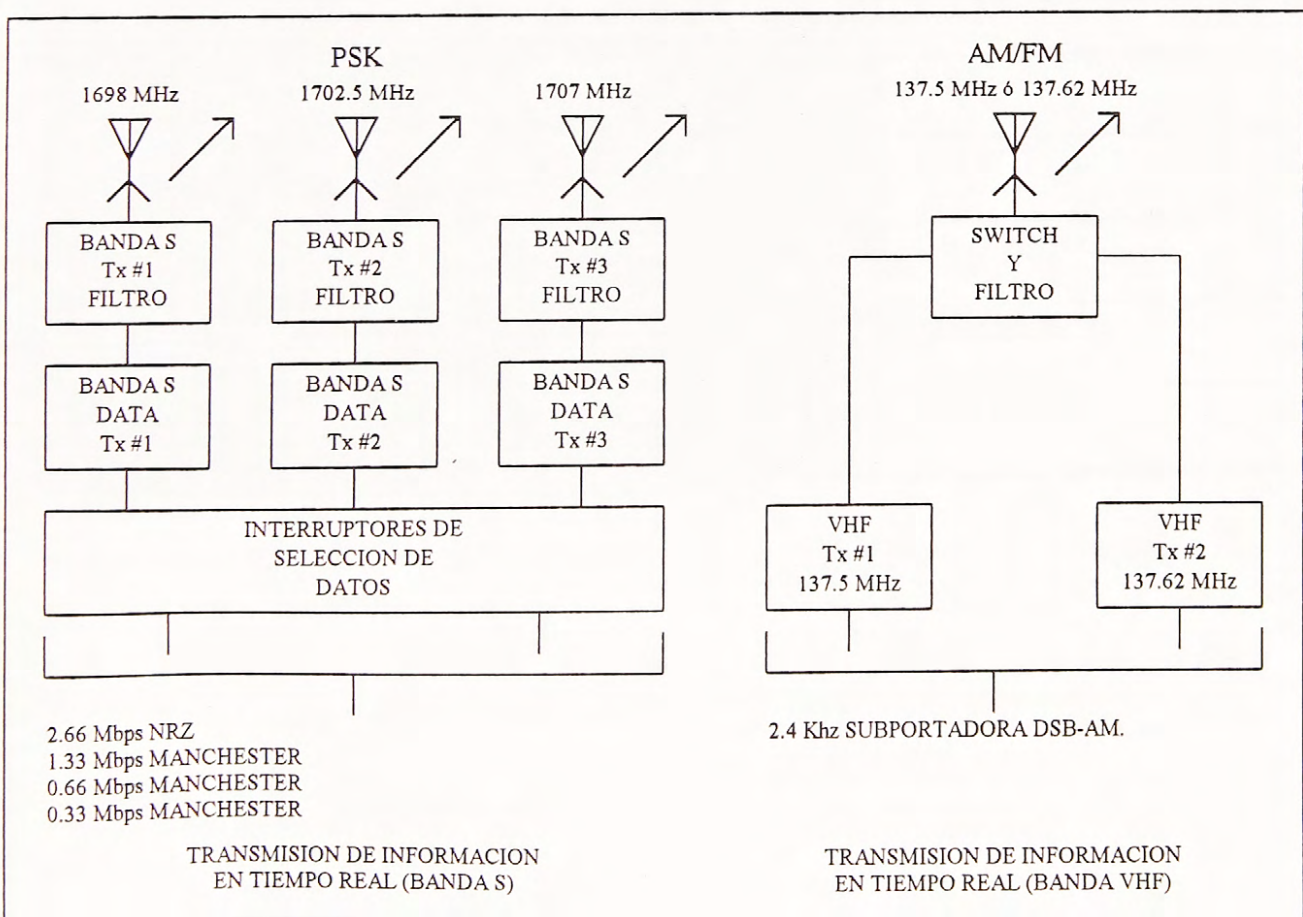


Figura 2.5.- Estructura de comunicaciones de los satélites NOAA.

La potencia de salida es del orden de los 5.25 Watts. Los datos digitales son enviados al transmisor en código Manchester, y así transmitidos a una velocidad de 665.4 kilobits por segundo (kbps), siendo moduladas en fase (P.S.K.). La señal es transmitida a 1707 MHz (para los NOAA 9 y 11), y 1698 MHz (para los NOAA 10 y 12); también está disponible un tercer canal para propósitos de respaldo. Sus características más importantes se describen en la siguiente tabla.

Tabla 2.3.- Características principales de la señal HRPT.

Frecuencia de transmisión	1698, 1707 y 1702.5 MHz
Estabilidad de la frecuencia	20 ppm
Polarización de la antena transmisora	circular derecha, derecha, izquierda, respectivamente
Pérdidas en la transmisión	2.50 dB
Potencia transmitida	5.25 Watts
Resolución de la información	1.10 km
Velocidad de transmisión de los bits	360 líneas/minuto
Modulación	P.S.K.
Índice de modulación	$\pm 67.3^\circ$
Velocidad de transmisión de los bits	0.6654 MHz
Código de información	Manchester
Ancho de banda	5.0 MHz

### 2.3.1 Tipos de modulación empleadas por el sistema de comunicaciones de los satélites NOAA

Existen diferentes técnicas para modular una portadora; modulación de tipo analógica, de tipo digital o una combinación de ambas. Dentro de las digitales podemos mencionar las más conocidas: ASK (Amplitud Shift Keying), FSK (Frequency Shift Keying) y PSK (Phase Shift Keying), cuando se modula la portadora con corrimientos de amplitud, frecuencia o fase, respectivamente, siendo la modulación PSK de 2 fases (o bifásica) la que usa el sistema de comunicaciones de los satélites de la serie Tiros-N. Ella es la representación de la información (bits) a través de la fase de la portadora a utilizar. Un 'uno' de información, se representa con una fase 'positiva', mientras que la información contraria, vale decir un 'cero', es representada con una fase 'negativa', siendo este cambio de fase de  $67,3^\circ$ . La siguiente figura muestra la representación del número binario 1101001.

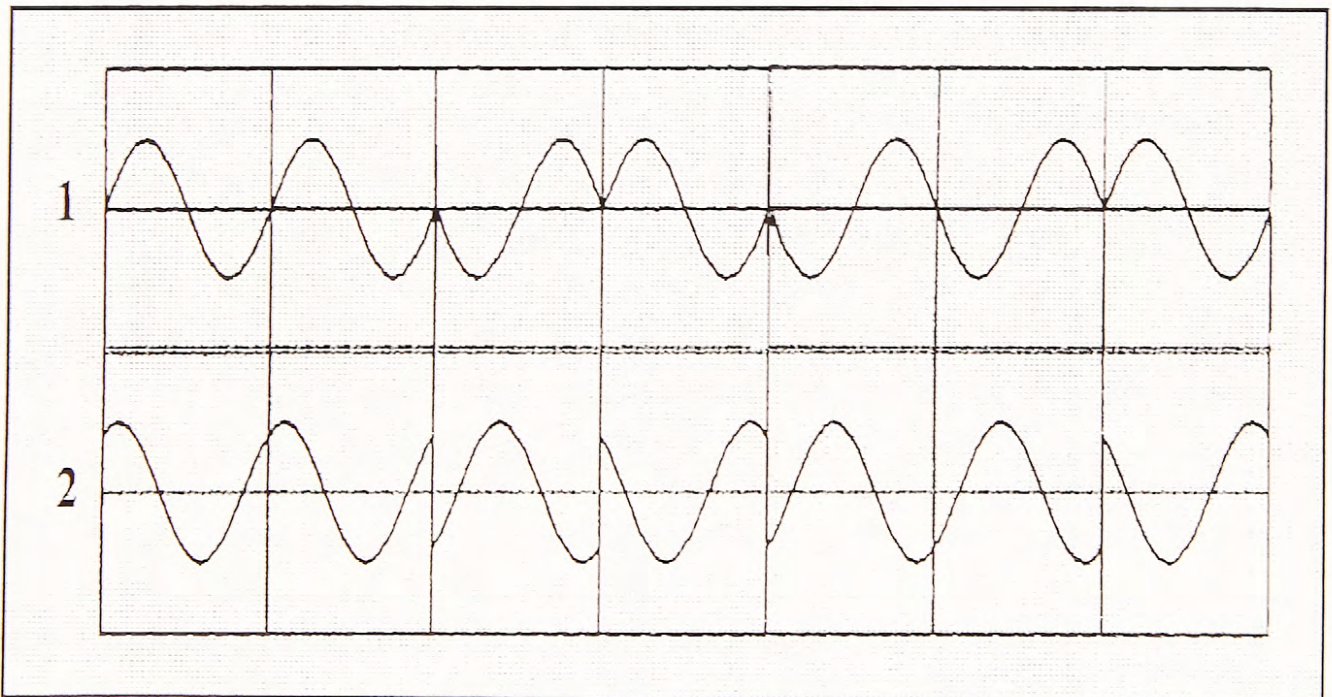


Figura 2.6.- Representación de un número binario en modulación PSK de dos fases. 1: señal a modular 1101001; 2: modulación PSK  $\pm 67,3^\circ$  (adaptado de Herbert Taub, 1983).

Otro tipo de modulación usada en estos sistemas es el código Manchester (Split Phase, Fase Dividida). Este representa la información '1' y '0' de la forma como se muestra en la siguiente figura:

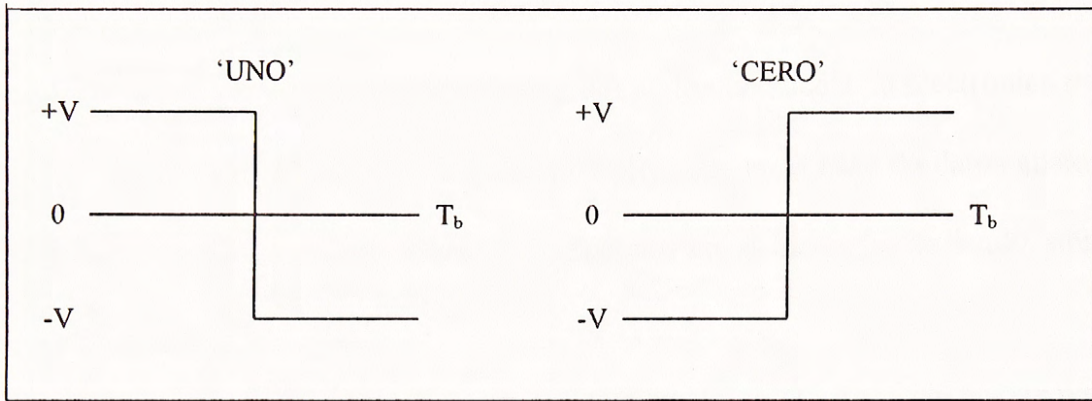


Figura 2.7.- Representación de la información en código Manchester.

donde  $V$ : amplitud de la información

$T_b$ : periodo del bit (seg);  $2\pi/T_b$  es su frecuencia angular (rad/seg).

## 2.4 DESCRIPCIÓN TÉCNICA DEL SISTEMA DE RECEPCIÓN SATELITAL

### 2.4.1 Requerimientos básicos para una estación de recepción de imágenes HRPT

Los datos HRPT son de formato digital, lo que hace a la electrónica necesaria para recibir y demodular el enlace satelital sea más compleja que en el caso de datos análogos. Existen muchas unidades integradas y ensambladas disponibles en el mercado, variando ampliamente en precio y características.

Los elementos básicos para un sistema de recepción de imágenes HRPT son:

- una antena receptora.
- alimentador para la antena receptora.
- amplificadores de bajo ruido (LNA, Low Noise Amplifier).
- conversor de bajada (downconverter).
- demodulador (por ejemplo: PLL).
- tarjeta de sincronización de bits.
- computador.

#### Antena y alimentador:

La antena típica usada es la parabólica, siendo su tamaño mínimo para la banda S de 1,2 m de diámetro. Tal plato debiera tener una ganancia de alrededor de 24 dB. Algunos sistemas amateurs usan antenas yaggi (con ganancias menores a los 22 dB), pero los resultados no son del todo satisfactorios. Los mayores problemas presentes son lo angosto del haz del enlace, y el viento que pueda afectarla. La antena debe ser circularmente polarizada, por lo que se necesitan dos alimentadores ubicados a 90° uno del otro. El coaxial de las dos antenas debe estar unido en un *combinador de cuadratura*, conocido como híbrido a 90°. El coaxial debiera ser muy corto,

con el combinador ubicado detrás del alimentador. Su salida debe conectarse a amplificadores de bajo ruido (LNA), los cuales también debieran estar detrás del alimentador. La polarización es circularmente a la derecha e izquierda.

#### **Amplificadores de bajo ruido (LNA):**

Uno de los aspectos más críticos de la estación receptora de imágenes HRPT, es la sensibilidad y el ruido provocado por los preamplificadores. La recepción de los datos con antenas del tamaño usado comercialmente no es posible a menos que las características técnicas de los LNA sean suficientemente buenas. El ruido de los LNA debe ser de 0,8 dB o menor, lo cual corresponde a una temperatura equivalente de ruido de 59° K, o menor, debiendo ser su ganancia de al menos 30 dB.

#### **Convertor de bajada (downconverter):**

El preamplificador es conectado a la etapa de conversión de bajada con un coaxial de muy baja pérdida, a menos que estos sistemas estén integrados; presenta una banda pasa bajos de radiofrecuencias de 16 MHz, y convierten las señales de 1698, 1707 y 1702.5 MHz a señales de 133 ó 142 MHz. La selección del canal se realiza al sintonizar una frecuencia intermedia usando un circuito PLL (Phase Locked Loop, Lazo de Enclavamiento de Fase). La frecuencia intermedia tendrá una banda angosta (3 MHz), destinada a fijar el ancho de banda del ruido final del sistema. El filtrado de la entrada de radiofrecuencias es muy crítico en esta etapa, ya que determinará la susceptibilidad ante interferencias desde fuera de la banda.

En la etapa final del convertor de bajada se obtiene una señal VHF, a una frecuencia conveniente para la demodulación. El rango puede ser desde los 10 a 70 MHz.

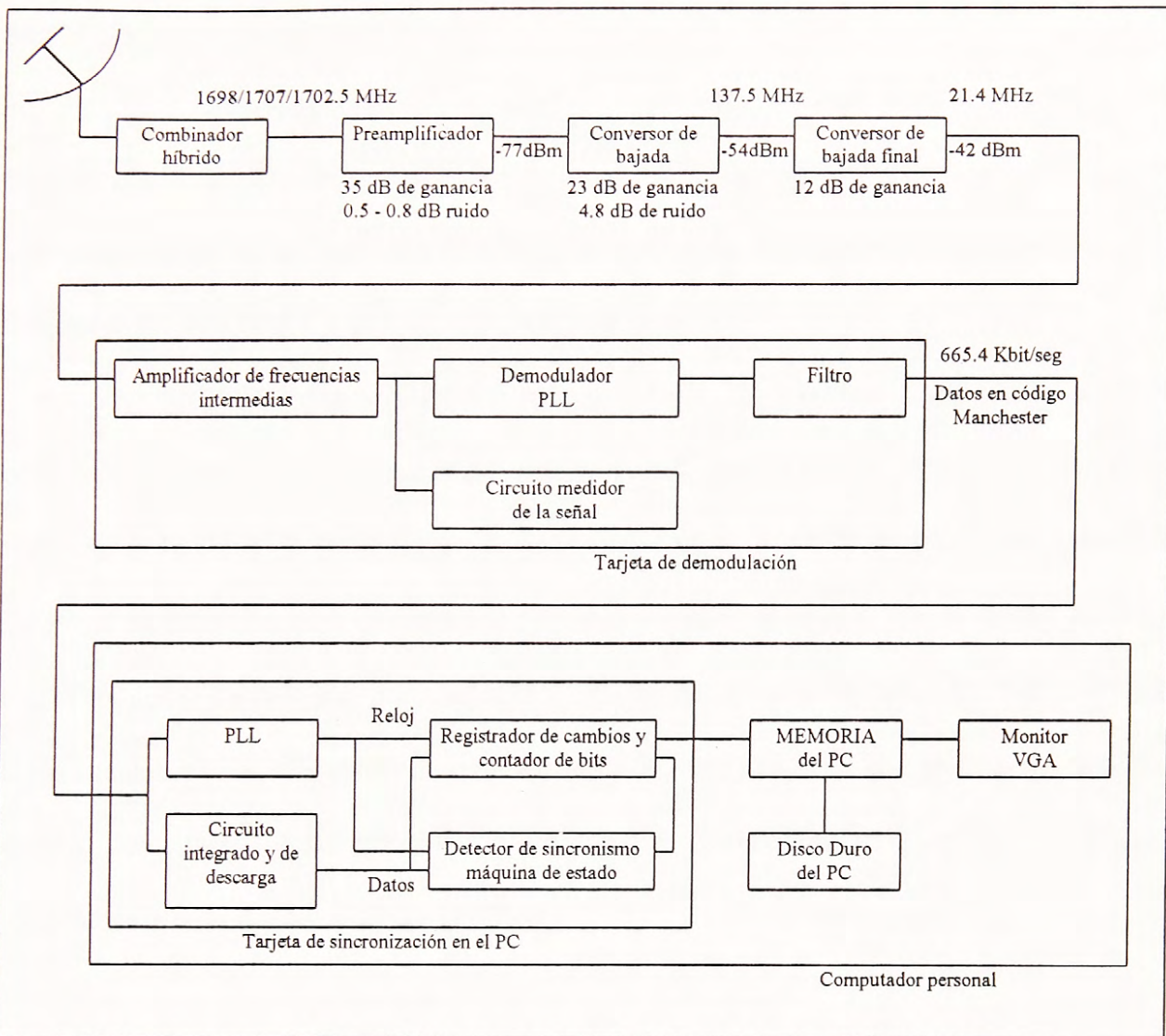


Figura 2.8.- Diagrama de bloques de una estación de recepción de datos HRPT.

### Demodulador:

La sección más grande de una estación de recepción de datos HRPT, es un filtro-amplificador que alcance el nivel de señal, y que establezca el pasa banda final del sistema para la demodulación de la fase. Se requiere de una ganancia de 10 a 15 dB, con un pasa banda de alrededor de 3 MHz. Esto provee una señal de -30 dBm a un demodulador PLL. Los diseños típicos usan un amplificador, un demodulador discreto PLL, un filtro en la salida y un medidor de la señal. La salida de esta sección es una señal en código Manchester.

### Tarjeta de sincronización de bits:

El componente final del sistema es una tarjeta sincronizadora de bits y de trama. El circuito extrae el reloj de 0.665 Mbps, y provee la deconmutación de la telemetría, y de los diferentes canales de las imágenes HRPT. El propósito del deconmutador es separar los datos de uno de los canales HRPT antes de enviarlo al computador.

El sincronizador de bits y la puerta DMA de la tarjeta toman los datos HRPT (en código Manchester) desde la tarjeta demoduladora. El reloj se deriva por un PLL que ignora las transiciones de datos. El dato es extraído por medio de una técnica digital integrada y de descarga. La trama de sincronización es detectada por una *máquina de estado*, que busca un patrón de 60 bits al comienzo de cada trama menor HRPT<sup>1</sup>. Contiene una línea medida, de 2048 pixeles, de los cinco canales AVHRR. El reloj y la señal de datos también van hacia una serie de *registradores de cambio*, los cuales forman el **byte** o **palabras** que son llevadas al computador por medio de técnicas de acceso directo a memoria (DMA).

### Computador:

El computador debe tener varias características apropiadas para la recepción de datos de los satélites NOAA. Como la señal se adquiere en tiempo real a medida que el satélite pasa por el ángulo de recepción de la antena, los datos se van almacenando en la memoria RAM del PC a medida que llegan a la estación receptora en tierra; si se considera una pasada típica de un satélite (15 minutos), recepcionando los cinco canales AVHRR, puede originarse un archivo de hasta 100 Mbytes. Por lo tanto es importante la cantidad de memoria y de espacio en el disco duro que se disponga, dependiendo de las áreas que el usuario quiera comúnmente sensar, y de la periodicidad de las capturas de imágenes.

---

<sup>1</sup> Ver "APÉNDICE C, ESTRUCTURA DE LA TRAMA DE DATOS HRPT"

#### 2.4.2 Sistema BURL de recepción de datos HRPT

El sistema fabricado por la BURL (Bradford University Research Ltd.) e instalado en la Universidad de Magallanes, consiste principalmente en una antena en forma de cono, una unidad receptora y un computador personal. Este permite la captura de cualquiera de los satélites de la serie NOAA (generalmente NOAA 9, 10, 11, 12 y 14).

Los usuarios de sistemas satelitales geoestacionarios (Meteosat, GOES), necesitan saber poco acerca de todo el proceso de captura de datos; el satélite permanece fijo en un lugar, y todo es constante (tiempos de transmisión, etc.), de forma que los datos son recibidos y procesados rutinariamente. Los usuarios pueden tratar al sistema como una caja negra que produce imágenes a intervalos regulares. Con satélites de órbita polar, todo es variable - no hay dos días con los mismos patrones de transmisión, obteniéndose diferentes áreas en cada pasada. A medida que los satélites NOAA pasan dentro del campo visual de los usuarios, la antena tiene que ser apuntada en la dirección general del satélite de forma que los datos puedan ser recibidos.

La trayectoria puede ser estudiada usando uno de los numerosos programas comerciales disponibles, los que muestran el movimiento de cualquier satélite en cualquier parte del mundo. El usuario puede observar la trayectoria de la serie de satélites NOAA a medida que pasan de polo a polo. Excepto cerca de los polos, las trayectorias son esencialmente de Sur a Norte, llamándolas órbitas ascendentes, o Norte a Sur, llamadas órbitas descendentes. Para sitios lejos de los polos, las órbitas tienen una inclinación de alrededor de 20 grados con respecto al meridiano Norte-Sur. Para órbitas directamente sobre la ubicación de la antena receptora, la trayectoria es más recta con un ángulo que se llama ángulo de alineación. La BURL desarrolló su propio software llamado ORBIT, el cual muestra claramente la trayectoria sobre un mapa centrado en la ubicación del usuario. Este programa es usado para planificar, pudiendo el usuario seleccionar un área de interés. El programa indica hacia dónde debe apuntar la antena, controlando un motor perteneciente a un sistema direccionador.

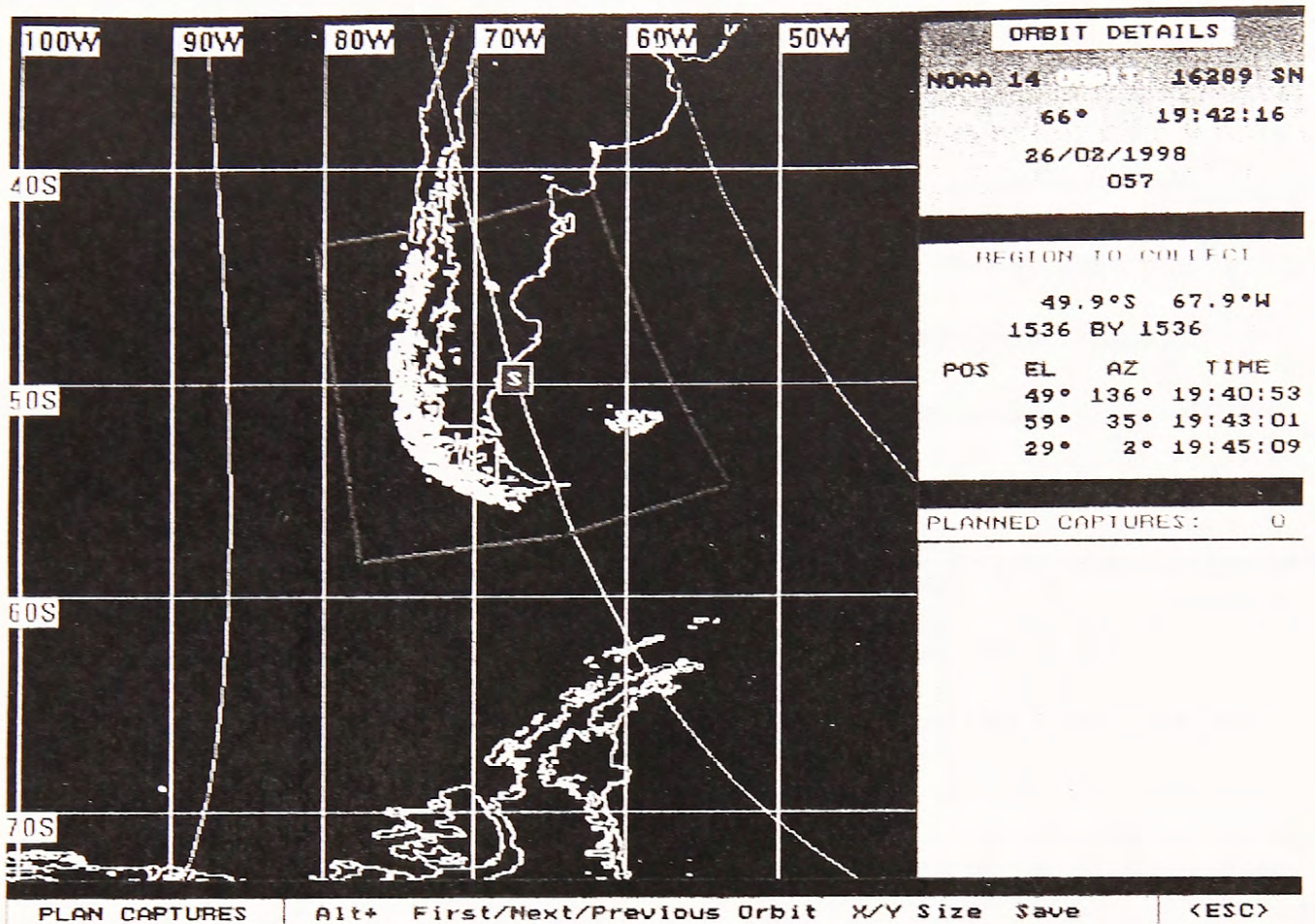


Figura 2.9.- Pantalla del programa ORBIT desarrollado por la BURL.

Para órbitas cercanas a la estación receptora, el satélite aparecerá en el horizonte por alrededor de 1000 segundos, es decir unas 600 líneas barridas, de 5 x 2048 puntos. Para órbitas bajas, el tiempo sobre el horizonte es mucho más corto, por lo que hay menos datos para capturar.

Todos los programas de predicción de órbitas necesitan ser puestos al día frecuentemente, con nuevos elementos de referencia que muestran dónde se encontrará el satélite para un momento en particular, aunque no es posible predecir en forma exacta las futuras posiciones debido a factores orbitales desconocidos que varían, tal como fuerzas de fricción, etc.

Abundantes mediciones de la señal transmitida desde la serie de satélites NOAA, mostraron que la señal presenta rápidos y profundos cambios de la polarización, resultando en la necesidad de usar grandes antenas en el caso de utilizar detectores aéreos dipolares

convencionales. Sin embargo, la BURL desarrollo un receptor especial que cambia en forma automática la polarización, el cual es capaz de hacerlo muchas veces por segundo para optimizar al sistema, a pesar de los cambios en la polarización. Como resultado es posible obtener señales libres de error para elevaciones del satélite por sobre los  $10^\circ$  usando una antena pequeña. El uso de esta combinación excelente de receptor/antena ofrece significantes mejoras sobre los sistemas convencionales respecto al costo de fabricación e instalación, y la facilidad de operación y mantenimiento.

Con el sistema BURL, el cual utiliza una antena con un haz ancho (15 grados comparados a los 5 grados de una antena parabólica de 1.8 metros de diámetro), es sólo necesario actualizar los datos orbitales TLE<sup>1</sup> (Two Line Elements, Elementos de Dos Líneas) cada quince días para obtener una buena captura.

La antena está montada en una barra horizontal unida vía un pivote a un polo vertical, situada a alrededor de un metro sobre el terreno, tiene una apertura de 65 cm por 65 cm, y una longitud de 1.5 metros. Una ventaja adicional es que la recepción de señales cuando el satélite está cercano es muy fuerte, lo cual no es el caso de muchos otros sistemas de recepción. Cuando está activa, el usuario observa la calidad de la señal (razón señal-ruido) a través de un voltímetro (si la antena no recibe señal, hay 1,5 volts; si la antena recibe máxima señal, hay 3,5 volts), girando la antena en acimut y elevación para obtener la máxima calidad. El sistema receptor también incluye un zumbador, el cual emite un sonido cuando éste detecta una señal, aunque sea pequeña.

Son necesarios puntos específicos para establecer el área a ser capturada y la trayectoria del satélite a ser seguida. El programa ORBIT indica toda esta información.

---

<sup>1</sup> Ver "APÉNDICE D, ESTRUCTURA DE LOS DATOS TLE".



Figura 2.10.- Antena de recepción de datos HRPT desarrollada por la BURL

Desde el punto de vista del usuario, es conveniente dividir la trayectoria en tres tipos :

- aquellas que pasan al Este de la posición del usuario
- aquellas que pasan por encima
- aquellas que pasan al Oeste de la posición del usuario

Para trayectorias como la del primer o tercer caso, donde la máxima elevación alcanza los 83 grados o más, la técnica es tratar a la órbita como si ésta estuviera exactamente por encima del receptor. En tales casos todo lo que se necesita es apuntar la antena en acimut a lo largo de la dirección de alineación (apuntarla hacia donde el satélite cruzará primero el horizonte), y luego simplemente mover la antena en elevación. Durante este proceso se necesitará ajustar el acimut en unos cuantos grados para obtener la mejor señal. Note que la antena necesita ser movida muy lentamente al comienzo, pero más rápidamente a medida que ésta llega a la vertical; la máxima velocidad es de medio grado por segundo.

Para órbitas de bajas elevaciones máximas, el proceso de apuntar consiste en mayormente en rotar la antena en acimut. Los casos más difíciles son aquellos en que la máxima elevación es mayor a los 70 grados (pero no sobre los 83 grados). Estas trayectorias se caracterizan por cambios lentos en el comienzo y final, y cambios rápidos en el punto de máxima elevación donde el acimut tiene que ser rotado más rápidamente, cambios de muchos grados por segundo.

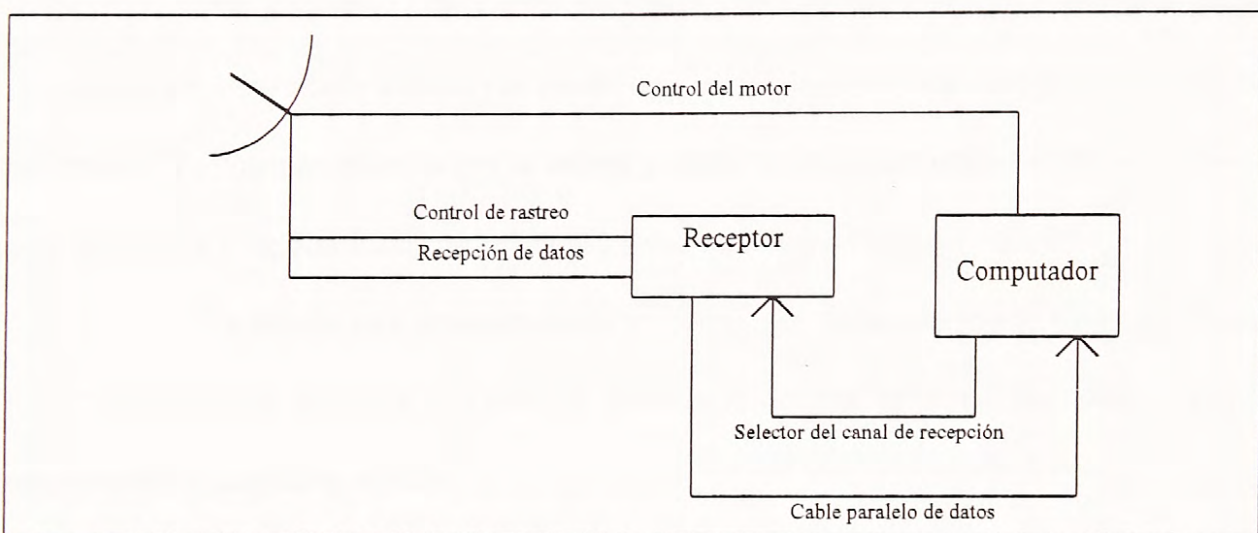


Figura 2.11.- Esquema del sistema receptor de la BURL.

La antena cónica permite la captura de aproximadamente 600 líneas de datos sin moverla. El campo de visión permite obviar la necesidad de conocer con exactitud la trayectoria de los satélites. El cono puede ser controlado por un motor de 50 volts proporcionados por la unidad receptora, o manipulado manualmente, para una fácil y precisa captura bajo todas las circunstancias.

Los datos satelitales son enviados a tierra a través de tres transmisores de radiofrecuencia (banda S) de 5.25 Watts. Uno de estos transmisores es usado continuamente para el envío de datos HRPT, mientras que los otros dos son usados para los datos almacenados en las grabadoras a bordo del satélite.

En tierra los datos son recibidos mediante antenas de radiofrecuencias (banda S), de 1698 MHz y 1707 MHz polarizadas circularmente hacia la derecha, y una polarizada

circularmente hacia la izquierda de 1702.5 MHz. Sólo durante la fase ascendente, uno de los transmisores en la banda S se conecta a una antena omnidireccional para proveer telemetría al satélite.

El sistema provee un programa que permite calibrar la posición de la antena una vez que ésta se haya instalado y se encuentre operando. El software se llama CAL\_HORN.EXE, el que produce el archivo de calibración HORNCAL.CAL, usado por el programa de captura de datos. Este archivo contiene información necesaria para apuntar la antena a un cierto ángulo de calibración en elevación y acimut (se puede usar el sol de mediodía como excelente punto de referencia). También se necesita que la antena y motor controlador estén tan verticales como sea posible ( $\pm 1^\circ$ ), o de otra forma no se obtendrá una calibración exacta.

La antena está programada de tal forma que no sea apuntada a ángulos menores a los  $5^\circ$  en elevación, debido a que esto no ayuda a la captura de datos, aumentando el ruido y empeorando la calidad de la señal.

Dos amplificadores polarizados de bajo ruido, permiten que los datos sean recepcionados desde el satélite con una calidad uniformemente alta, desde los  $5^\circ$  de visibilidad con respecto al horizonte. Se debió tener un extremo cuidado en la fabricación de los amplificadores de bajo ruido (LNA, Low Noise Amplifiers), ya que se requieren para un buen balance en la adaptación de la polarización. Estos presentan una ganancia de alrededor de 32 dB, y el ruido térmico del sistema para ángulos de elevación muy altos es de  $\pm 30^\circ$  K.

La unidad receptora está integrada a un computador, de forma que las líneas de datos que se capturen sean verificadas a medida que se reciben. Así la captura de 'ventanas' de datos se vuelve práctica, reduciendo los requerimientos de procesamiento. El receptor ha probado ser eficiente en su operación, proveyendo datos de alta calidad bajo una amplia variedad de circunstancias. La unidad automáticamente selecciona el satélite del que capturará datos, incluyendo un ajustador del satélite por causa del efecto Doppler, y así procede la navegación de la imagen. El receptor tiene su propia fuente de poder de 50 volts para su actuar en forma

independiente. La frecuencia de los canales puede ser seleccionada automáticamente a través del software del computador (si el selector está en la posición 'A', de automático), pero la selección manual también es posible. La selección del canal es controlada vía cable físico con el computador que captura los datos. Para la primera opción se necesita de una conexión adicional RS-232 entre el computador y el sistema receptor, para que se seleccione el satélite correcto usando el programa ORBIT. El computador usado es parte integral del sistema de captura y no puede ser sustituido por uno de bajo costo. El estándar presente es el DELL 486 PC, con 36 Mbytes de memoria RAM, 500 Mbytes de memoria en disco duro, una diskettera de 3.5", tarjeta gráfica SVGA, y una unidad de cinta JUMBO de 120 Mbytes como una unidad anexa. El sistema también comprende una tarjeta de entradas/salidas de la BURL, la cual une al computador con la unidad receptora, ajustando los niveles de los datos. Se pueden unir varios PCs a un receptor permitiendo tener varias 'ventanas' o aplicaciones. Para que un sistema sea operacional, se recomiendan dos o más PCs para asegurar continuidad. Junto con el sistema se suministra una impresora Hewlett Packard Deskjet 550C, la que entrega un tamaño máximo A4 a color o en blanco y negro, copiando una imagen a 300 puntos por pulgada (dpi), con un máximo de 16 colores. Este sistema funciona actualmente en el laboratorio de ozono de la UMAG, edificio Centro Austral Antártico.

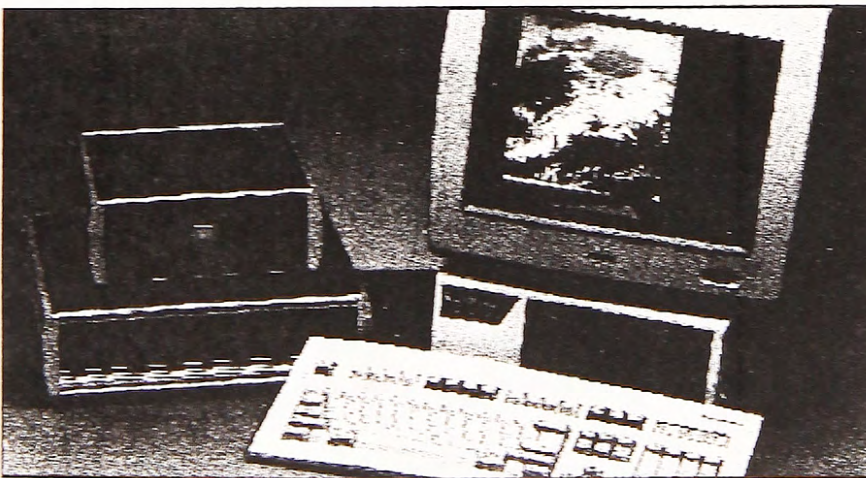


Figura 2.12.- Equipos usados para la captura de datos AVHRR.

## 2.5 SISTEMA CONTROLADOR DE LA ANTENA

El sistema de la antena se basa en una unidad controladora mediante un motor. Este consiste de tres partes:

- un transformador aislador, que produce 55 volts rms (80 volts máximos). Este es conectado mediante un cable de par trenzado a la unidad controladora del motor, montado en la base de la antena cónica.
- la unidad controladora del motor la cual tiene alimentación de potencia, un cable de control desde la salida RS232 del computador, y dos cables multipares a la unidad de control del motor.
- el motor en sí mismo, el cual está unido a la antena cónica.

La unidad de motor tiene dos conjuntos de controladores para el acimut y la elevación. Mecánicamente el acimut puede rotar 270°, y la elevación en alrededor de 220°. Sin embargo el sistema está construido de forma que la elevación se mueva desde 0° vía 90° a 180°, y a 0° nuevamente.

Para elevaciones de 0° a 90° la antena puede ser apuntada en acimut desde los -45° a +225°, donde el Norte = 0°, Sur = 180° y el Este está en los 90°. De forma de apuntar la antena hacia el Oeste, el acimut es puesto hacia el Este y la elevación movida en 90°. De esta forma se puede apuntar en todas las direcciones. Así, para seguir la trayectoria del satélite hacia el Este del usuario, la elevación debe estar de 0° a 90°. Para seguir la trayectoria hacia el Este del usuario, la elevación es puesta de 180° a 90°. Las trayectorias que pasan inmediatamente sobre el receptor son tratadas como si estuviesen hacia el Este.

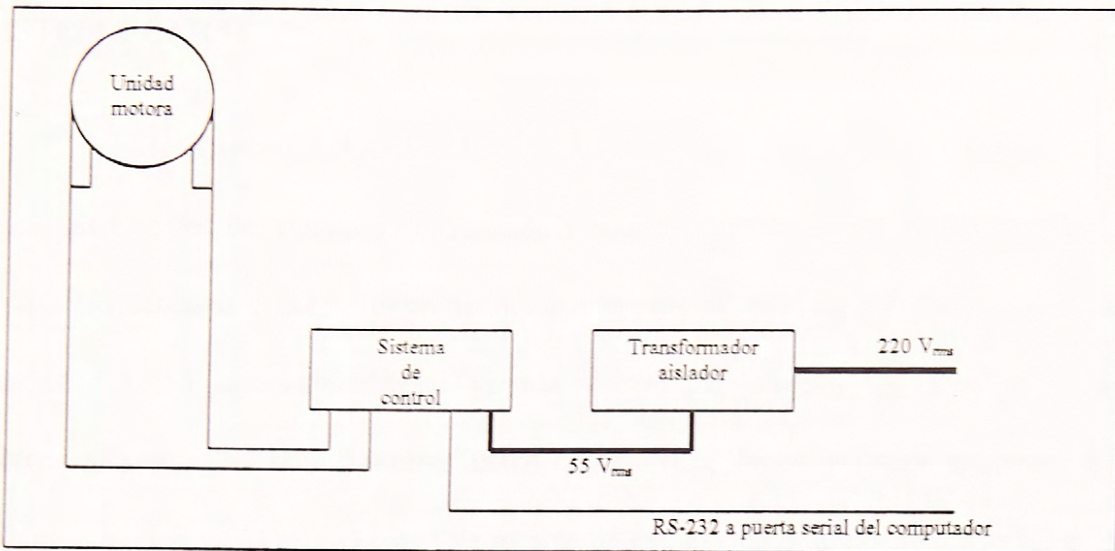


Figura 2.13.- Esquema del sistema de control del motor de la antena.

## 2.6 SISTEMA LARST

El sistema LARST (Local Applications of Remote Sensing Techniques, Aplicaciones Locales de Técnicas de Sensado Remoto), creado por la BURL, provee recepción local para los satélites NOAA, permitiendo que los datos sean interpretados en computadores personales. LARST automáticamente guarda datos que pueden ser mostrados con mapas estándares sobrepuestos con fronteras entre países, ríos, lagos y líneas costeras. El software permite al operador seleccionar el área de interés de cada satélite que pasa por el lugar, y capturar y trabajar con ventanas de datos. Estas pueden ser tan pequeñas como 1/4 de millón de km<sup>2</sup>, o tan grandes como 2 millones de km<sup>2</sup>. Para áreas mayores se necesita más que un computador personal para procesarlas. Los datos no trabajados son recibidos en la memoria RAM del computador para luego ser procesadas o guardadas en el disco duro.

La secuencia del sistema LARST para la captura y procesamiento de datos es como sigue :

- Se activa el programa ORBIT.EXE, el cual a su vez lee un archivo llamado SAT\_LIST.LST que contiene la lista de satélites NOAA que se encuentran activos. En base a esto se llama a los archivos TLE de datos, explicados en el Apéndice D; con estos datos cargados, se lee el archivo RGNMAP.OLL, el cual despliega un mapa centrado en la ubicación de la estación receptora, mostrando las órbitas, la antigüedad de los datos TLE, y una caja cuadrada que se puede variar en tamaño y mover en un cierto margen, la cual representa el área a ser capturada. Se pueden grabar varias capturas en el día, sólo teniendo cuidado de dejar como mínimo diez minutos entre una y otra, de forma de entregar el suficiente tiempo para completar el proceso de adquisición. Las especificaciones programadas en este software quedan grabadas en un archivo de extensión .NCD (NOAA Capture Details, Detalles de Captura de los

NOAA); una vez que es usado, se renombra con la extensión .OLD (antiguo), y si la captura falla se le asigna una extensión .XXX.

- Como segundo paso se activa el programa NOAA\_CAP.EXE, el cual usa los archivos con extensión .NCD para realizar las capturas, siendo grabado y mostrado sobre un mapa en la pantalla. Así, la antena es movida a su posición inicial, el canal del receptor es seleccionado (cuando éste se encuentra en el modo automático), y se mantiene en espera hasta recolectar los datos. Debido a la velocidad con que se reciben los datos (se reciben en formato HRPT explicado en el apéndice), éstos se almacenan en la memoria RAM, y luego de terminado el proceso, si se realiza con éxito, los canales son separados y almacenados en un archivo tipo BLOQUE (su descripción está en el Apéndice E), junto a los datos TIP (correspondiente a los datos del instrumento TOVS, MSU, SEM, etc.), y las especificaciones más importantes de los archivos .NCD y datos TLE. La trayectoria del satélite, cuando es detectado, es mostrada como una línea azul hasta que comienza el proceso de adquisición de datos. Para finalizar, la antena es estacionada en una posición determinada por el programa CAL\_HORN.EXE (explicado anteriormente).
- El archivo de formato de BLOQUE es nombrado de acuerdo a la fecha y hora de captura de los datos, dirección de la trayectoria del satélite y su número. Su extensión representa el tamaño de la imagen (para más detalles revisar el apéndice E). El tercer paso es activar tres programas que controlan los procesos de navegación y calibración. El primero de ellos es CAL\_IMG.EXE, que genera valores de calibración de los sensores por cada 32 líneas en la imagen, y se establece la relación entre la salida del detector y la intensidad de la radiación en la entrada (para mayor información, refiérase a la sección de calibración de los sensores en el Capítulo 3). El segundo de

ellos es NAV\_IMG.EXE, que calcula referencias que relacionan puntos específicos de latitud/longitud con los puntos de proyección de la imagen NOAA. Estos puntos están cada 32 líneas y píxeles de separación. El tercero de ellos es MAP\_IMG.EXE, que usa los datos anteriores para extraer un mapa sobre la imagen (más 128 píxeles extra en sus cuatro direcciones para ayudar a la corrección del mapa).

- Finalmente se activa el programa MAP\_MOVE.EXE, el cual despliega la imagen capturada con el mapa correspondiente sobrepuesto, para permitir al usuario corregir su posición, ayudándose de líneas costeras, ríos, lagos y fronteras entre países para la correcta alineación.

Junto a estos programas, se entregan otros que permiten realizar análisis y procesamiento de las imágenes, pero que son limitados en cuanto a su uso y hechos para regiones determinadas del planeta, normalmente para el hemisferio norte y no para latitudes australes.

### CAPITULO 3

### CALIBRACIÓN DE DATOS AVHRR

## **CAPÍTULO 3: CALIBRACIÓN DE DATOS AVHRR**

### **3.1 CALIBRACIÓN DE LOS DATOS AVHRR DE LOS CANALES 3, 4 Y 5**

#### **3.1.1 Satélites NOAA 6-12**

##### **3.1.1.1 Cálculos realizados por el sistema LARST**

Como se mencionó anteriormente, no se puede esperar que las características de los radiómetros sean las mismas en órbita, que las existentes antes del lanzamiento del satélite. Una razón es el envejecimiento de los componentes de los instrumentos, y el deterioro de sus características en los años entre la espera para que el satélite sea lanzado y su lanzamiento propiamente tal, proceso que continúa por dos o más años hasta que el instrumento llega a su punto óptimo de operación en órbita. Por este motivo, los radiómetros fueron diseñados para poder ‘observar’ el espacio frío y uno o más puntos de un blanco interno cuyo comportamiento es aproximadamente el de un cuerpo negro, como parte normal de su secuencia de sensado en órbita. Las temperaturas de estos cuerpos negros son sensados por termistores, los cuales proveen los datos para los canales infrarrojo termal y medio, determinando la razón señal/ruido y las pendientes y cortes radiométricos.

A pesar de que se determinan sólo dos puntos en la curva de calibración, éstos son suficientes para determinar una buena aproximación de la calibración de los datos. Debido a sus características físicas se puede asumir la linealidad para el canal 3, ya que el detector es InSb, pero no es del todo adecuado para los canales 4 y 5 ya que su detector es de HgCdTe. De este modo, para obtener temperaturas brillantes exactas se deben hacer correcciones no lineales, dependiendo de las aplicaciones y necesidades del usuario.

La información requerida para producir coeficientes de calibración de los canales infrarrojo termal y medio del sensor AVHRR, están ubicados en el encabezado del trama HRPT<sup>1</sup>, la palabra 103..Cualquiera de estas palabras, cuando se extraen de tramas menores HRPT consecutivos, producen un valor de referencia (REF), y una muestra de cada uno de los cuatro termistores. El patrón es el siguiente:

n	REF
n+1	TERMISTOR 1
n+2	TERMISTOR 2
n+3	TERMISTOR 3
n+4	TERMISTOR 4
n+5	REF

El valor de referencia es fácilmente identificado, ya que es el único valor menor que 10. Se deben promediar 10 valores para cada termistor, para obtener finalmente unidades de temperatura. Las 30 palabras de datos del blanco interno (palabras 23-52 del encabezado), proveen de 10 muestras para los canales 3, 4 y 5. Las 50 palabras de los datos sensados del espacio (palabras 53-102 del encabezado), proveen de 10 muestras para cada uno de los cinco canales AVHRR. Para calcular la radiancia interna del cuerpo negro y su temperatura, es necesario calcular la temperatura del blanco interno, el cual se puede hacer usando los coeficientes de conversión de los termistores, que a continuación se entregan.

$$T = \sum_{j=0}^4 a_j x^j \quad (3.1)$$

<sup>1</sup> Ver "APÉNDICE C, ESTRUCTURA DE LA TRAMA DE DATOS HRPT".

donde X: salida digital de los termistores

T: temperatura en grados Kelvin

$a_0 - a_4$ : coeficientes que se especifican para cada termistor

Los coeficientes  $a_0 - a_4$  se obtienen de calibraciones en fábrica para cada sensor, usando estándares térmicos. Lo siguiente es calcular la pendiente y corte (intersección con el eje de las ordenadas  $DN=0$ ) a partir del número digital (Digital Number, DN) de cada canal, de acuerdo a:

$$R = M(DN) + I \quad (3.2)$$

donde M: pendiente del canal.

I: corte del canal.

M es calculado para cada canal con la siguiente ecuación:

$$M = (R_t - R_{sp}) / (DN_t - DN_{sp}) \quad (3.3)$$

donde  $R_t$ : radiancia media (de 50 muestras consecutivas), cuando el instrumento 'observa' su blanco de calibración interna de radiancia.

$R_{sp}$ : radiancia media del espacio profundo (de 50 muestras consecutivas).

$DN_t$ : número digital medio del blanco interno (de 50 muestras consecutivas).

$DN_{sp}$ : número digital medio del espacio profundo (de 50 muestras consecutivas).

El corte puede entonces ser calculado mediante:

$$I = R_{sp} - M(DN_{sp}) \quad (3.4)$$

Los valores típicos de pendiente para los canales 3, 4 y 5 son del orden de -0.0015, -0.16 y -0.15 respectivamente, y del corte 1.5, 160.0 y 150.0, respectivamente. Los valores de pendiente y corte no varían en demasía a lo largo de algunos minutos de datos HRPT AVHRR, por lo que los usuarios comúnmente utilizan sólo un valor para cada uno, por imagen. Todos estos cálculos los realiza el programa CAL\_IMG.EXE, como parte del procesado de las imágenes, usando el sistema LARST desarrollado por la BURL, generando valores de calibración por cada 32 líneas<sup>1</sup>, e insertándolo como parte de la estructura de bloque<sup>2</sup>.

### 3.1.1.2 Cálculos realizados por el programa MAGMASAT\_NOAA

El programa MAGMASAT\_NOAA (Marcelo Gallardo Marusich Aplicaciones Satelitales NOAA), desarrollado como objetivo de esta tesis, en el lenguaje de programación IDL y explicado en detalle en el capítulo 5, realiza parte de la calibración de los datos AVHRR.

Mediante este programa se toman los datos de calibración, desde la estructura de bloque<sup>2</sup>, correspondientes a los valores de pendiente y corte para cada 32 líneas. Se realiza una interpolación lineal de ellos, de forma de obtener valores para cada línea de datos de los canales AVHRR 3, 4 y 5. Una vez obtenidos los valores de pendiente y corte, el primero debe dividirse por  $2^{30}$ , y el segundo valor debe dividirse también por  $2^{22}$ . Para calibrar los canales 3, 4 y 5, la

<sup>1</sup> Ver el punto "2.6 SISTEMA LARST", del capítulo 2.

<sup>2</sup> Ver "APÉNDICE E, ESTRUCTURA INTERNA DE UN BLOQUE".

radiancia medida por el sensor es obtenida, en forma similar a lo anteriormente explicado, como una función lineal de los valores de los datos de entrada, como sigue :

$$E_i = S_i C + I_i \quad (3.5)$$

donde  $E_i$ : valor de la radiancia en  $\text{mW m}^{-2} \text{srad}^{-1} \text{cm}^{-1}$  del canal  $i$

$C$ : valor del dato de entrada (que va de 0 a 1023)

$S_i$ : valor de pendiente del canal  $i$

$I_i$ : valor del corte del canal  $i$

La radiancia  $E$  sensada en cada canal termal AVHRR, desde un blanco cuyo comportamiento se aproxima al de un cuerpo negro, a una temperatura  $T(E)$ , es la media compensada de la función de Planck sobre la función de respuesta espectral del canal. La función de respuesta espectral es medida por el fabricante del instrumento en laboratorios, obteniéndose tablas que relacionan la radiancia con la temperatura para cada canal termal, de cada satélite. Las tablas especifican el número central de la onda del canal<sup>1</sup> cada 10 °K, entre los 180 y 340 °K; estas son llamadas “tablas de energía”.

Para realizar la conversión desde radiancia a temperatura brillante, se hace uso de la ecuación inversa de radiación de Planck, en torno al número central de la onda del canal respectivo (Kidwell, 1991):

$$T(E) = \frac{c_2 \nu}{\ln \left( 1 + \frac{c_1 \nu^3}{E} \right)} \quad (3.6)$$

donde  $T$ : temperatura en grados Kelvin para el valor  $E$  de radiancia

$\nu$ : número central de la onda del canal ( $\text{cm}^{-1}$ )

$c_1$ :  $1.1910659 \times 10^{-5}$  ( $\text{mW}/\text{m}^2 \text{srad cm}^{-4}$ )

$c_2$ :  $1.438833$  ( $\text{cm } ^\circ\text{K}$ )

Nótese que la temperatura obtenida por este procedimiento no está corregida por atenuación atmosférica y otros efectos atmosféricos, pero representa la temperatura brillante en la capa superior de la atmósfera. Los números centrales de las ondas para los canales 3, 4 y 5, como función de la temperatura, pueden ser encontradas para cada satélite en el "APÉNDICE F, NÚMERO CENTRAL DE ONDA PARA LOS SATÉLITES NOAA-9/10/11/12/14".

---

<sup>1</sup>Ver "APÉNDICE B, GLOSARIO".

### 3.1.2 Correcciones para el satélite NOAA 14 realizadas por MAGMASAT\_NOAA

Las pruebas en los sensores AVHRR abordo del satélite NOAA-14, han mostrado que la respuesta mostrada por el canal 3 al 'observar el espacio' (la cual debiera ser cero), no cae en la curva de calibración medida (lineal) derivada de las mediciones de laboratorio. Así, la NOAA implementó un nuevo procedimiento de corrección de la radiancia, que corrige las no linealidades de los canales 4 y 5, y el efecto observado del punto en el espacio de la curva de calibración para el canal 3. Como en los casos anteriores, se obtienen la pendiente y corte para realizar una calibración lineal. Sin embargo, estos coeficientes se obtienen usando una radiancia no cero del espacio,  $R_{sp}$ , la cual es constante para cada canal, y que hace que las correcciones de radiancia sean independientes del blanco de calibración interna de la temperatura. La pendiente y corte se derivan de las siguientes ecuaciones:

$$\left. \begin{aligned} M &= (R_t - R_{sp}) / (DN_t - Dn_{sp}) \\ I &= R_{sp} - M \times Dn_{sp} \end{aligned} \right\} \quad (3.6)$$

donde  $Dn_{sp}$ : número digital del espacio

M: pendiente del canal

I: corte del canal

$R_t$ : radiancia obtenida del blanco

$R_{sp}$ : radiancia del espacio (dada en la tabla 3.2)

$DN_t$ : número digital del blanco

Estos coeficientes satisfacen una radiancia lineal:

$$R_{lin} = M \times DN + I \quad (3.7)$$

La siguiente ecuación provee una radiancia corregida para los canales 3, 4 y 5, la cual es función sólo de la radiancia lineal de la ecuación (3.7):

$$\text{RAD} = A R_{\text{lin}} + B R_{\text{lin}} R_{\text{lin}} + C \quad (3.8)$$

Finalmente usando la función inversa de la radiación de Planck, con el número central de onda apropiado, se convierte la radiancia en temperatura. No se debiera realizar ningún otro tipo de correcciones no lineales para estos canales del NOAA-14. Los coeficientes para aplicar estas ecuaciones para los canales 3, 4 y 5, son dados en la tabla (3.2):

Tabla 3.1.- Coeficientes para la obtención de la radiancia corregida para los canales 3, 4 y 5 del NOAA-14.

	CANAL 3	CANAL 4	CANAL 5
Coefficiente A	1.00359	0.92378	0.96194
Coefficiente B	0.0	0.0003822	0.0001742
Coefficiente C	-0.0031	3.72	2.00
Radiancia espacial $R_p$ ( $\text{mW m}^{-2} \text{srad}^{-1} \text{cm}^{-2}$ )	0.0069	-4.05	-2.29

## 3.2 CALIBRACIÓN DE LOS DATOS AVHRR DE LOS CANALES 1 Y 2

### 3.2.1 Cálculos realizados por el programa MAGMASAT\_NOAA

Los dos canales visibles del instrumento AVHRR son calibrados antes de que el satélite sea lanzado al espacio, usando el siguiente proceso: la fuente de calibración es una esfera de gran apertura equipada con 12 lámparas halógenas de cuarzo. Estas lámparas fueron cuidadosamente seleccionadas para que su salida espectral y corriente de operación sean lo más parecidas posibles. La esfera es entonces calibrada con las 12 lámparas en contra de un estándar de irradiancia espectral. Se determina también la razón de la salida de 'n' lámparas en contra de 12 lámparas. Esto nos entrega la salida espectral de la esfera cuando existen 'n' lámparas. Al variar el número de bulbos que se encienden, se puede obtener una curva de calibración desde un nivel de oscuridad, hasta una salida máxima de 12 lámparas.

Se pueden realizar los siguientes cálculos de forma de obtener la calibración en términos de porcentaje de albedo versus salida del radiómetro. Primero, la salida espectral de la esfera es integrada con la función de respuesta espectral del canal AVHRR, y así obtener la radiancia efectiva para la banda que opera con 12 lámparas. Esto es multiplicado por el factor  $K_n$  apropiado para convertirlo a 'n' lámparas. Así :

$$N_L = K_n \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} c(\lambda) \phi(\lambda) d\lambda \quad (3.9)$$

donde  $N_L$ : radiancia efectiva vista por el canal en la banda espectral apropiada

$K_n$ : factor para convertir la radiancia de n lámparas

$c(\lambda)$ : radiancia espectral calibrada de la esfera, con 12 lámparas encendidas

$\lambda$ : longitud de onda, en la región espectral que va de  $\lambda_1$  a  $\lambda_2$

$\phi(\lambda)$ : respuesta espectral medida del canal calibrado

Similarmente, si uno toma la irradiancia solar en la parte más alta de la atmósfera y realiza un cálculo similar, los resultados son mostrados en la siguiente ecuación :

$$N_s = \frac{1}{\pi} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S(\lambda) \phi(\lambda) d\lambda \quad (3.10)$$

donde:  $N_s$ : radiancia efectiva del radiómetro que capta la luz solar reflejada

$S(\lambda)$ : irradiancia espectral sensada en la parte más alta de la atmósfera

$\phi(\lambda)$ : función respuesta espectral del canal

$N_s$  representa lo que uno 'vería' desde el espacio con una reflectancia del 100%, en una superficie difusa, cuando el ángulo solar cenital<sup>1</sup> es cero. Luego el porcentaje de albedo es calculado usando:

$$A = \frac{N_L}{N_s} \times 100 \quad (3.11)$$

Si se asume un comportamiento lineal de los sensores visible e infrarrojo cercano, se puede obtener el albedo a partir de la pendiente y corte calculadas antes del lanzamiento de los satélites:

$$A_i = S_i C + I_i \quad (3.12)$$

donde  $A_i$ : porcentaje de albedo medido por el canal  $i$

---

<sup>1</sup> Ver "APÉNDICE B, GLOSARIO".

C: valor del dato de entrada

$S_i$ : valor ajustado de pendiente del canal  $i$

$I_i$ : valor ajustado de corte del canal  $i$

Los valores de pendiente y corte de todos los canales se resumen en la tabla 3.2.

Tabla 3.2.- Pendientes (M) y cortes (I) de los canales 1 y 2, antes de sus lanzamientos.

SAMPLE	$M_1$	$I_1$	$M_2$	$I_2$
NOAA-9	0.1063	-3.8	0.1075	-3.9
NOAA-10	0.1059	-3.7	0.1058	-3.6
NOAA-11	0.0950	-3.8	0.1061	-3.6
NOAA-12	0.1042	-4.4	0.1014	-4.0
NOAA-14	0.1081	-3.9	0.1090	-3.7

Para convertir de porcentaje de albedo (A), a radiancia espectral R (en  $W m^{-2} \mu m^{-1} srad^{-1}$ ), se debe usar la siguiente ecuación :

$$R = A \left[ \frac{F}{100 \pi W} \right] \quad (3.13)$$

donde F: irradiancia espectral solar integrada, representada por la función de respuesta espectral del canal, en  $W m^{-2}$ .

W: ancho equivalente de la función de respuesta espectral en  $\mu m$ .

Los valores de W y F se encuentran en la tabla 3.3.

Tabla 3.3.- Valores de W y F para los canales 1 y 2 del instrumento AVHRR.

SATELITE	$W_1$ ( $\mu\text{m}$ )	$F_1$ ( $\text{W m}^{-2}$ )	$W_2$ ( $\mu\text{m}$ )	$F_2$ ( $\text{W m}^{-2}$ )
TIROS-N	0.325	443.3	0.303	313.5
NOAA-6	0.109	179.0	0.223	233.7
NOAA-7	0.108	177.5	0.249	261.9
NOAA-8	0.113	183.4	0.230	242.8
NOAA-9	0.117	191.3	0.239	251.8
NOAA-10	0.108	178.8	0.222	231.5
NOAA-11	0.113	184.1	0.229	241.1
NOAA-12	0.124	200.1	0.219	229.9
NOAA-13	0.121	194.09	0.243	249.42
NOAA-14	0.136	212.42	0.245	252.29

Debido a que los canales visibles no reciben ningún tipo de calibración a bordo de los satélites, y presentan degradación de los instrumentos, es necesario realizarla en tierra. Basándose en los trabajos de Rao y Chen (1994)<sup>1</sup>, la degradación de los instrumentos es exponencial en el tiempo. Después de largos estudios, tomando en cuenta mediciones en terreno con instrumentos de alta precisión, propusieron las fórmulas mostradas en la tabla 3.4. En esta tabla, DN es el número digital en el respectivo canal (0 - 1023), y 'd' es el número de días desde el lanzamiento (el día del lanzamiento es el día cero).

Tabla 3.4.- Fórmulas para el cálculo de radiancias calibradas.

SATELITE Y CANAL		RADIANCIA ( $\text{W m}^{-2} \mu\text{m}^{-1} \text{srad}^{-1}$ )
NOAA-9	Canal 1	$M_1 \exp(1.66 \times 10^{-4} d) \times (\text{DN} - 37)$
	Canal 2	$M_2 \exp(0.98 \times 10^{-4} d) \times (\text{DN} - 39.6)$
NOAA-10	Canal 1	$M_1 \exp(0.61 \times 10^{-4} d) \times (\text{DN} - 36.3)$
	Canal 2	$M_2 \exp(1.03 \times 10^{-4} d) \times (\text{DN} - 37)$
NOAA-11	Canal 1	$M_1 \exp(0.33 \times 10^{-4} d) \times (\text{DN} - 40)$
	Canal 2	$M_2 \exp(0.55 \times 10^{-4} d) \times (\text{DN} - 40)$
NOAA-12	Canal 1	$M_1 \exp(0.94 \times 10^{-4} d) \times (\text{DN} - 35)$
	Canal 2	$M_2 \exp(1.01 \times 10^{-4} d) \times (\text{DN} - 35)$
NOAA-14	Canal 1	$M_1 \exp(1.01 \times 10^{-4} d) \times (\text{DN} - 36)$
	Canal 2	$M_2 \exp(1.20 \times 10^{-4} d) \times (\text{DN} - 37)$

<sup>1</sup> Ver "BIBLIOGRAFÍA".

En la tabla 3.5 se dan valores de pendientes para los canales 1 y 2 de la serie de satélites NOAA. Los datos de los satélites pares fueron tomados de Teillet and Holben (1994), y aquellos datos para los NOAA-7/9/11 fueron recalculados de las ecuaciones Rao and Chen (1994). Se incluyen además los valores pre-lanzamiento y post-lanzamiento del satélite NOAA-14.

Tabla 3.5.- Pendientes para los canales 1 y 2.

SATELITES Y FECHAS	PENDIENTE DEL CANAL 1 (ML)	PENDIENTE DEL CANAL 2 (ML)
<u>NOAA-9</u>		
12/12/84	0.5406	0.3808
01/01/85	0.5423	0.3815
01/01/86	0.5761	0.3954
01/01/87	0.6121	0.4098
01/01/88	0.6504	0.4247
01/01/89	0.6910	0.4401
01/01/90	0.7342	0.4562
01/01/91	0.7800	0.4728
01/01/92	0.8287	0.4900
01/01/93	0.8805	0.5079
01/01/94	0.9355	0.5264
01/01/95	0.9939	0.5455
<u>NOAA-10</u>		
17/09/86	0.5814	0.4405
10/02/88	0.7194	0.5495
<u>NOAA-11</u>		
24/09/88	0.5496	0.3680
01/01/89	0.5508	0.3693
01/01/90	0.5574	0.3768
01/01/91	0.5642	0.3844
01/01/92	0.5710	0.3922
01/01/93	0.5780	0.4002
01/01/94	0.5850	0.4083
01/01/95	0.5920	0.4166
<u>NOAA-12</u>		
14/05/91	0.5348	0.3389
<u>NOAA-14</u>		
30/12/94	0.5602	0.3573
01/06/95	0.5849	0.4695

Los valores faltantes se pueden obtener por medio de interpolación. Note que la temperatura obtenida por este procedimiento no está corregida por atenuación atmosférica y otros efectos.

## **CAPITULO 4**

### **DETECCIÓN Y ELIMINACIÓN DE LAS NUBES**

#### **DESDE LAS IMÁGENES HRPT/AVHRR**

## CAPÍTULO 4: DETECCIÓN Y ELIMINACIÓN DE LAS NUBES DESDE LAS IMÁGENES HRPT/AVHRR

### 4.1 GENERALIDADES

Para la obtención de buenos productos basados en imágenes NOAA-AVHRR, es muy importante poder detectar y eliminar toda la presencia de nubes que pudiese estar distorsionando la adquisición de valores reales de datos. Es por ello que se procedió a incluir en el programa MAGMASAT\_NOAA<sup>1</sup> (desarrollado como objetivo de esta tesis, y programado en el lenguaje IDL) todo un proceso de detección y eliminación de nubes altas, medias, bajas, delgadas, etc., a continuación del proceso de calibración de los datos de los cinco canales AVHRR, y antes de la obtención de cualquier tipo de producto (NDVI, SST, etc.).

La idea básica de la detección de nubes se basa en el contraste aparente en las radiancias medidas de pixeles nubosos y aquellos libres de nubes. Las nubes son brillantes en los canales 1 y 2, tienen reflectancias altas, mientras que en los canales 4 y 5 ellas emiten radiancias de acuerdo a su temperatura (normalmente las temperaturas de las superficies de las nubes observadas son muy frías comparadas con la de superficies de mar o tierra), y a sus valores de emisividad (que para la mayoría de las nubes es cercano a la unidad). Con la excepción de nubes bajas y nubes delgadas, las nubes contrastan fuertemente con las superficies relativamente más oscuras y calurosas del mar y tierra.

La superficie de la Tierra puede dividirse en cuatro categorías: océano, tierra vegetada, tierra árida, y hielo/nieve.

- Las superficies de los océanos son oscuras en los canales 1 y 2, y “calientes” en los canales 4 y 5, con emisividades de 0.99.

---

<sup>1</sup> Ver “CAPÍTULO 5: PROGRAMA MAGMASAT\_NOAA”.

- La tierra vegetada es oscura en el canal 1, brillante en el canal 2 y medianamente “calurosa”, con una emisividad de alrededor de 0.96.
- La tierra árida es brillante en los canales 1 y 2 y también “calurosa”, con emisividades usualmente menores a 0.96 debido a la influencia de minerales y cuarzo en la arena.
- La nieve y el hielo son normalmente muy brillantes en los canales 1 y 2, y relativamente “calurosas” en los canales 4 y 5 (en comparación a las temperaturas de las nubes), con una emisividad de alrededor de 0.99.

De esta generalización sigue que durante el día las nubes gruesas y frías pueden ser fácilmente distinguidas de todas las otras clases de superficies, excepto de nieve y hielo. Sin embargo, las nubes gruesas y de mayor temperatura son difíciles de detectar sobre tierra árida y hielo/nieve, y las nubes transparentes y delgadas son difíciles de distinguir en cualquier situación. Las nubes delgadas pueden ser detectadas debido a su diferencia de emitancia en los canales 4 y 5. Esto resulta en una mayor diferencia de temperatura a las debido a la absorción del vapor de agua en el canal 2.

La discriminación de nubes sobre superficies cubiertas con nieve o hielo no es posible usando solamente los canales 1, 2, 4 y 5, pudiendo ser el canal 3 útil para obtener la fase del medio. En el canal 3 se mide la radiancia solar reflejada y termal emitida durante el día. Para obtener una única información, se requiere la separación de las dos clases de radiancias. En principio esto es fácil, debido a que la radiancia termal emitida puede calcularse al restar la temperatura brillante del canal 4 con la del canal 3; el resultado será teóricamente la componente reflejada en el canal 3 (asumiendo que las variaciones bidireccionales de la reflectancia son despreciables).

El problema con esta separación es que se desconoce la emisividad en el canal 3. Esto podría remediarse al realizar mediciones nocturnas de la misma superficie para determinar la emisividad, debido a que es la misma durante el día o la noche. Sin embargo, este no es el caso debido a cambios en la humedad, entre otros. Una forma simple de aproximación es reemplazar la emitancia por la reflectancia; si la transmitancia es puesta a cero, la emitancia será igual a  $(1 - \text{reflectancia})^1$ . La relación descrita puede entonces resolverse para la reflectancia, dejando la temperatura como única variable desconocida. Esto es lo mismo que lo obtenido para el canal 4, suponiendo que la emisividad de este canal es suficientemente bien conocida, lo cual es generalmente el caso. Suponer que la transmitancia es cero es aceptable para nubes gruesas y toda clase de superficies libres de nubosidad, pero obviamente no es el caso de nubes delgadas (K. T. Kriebel, 1996).

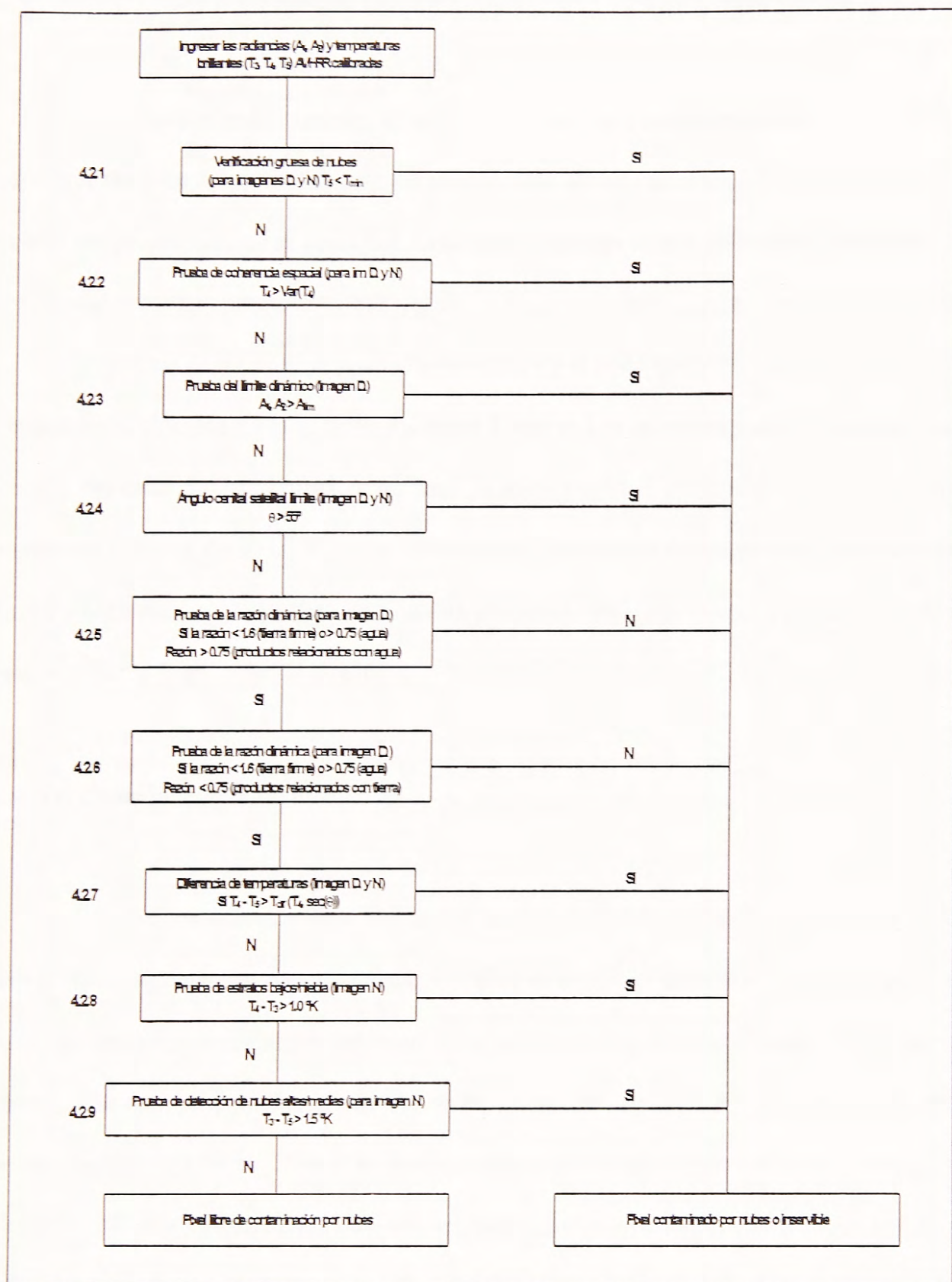


Figura 4.1.- Algoritmo para la detección diurna o nocturna de pixeles libres de contaminación por nubes. Éste cuenta de nueve pasos que fueron implantados en el programa MAGMASAT\_NOAA<sup>1</sup>, objetivo de esta tesis. Cada paso es independiente del siguiente y pueden ser seleccionados a voluntad por el usuario, dependiendo de su criterio y experiencia en el tema. A continuación se explican cada una de las etapas, dando a conocer los principios en que se basan. (D: algoritmo para imagen diurna; N: algoritmo para imagen nocturna).

<sup>1</sup> Ver "CAPÍTULO 5: PROGRAMA MAGMASAT\_NOAA".

## 4.2 ALGORITMO PARA LA DETECCIÓN DE PÍXELES CON PRESENCIA DE NUBES

Basado en lo expuesto anteriormente y en otros puntos más prácticos, se definieron nueve pruebas para determinar si un píxel está libre de nubosidad o no, o más bien si es un píxel útil para los propósitos que se necesitan. La filosofía utilizada es que un píxel es catalogado como libre de contaminación por nubes o útil sí y solo sí ninguna de estas nueve pruebas detecta nubes.

Dos de las pruebas usan la temperatura y el brillo (reflectancia). Las otras tres usan la información obtenida de la relación del canal 2 con el 1, y la temperatura brillante del canal 4 menos la del canal 5. Otra prueba es un “test de homogeneidad espacial” realizado con datos de temperatura brillante del canal 4. Las pruebas tienen que hacerse dependiendo si las imágenes son diurnas o nocturnas, si el píxel en cuestión está ubicado sobre tierra o mar, y además se coloca un límite superior al ángulo cenital satelital.

### 4.2.1 Verificación gruesa de nubes.

Es una simple prueba que usa la temperatura brillante calculada del canal 5, y que busca precisar la contaminación por nubes. Se utiliza en imágenes diurnas o nocturnas, sobre tierra o mar. La temperatura brillante del canal 5 es usada de preferencia debido a que las nubes presentan una gran profundidad óptica a estas longitudes de onda. Si la temperatura brillante está bajo una temperatura límite, el píxel es marcado como contaminado por nubes; la clave está en la definición de una temperatura límite apropiada. La temperatura superficial del mar es relativamente constante, debido a que varía lentamente en el espacio y tiempo. En cambio la temperatura de la tierra presenta grandes variaciones de día a día, y de área en área, debido a sus diferentes usos y condiciones meteorológicas, lo que hace difícil la determinación de una sola temperatura límite.

Se muestra la temperatura brillante del canal 5 y el usuario identifica mediante un pinchazo del mouse las zonas más frías sobre el mar y la tierra, en los lugares donde no exista contaminación por nubes. De esta forma se determina la temperatura brillante sobre estas áreas, siendo la temperatura límite adoptada por el sistema  $2^\circ \text{K}$  menos que el valor anterior.

Estos valores pueden ser guardados en bases de datos, según la estación del año, hora del día y área percibida, de forma de poder acceder fácilmente a esta información.

#### 4.2.2 Coherencia espacial de la temperatura.

La segunda prueba consiste en determinar la coherencia espacial utilizando temperatura brillante en el canal 4. Se realiza en imágenes diurnas, sobre agua (mar). Normalmente se toman grupos de píxeles de  $3 \times 3$ , y se calcula el promedio y varianza de los que no han sido catalogados como contaminados por nubes en el test anterior. Sobre la superficie de agua libre de nubes la varianza será desde luego muy baja, por lo que si un píxel excede este valor, deberá ser catalogado como contaminado por nubes. Sin embargo la prueba no es aplicable para píxeles diurnos sobre tierra, debido a la poca homogeneidad que generalmente se presenta en tierra.

#### 4.2.3 Límite dinámico visible.

La tercera prueba utiliza la reflectancia calculada para los canales 1 y 2. Se aplica en imágenes diurnas escogiéndose áreas de  $32 \times 32$  píxeles; primero se realiza un histograma de radiancias, determinando su valor peak ( $I_{pk}$ ), y si contiene más del 0.5% de la población, el proceso continúa. Se determinan los valores  $I_1$  e  $I_2$ , los límites inferior y superior respectivamente. Si la radiancia inferior del histograma ( $I_1$ ) está dentro de unos límites (0.025 para el agua, 0.035 para la tierra firme), y el valor máximo del histograma es menor que un valor típico para una área

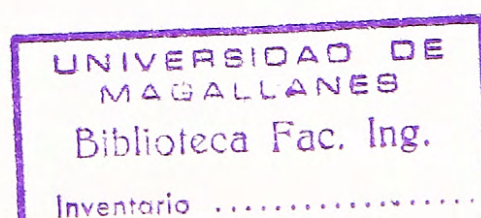
nubosa ( $I_{\text{máx}}$ ) (0.1 para el agua y 0.15 para la tierra firme), entonces se asume que el valor máximo está libre de contaminación por nubes, y el límite visible es fijado a un valor  $n$  por sobre  $I_{\text{pk}}$  (0.012 para el agua, 0.017 para la tierra firme).

Habiendo obtenido de esta manera el valor límite apropiado, cada pixel dentro del área de 32 x 32 es evaluado. El pixel se considera contaminado por nubes, si la reflectancia excede el valor límite determinado. Sobre el mar, debieran ser usadas las reflectancias del canal 2 ya que ellas son menos sensibles a los efectos de los efectos moleculares y de los aerosoles, y son más minimizados por el agua. Sobre la tierra, sin embargo, debieran usarse las reflectancias del canal 1 ya que son menores (en general) que las del canal 2, las cuales incrementarían el contraste entre la tierra y las nubes. Sobre las áreas costeras, la identificación de un máximo libre de contaminación por nubes es más difícil, por lo que se debiera usar una reflectancia fija (15%).

Obviamente, esta prueba no se puede usar en imágenes nocturnas, ya que las reflectancias en estos casos serán cero.

#### 4.2.4 Ángulo cenital satelital límite.

La cuarta prueba hace uso del ángulo cenital satelital, utilizándose tanto en imágenes diurnas como nocturnas. El programa MAGMASAT\_NOAA, al cargar la estructura de datos NOAA y antes de proceder a calibrar los datos AVHRR, detecta en forma automática si se han determinado los ángulos cenital satelital y solar de la imagen. Si no se han hecho los cálculos, llama al programa ejecutable externo SAT\_SUN.EXE que lo realiza. De este modo esta etapa consiste en eliminar todo pixel cuyo ángulo cenital satelital sea mayor a los 55 grados, debido a que ellos presentan demasiada distorsión geométrica, no sirviendo a pesar de que se les realiza una corrección de este tipo por parte del sistema LARST en una primera etapa del procesamiento de los datos.



#### 4.2.5 Razón dinámica Ch2/Ch1.

La quinta prueba hace uso de la razón de las reflectancias de los canales 2 y 1, sólo para imágenes diurnas. Esta razón debiera ser cercana a 1.0 para las nubes, ya que la reflectancia de ellas decrece ligeramente a longitudes del infrarrojo cercano, y los efectos anisotrópicos son similares en ambos canales, cancelándose mutuamente. Sin embargo sobre agua libre de nubosidad, para longitudes de onda más cortas, la dispersión molecular y la presencia de aerosoles causa que las reflectancias visibles sean a menudo el doble que aquellas en el infrarrojo cercano, dando valores para la razón de 0.5. Para áreas de vegetación verde, la reflectancia aumenta marcadamente a longitudes de onda del infrarrojo cercano, en comparación a ondas más cortas. Incluso sobre el desierto o durante el invierno, la reflectancia es mayor a longitudes de onda mayores (excepto sobre nieve o hielo), asegurando que el valor de la razón es siempre mayor que 1.0 para superficies en tierra.

De este modo, el límite podría especificar que un pixel está libre de contaminación de nubes sí y sólo sí la razón es menor a 1.6 (sobre tierra), o mayor a 0.75 (para el mar). Además se determina en esta región, aunque no en un 100%, que si la razón es mayor a 0.75 se está en presencia de aguas, sirviendo este método para eliminar pixeles correspondientes a datos sobre tierra firme. Esto sirve cuando se necesita generar productos relacionados con agua (ej: temperatura superficial del mar, entre otros).

#### 4.2.6 Razón dinámica Ch2/Ch1.

La sexta prueba hace uso de la razón de las reflectancias de los canales 2 y 1, sólo para imágenes diurnas. El principio es el mismo que el usado en la etapa 4.2.5, solo que si la razón es menor a 0.75 se está en presencia de tierras, sirviendo este método para eliminar pixeles correspondientes a datos sobre agua. Esto sirve cuando se necesita generar productos relacionados con tierra (ej: índices vegetacionales, entre otros).

#### 4.2.7 Diferencia de temperatura en los canales 4 y 5.

La séptima prueba hace uso de la diferencia de temperaturas entre los canales calibrados 4 y 5, para imágenes diurnas y nocturnas. Esta prueba detecta la mayor cantidad de tipos de nubes, incluyendo los cirrus semi-transparentes, debido a las diferentes emisividades de las nubes en estas dos longitudes de onda. La única excepción es para la detección de nubes bajas uniformes. Para la mayoría de los pixeles libre de contaminación por nubes, el valor máximo de la diferencia de temperaturas se espera que sea de un grado Kelvin, debido a la dependencia de la función de Planck. Sin embargo, se ha demostrado que se obtienen diferencias de temperatura brillante de hasta seis grados Kelvin en áreas nubladas, debido a que las propiedades ópticas de las nubes delgadas son muy diferentes para estas dos longitudes de onda. Para cielos limpios la diferencia de radiancias es a menudo menor a un grado Kelvin, debido a que el valor varía con respecto al monto de la columna total de agua del área detectada, y al ángulo cenital del satélite.

Existe una dependencia entre la diferencias de temperaturas y el coseno del ángulo cenital satelital, y la temperatura brillante del canal 4. Saunders and Kriebel (1988) tabularon los valores de las diferencias de temperaturas ( $T_4 - T_5$ ), versus la temperatura brillante del canal 4 ( $T_4$ ), y la secante del ángulo cenital satelital ( $\sec(\theta)$ ). Se tabularon los valores máximos obtenidos para cielos despejados de  $T_4 - T_5$ , para  $T_4$  entre 260 y 310° K, para un cierto margen de valores de

$\sec(\theta)$ . Todos los pixeles con valores sobre  $T_4 - T_5$  se identifican como contaminados por nubes, y no pasan la prueba. Al utilizar la tabla para datos intermedios no presentes, el programa interpola los valores necesarios.

Tabla 4.1.- Límites de temperaturas para  $T_4 - T_5$  (en grados Kelvin), para la detección de nubes.

VALORES DE $\sec(\theta)$					
$T_i$ (K)	1.0	1.25	1.50	1.75	2.0
260	0.55	0.60	0.65	0.90	1.10
270	0.58	0.63	0.81	1.03	1.13
280	1.30	1.61	1.88	2.14	2.30
290	3.06	3.72	3.95	4.27	4.73
300	5.77	6.92	7.00	7.42	8.43
310	9.41	10.74	11.03	11.60	13.39
320	14.01	16.02	16.06	16.80	19.61

#### 4.2.8 Diferencia de temperatura en los canales 4 y 3.

La octava prueba hace uso de la diferencia de temperaturas entre los canales calibrados 4 y 3, sólo para imágenes nocturnas. Si la diferencia entre las temperaturas brillantes de los canales 4 y 3 es menor a un grado Kelvin, se asume que el pixel está contaminado con nubes bajas o niebla.

#### 4.2.9 Diferencia de temperatura en los canales 3 y 5.

La novena y última prueba hace uso de la diferencia de temperaturas entre los canales calibrados 3 y 5, sólo para imágenes nocturnas. Si la diferencia de temperaturas brillantes entre el canal 3 y el 5 es mayor a 1.5 grados Kelvin, entonces se asume que el pixel presenta contaminación por nubes delgadas o el campo de visión está parcialmente contaminado.

Cabe destacar que en el programa MAGMASAT\_NOAA existe la posibilidad de seleccionar las etapas de eliminación de nubes a utilizar, de forma que este proceso queda al criterio y experiencia del usuario del sistema, siendo este capítulo una guía de cómo y cuándo aplicar los distintos algoritmos disponibles.

**CAPITULO 5**

**PROGRAMA MAGMASAT\_NOAA**

## CAPITULO 5: PROGRAMA MAGMASAT\_NOAA

### 5.1 GENERALIDADES

El objetivo de esta memoria es obtener productos calibrados a partir de datos entregados por los sensores AVHRR de los satélites NOAA. Para ello se determinó implementar un sistema “amistoso” de calibración y procesamiento de las imágenes digitales, dando por resultado el programa MAGMASAT\_NOAA (Marcelo Gallardo Marusich Aplicaciones Satelitales NOAA). Este programa, o realmente código fuente, fue escrito en lenguaje de programación IDL (Interactive Data Language, Lenguaje Interactivo de Datos) versión 3.6.1b para Windows 3.1, aportado por el Laboratorio de Ozono, dependiente de la Universidad de Magallanes. Se escogió este lenguaje, después de estudiar varias alternativas (IDRISI, C++, etc.) debido a que fue diseñado especialmente para el manejo y procesamiento de grandes volúmenes de datos, y a la capacidad para crear ambientes de trabajo “amigables” en el sistema Windows con fácil programación, como ser pantallas, cuadros de ingreso de datos, etc., cualidades que son muy difíciles de encontrar en un solo paquete.

A continuación se expondrán algunas de las características inherentes al IDL, para luego entrar a describir a MAGMASAT\_NOAA en detalle.

### 5.2 INTERACTIVE DATA LANGUAGE (IDL)

IDL (Interactive Data Language, Lenguaje Interactivo de Datos) es un programa computacional completo para el análisis, manejo y visualización interactiva de los datos en grandes volúmenes, creado por la compañía norteamericana Research Systems Inc. Integra un poderoso lenguaje con numerosas técnicas de análisis matemático y de despliegue

FORTRAN o C++. Los usuarios pueden explorar datos interactivamente usando comandos, y creando aplicaciones completas por medio de la escritura de programas. Entre sus ventajas se encuentran:

- Es un lenguaje estructurado, que puede ser usado interactivamente para crear funciones, procedimientos y aplicaciones elaboradas.
- Las operaciones y funciones trabajan sobre módulos íntegros (sin usar loops), simplificando el análisis y reduciendo el tiempo de programación.
- La compilación y ejecución de los comandos provee una mayor interacción con el usuario.
- Gráficas en dos dimensiones, multi-dimensionales, visualización del volúmen, despliegue de la imagen, y animación, permite observar resultados en forma inmediata.
- Se proveen muchas rutinas de análisis numérico y estadístico, para el análisis y simulación de los datos.
- La flexibilidad y facilidad de las entradas y salidas. Permite al usuario leer cualquier formato de datos.
- Se incluyen formatos estándares de imágenes (BMP, GIF, JPEG y XWD) y formato de datos científicos (CDF, HDF y NetCDF).
- El programa está hecho para correr en varias plataformas, como ser UNIX, VMS, Windows, Windows NT y sistemas Macintosh, con pocas o sin modificaciones.
- La combinación de gráficos, texto e imágenes pueden ser mostradas en una o más ventanas. Estas son fácilmente creadas, destruidas y ocultadas.
- Existen rutinas FORTRAN y C++ que pueden ser dinámicamente unidas al IDL, para agregar funciones especializadas. De igual forma, los programas en C++ y

FORTRAN pueden ser llamados desde rutinas IDL como una biblioteca de subrutinas.

- Este programa además puede utilizar datos del tipo byte, entero, de punto flotante, flotante de doble precisión, complejo, complejo de doble precisión, y cadenas. Además pueden ser construidas estructuras que combinen diferentes tipos de datos.
- La sintaxis del IDL es deliberadamente simple, existiendo doce tipos de declaraciones que debieran ser familiares para aquellas personas que conocen de programación en FORTRAN y C++. Provee muchas estructuras de control asociadas con lenguajes modernos, como ser IF..THEN...ELSE, FOR...DO, WHILE, REPEAT, y CASE, además de BEGIN...END que permiten componer procesos. Los procedimientos y funciones permiten al usuario crear programas estructurados modularmente.
- Los resultados pueden ser graficados o mostrados con un mínimo de decisión y trabajo de parte del usuario. Por ejemplo, el procedimiento PLOT produce un fácil interprete gráfico de datos versus números de puntos, sin importar el modo o tamaño de los datos. Los datos son puestos a escala y los ejes automáticamente rotulados. Puede ser dibujado más de un punto sobre los mismos ejes al usar el procedimiento OPLOT. Un vector puede ser graficado versus otro vector, al llamar a un procedimiento para graficar con parámetros de dos vectores - un vector X y un vector Y.
- Las capacidades del IDL incluyen un extenso conjunto de rutinas estadísticas y matemáticas para realizar operaciones matriciales, análisis de correlación, ajuste de curvas y superficies, cuadriculación e interpolación, solución de sistemas lineales y no lineales, análisis de series en el tiempo, etc.

- Por último, en el sistema UNIX se pueden realizar llamadas a procedimientos remotos, las cuales pueden usarse para que IDL se comunique con otros procesos en la misma máquina o a través de la red.

Como se desprende de esta explicación, IDL constituye una herramienta poderosa para trabajar y analizar imágenes satelitales, pero involucra que el usuario debe tener conocimientos más complejos. IDL no es un lenguaje fácil de utilizar si no se tiene experiencia en programación y es confuso por su gran cantidad de funciones y procedimientos, pero el ambiente que lo encierra ayuda a que el usuario pueda realizar aplicaciones de alto nivel una vez que lo entra a dominar.

### 5.3 MAGMASAT\_NOAA

MAGMASAT\_NOAA es un código fuente escrito en el lenguaje IDL que no tiene la característica de transformarlo en lenguaje binario ejecutable, por lo cual lo primero que hay que realizar es cargar al IDL, y en el prompt IDL> escribir el nombre del programa, como se muestra en la figura 5.1.

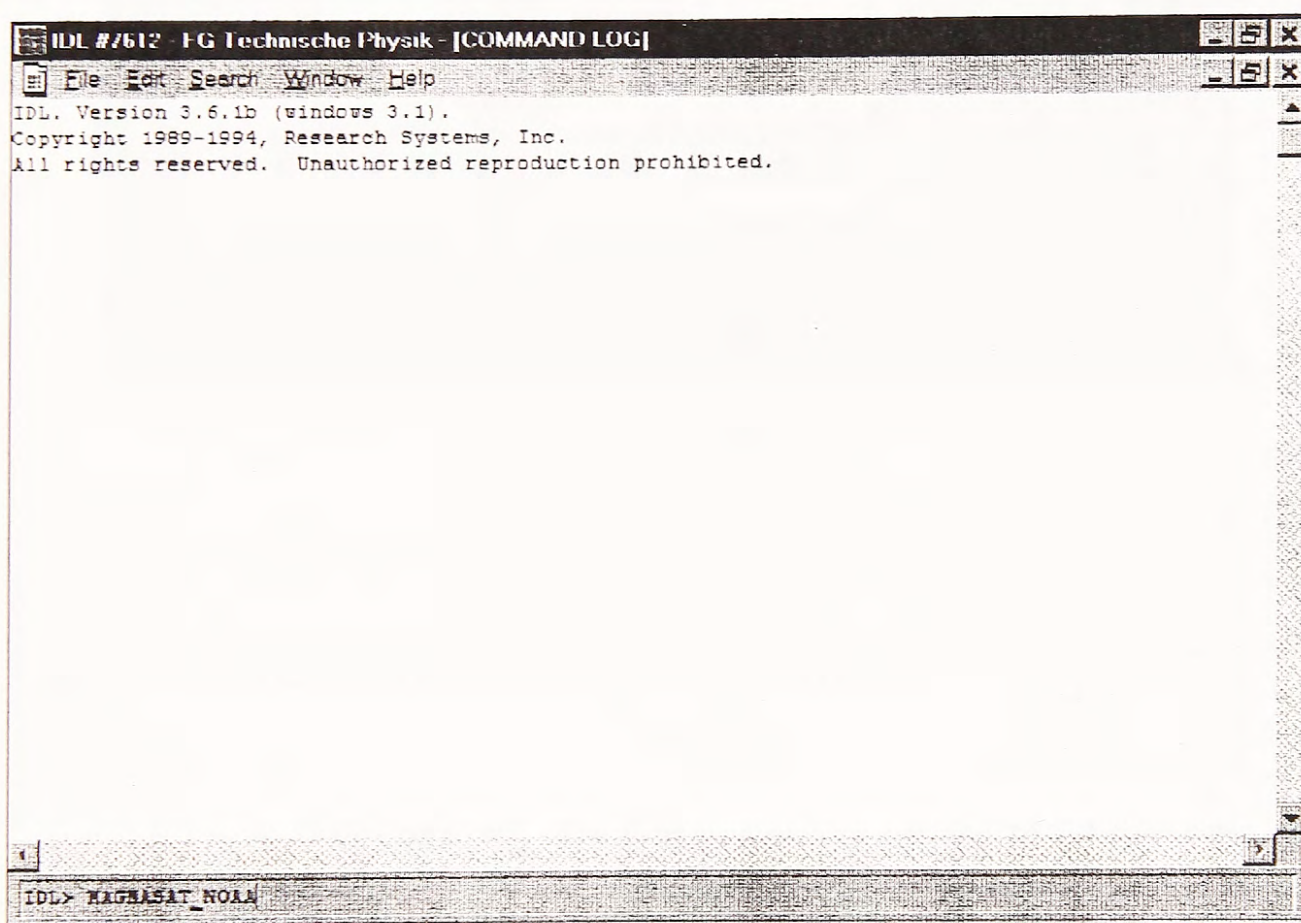


Figura 5.1.- Primer paso para cargar MAGMASAT\_NOAA.

Luego de ello se carga la primera pantalla de presentación que sólo tiene dos alternativas, “Cargar Imagen” y “Salir”; la primera muestra una típica interfaz de los programas en ambiente Windows, la cual permite el desplazamiento en el disco duro del computador para cargar dos tipos de archivos: tipo bloque<sup>1</sup> (ej. SE464J08.1B3, como se muestra en la Figura 5.2) y procesados (ej. SE464J08.1P3), estos últimos explicados más adelante en este mismo

capítulo (ver Figura 5.2). La segunda alternativa, “Salir”, permite abortar el programa sin ejecutar acción alguna.

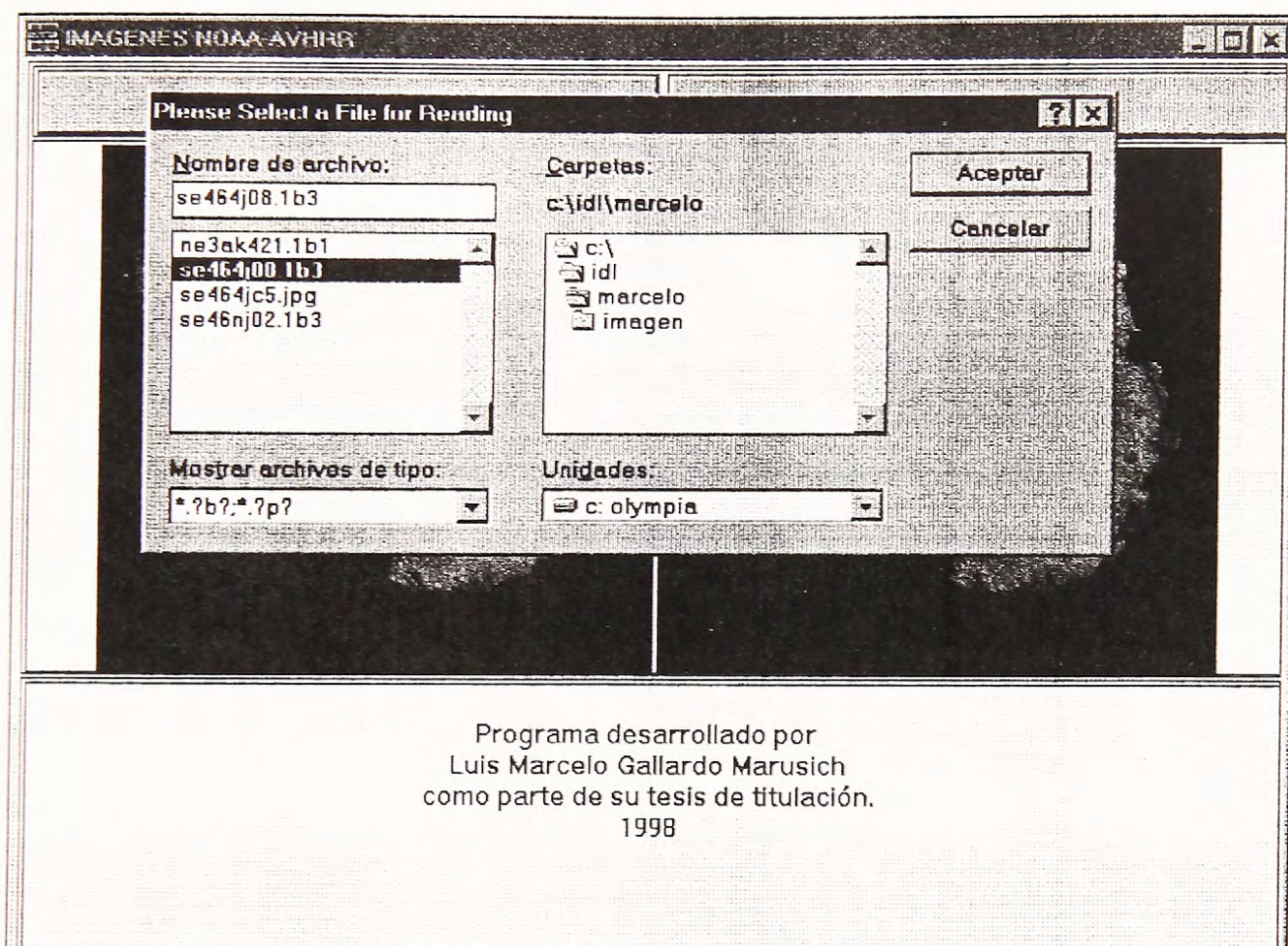


Figura 5.2.- Primer paso para cargar una imagen NOAA-AVHRR.

Como paso siguiente, MAGMASAT\_NOAA crea un archivo del tipo ASCII con extensión “.FOR” (ej. SE464J08.FOR) donde se guarda la información de la estructura interna del archivo tipo bloque<sup>1</sup>, con el valor exacto de los punteros donde comienza cada sub-bloque. La finalidad de esto es que en los futuros procesos desarrollados por MAGMASAT\_NOAA se tenga un acceso rápido a la información requerida. Así también se verifica que el archivo tipo bloque contenga los valores de calibración y navegación (OVERLAY, TIEPOINT y CALPOINT), sub-bloques creados por el sistema LARST<sup>2</sup>. Si el archivo no los presenta,

<sup>1</sup> Ver “2.6 SISTEMA LARST” y “APÉNDICE E: ESTRUCTURA INTERNA DE UN BLOQUE”.

<sup>1</sup> Ver en el Apéndice E “TABLA E.2.- ESTRUCTURA QUE PRESENTA UN BLOQUE DE DATOS PROCESADO”.

<sup>2</sup> Ver “2.6 SISTEMA LARST”.

aparece un mensaje en que se pide que se corran los programas CAL\_IMG.EXE, NAV\_IMG.EXE y MAP\_MOVE.EXE, permitiendo solamente ver los cinco canales de la imagen NOAA-AVHRR, sin tener opción a trabajarla y procesarla.

```

HEADER
  11
TIP_DATA
  536
CHDATA10  1
  1966629
CHDATA10  2
  3539507
CHDATA10  3
  5112385
CHDATA10  4
  6685263
CHDATA10  5
  8258141
VALDLINE
  9831018
HIST10BT  1
  9832569
HIST10BT  2
  9836679
HIST10BT  3
  9840789
HIST10BT  4
  9844899
HIST10BT  5
  9849009
TLE_DATA
  9853118
CALPOINT
  9853290
TIEPOINT
  9857528
OVERLAY
  9908506
TIEPOINT
  9962143
SATPOINT
  10013121
SUNPOINT
  10064099

```

Figura 5.3.- Típico archivo de formato, correspondiendo en este caso a SE464J08.FOR. En estos archivos se almacenan en formato ASCII los nombres de los sub-bloques de datos, con el puntero exacto donde comienzan.

Además se verifica si el archivo tipo bloque presenta los sub-bloques SATPOINT y SUNPOINT, que contienen los valores de ángulos cenitales satelitales y solares correspondientes a la imagen que se desea examinar. Si no los presenta, MAGMASAT\_NOAA activa automáticamente el programa SAT\_SUN.EXE (programa que forma parte del sistema LARST) que los crea para cada 16 líneas y 32 pixeles, y los deja

como sub-bloques dentro del archivo tipo bloque<sup>1</sup>; además MAGMASAT\_NOAA crea un archivo con extensión “.SAT” en base a la información anterior (ej. si la imagen revisada es SE464J08.1B3, se crea el archivo SE464J08.SAT), que contiene los valores interpolados de todos los ángulos cenitales satelitales para todos los píxeles de la imagen NOAA. Posteriormente aparece la segunda interfaz gráfica del programas, mostrada en la Figura 5.4.

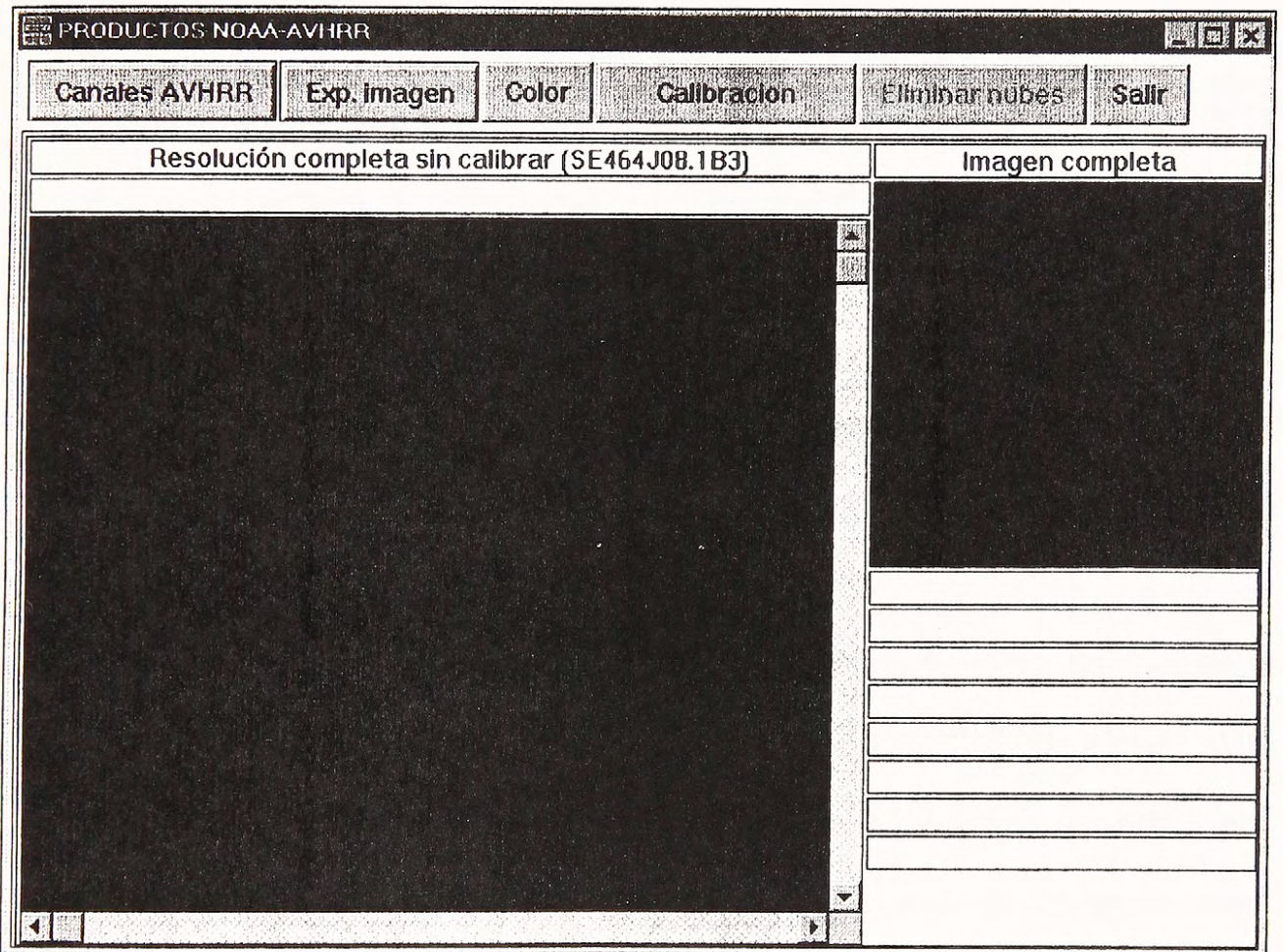


Figura 5.4.- Segunda interfaz gráfica del programa MAGMASAT\_NOAA.

En esta etapa se tiene una serie de botones con alternativas en la parte superior de la pantalla, entre las que se cuentan “Canales AVHRR”, “Exp. Imagen”, “Color”, “Calibración”, “Eliminar nubes” y “Salir”, y que a continuación se explican.

<sup>1</sup> Ver en el Apéndice E “TABLA E.2.- ESTRUCTURA QUE PRESENTA UN BLOQUE DE DATOS PROCESADO”.

- “Canales AVHRR” permite escoger el canal que uno desea visualizar (ver Figura 5.5.1), con sólo pulsar el botón izquierdo del mouse sobre la alternativa que el usuario desea revisar; recién cargado el canal que se quiere examinar se activan los demás botones de la parte superior de la pantalla (“Exp. Imagen”, “Color” y “Calibración”), excepto “Salir”, que siempre está activo, y que permite abortar esta parte del programa sin ejecutar acción alguna, volviendo a la pantalla inicial. En el cuadro con el título “Resolución completa sin calibrar”, y que además lleva por subtítulo el canal que se está revisando, se presenta la imagen seleccionada en su tamaño original (ej. la imagen SE464J08.1B3 se muestra en 512 columnas por 1536 filas), que por no entrar totalmente en pantalla se presenta en un cuadro de 512 columnas por 440 filas con barras deslizantes para poder “moverse” a lo largo y ancho de ella (ver Figuras 5.5.2 y 5.5.3); en cambio en el cuadro bajo el título “Imagen completa”, se presenta la imagen completa comprimida en un cuadro de 244 columnas por 244 filas.
- “Exp. Imagen” permite exportar el canal activo a formato gráfico JPEG en forma automática (ej. el primer canal de la imagen SE464J08.1B3 queda grabada como SE464jC1.JPG, formato JPEG del canal 1), como se puede apreciar en la Figura 5.5.4, y que se activa con solo pulsar el botón izquierdo del mouse sobre “Formato JPEG”; esta opción permite poder realizar otro tipo de manejos con la imagen mediante el uso de programas que trabajen con este tipo de formato, como ser Word 97, Coreldraw, Photofinish, Explorer, etc. El canal exportado tendrá la misma resolución y tamaño que la imagen original.
- “Color” permite cambiar el archivo de color de la imagen; al elegir esta alternativa aparece una interfaz gráfica con todas las alternativas de colores que se pueden escoger de las disponibles en IDL, y se seleccionará una de ellas al pulsar el botón izquierdo del mouse sobre la opción deseada. Lamentablemente el

cambio no se produce en forma automática, por lo que si se desean ver los efectos realizados se necesita cargar nuevamente el canal que se quiere revisar. Por ejemplo, en la Figura 5.5.5 se seleccionó el botón “Color” apareciendo la interfaz gráfica correspondiente; luego en la Figura 5.5.6 se seleccionó la escala de colores “RED TEMPERATURE”; posteriormente se volvió a cargar el canal 5 de la imagen activándose los cambios, como se puede observar en la Figura 5.4.7; finalmente para obtener nuevamente la Figura 5.5.2 se debe seleccionar el botón “Color”, escoger la escala de colores “B-W LINEAR”, y cargar el canal 5.

- Al seleccionar “Calibración”, el programa MAGMASAT\_NOAA extrae los datos de calibración desde el sub-bloque de datos CAL\_POINT<sup>1</sup>, los cuales se interpolan para obtenerlos en cada línea de la imagen. Además se procesan según lo que se explica en el “CAPÍTULO 3: CALIBRACIÓN DE DATOS AVHRR”, y se almacenan en un archivo de extensión “.CAL” (ej. los datos de calibración de la imagen SE464J08.1B3 quedan grabados en el archivo SE464J08.CAL). Una vez cumplido este proceso, desaparece el botón “Calibración”, y en su lugar aparece el botón “Ver datos” (ver Figura 5.5.8).
- “Ver datos” permite poder conocer los valores calibrados del canal seleccionado, al mover el cursor por la imagen que tiene por título “Resolución completa calibrada”; de este modo se conocen, para los canales 1 y 2, la posición del cursor (en coordenadas X e Y), el valor del pixel (de 0 a 1023), su radiancia calibrada (en  $\text{mW m}^{-2} \text{srad}^{-1} \text{cm}^{-1}$ ), y el porcentaje de albedo; y para los canales 3, 4 y 5, la posición del cursor (en coordenadas X e Y), el valor del pixel (de 0 a 1023), su radiancia calibrada (en  $\text{mW m}^{-2} \text{srad}^{-1} \text{cm}^{-1}$ ), y la temperatura brillante equivalente en grados Kelvin y Celsius. Una vez revisada la imagen, se finaliza

<sup>1</sup> Ver “2.6 SISTEMA LARST” del capítulo 2, y la Tabla E.2 en el “APÉNDICE E: ESTRUCTURA INTERNA DE UN BLOQUE”

este proceso apretando el botón derecho del mouse. Esta opción se puede activar todas las veces que se necesite, para los cinco canales.

- “Eliminar nubes” permite comenzar el algoritmo de eliminación y detección de las nubes y ruido presente en la imagen, que entorpecen la obtención de productos finales de calidad (explicados en el “CAPÍTULO 4: DETECCIÓN Y ELIMINACIÓN DE LAS NUBES DE LAS IMÁGENES HRPT/AVHRR”).
- “Salir” como se explicó anteriormente, permite abortar esta etapa del programa sin efectuar acción alguna, devolviéndonos a la pantalla inicial de MAGMASAT\_NOAA.

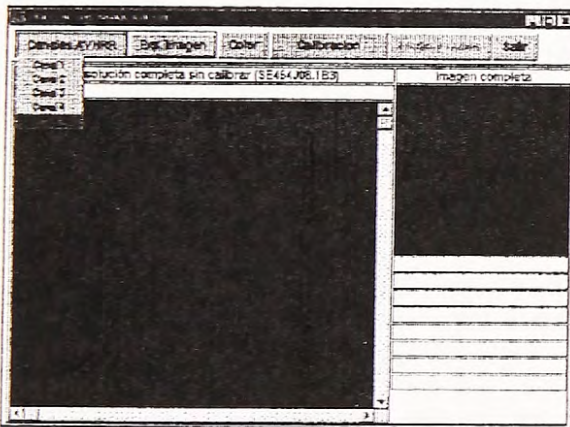


Figura 5.5.1

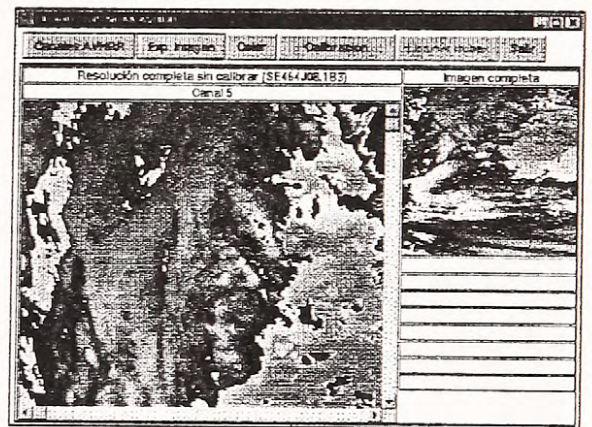


Figura 5.5.2

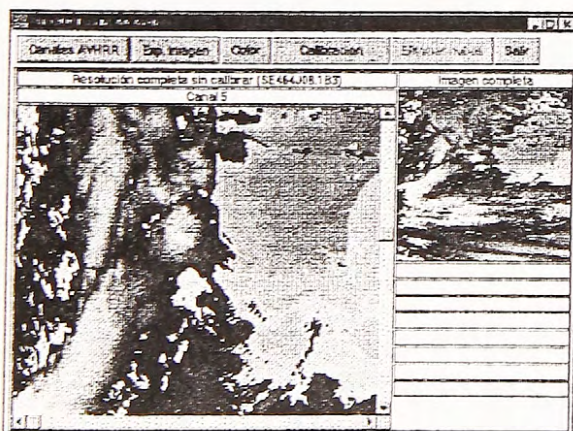


Figura 5.5.3

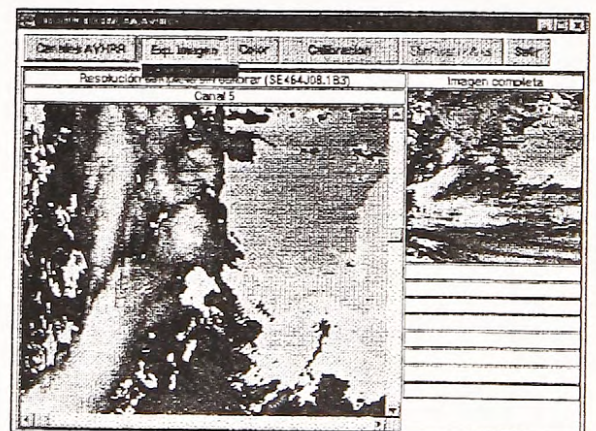


Figura 5.5.4

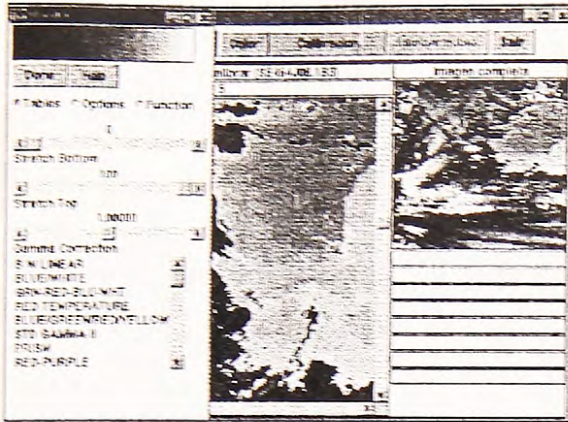


Figura 5.5.5

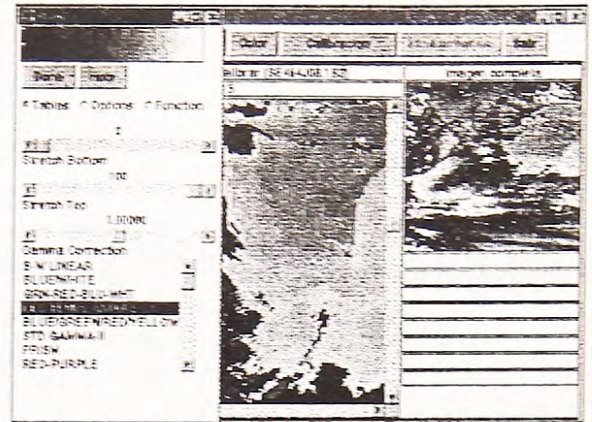


Figura 5.5.6

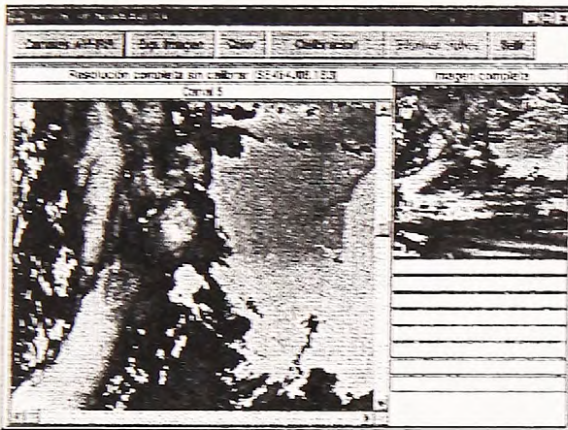


Figura 5.5.7

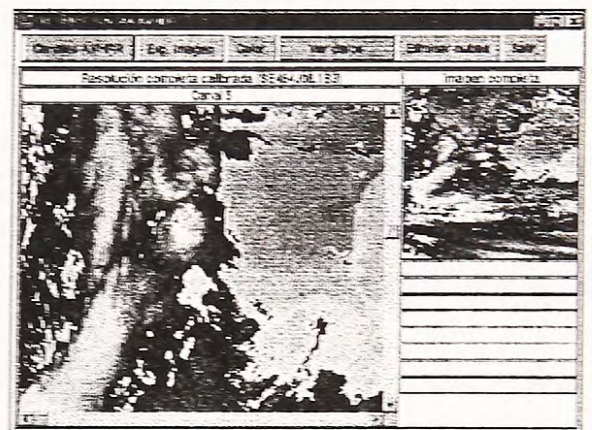


Figura 5.5.8

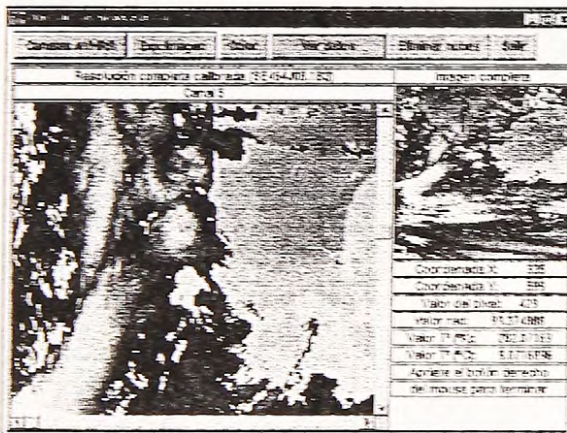


Figura 5.5.9

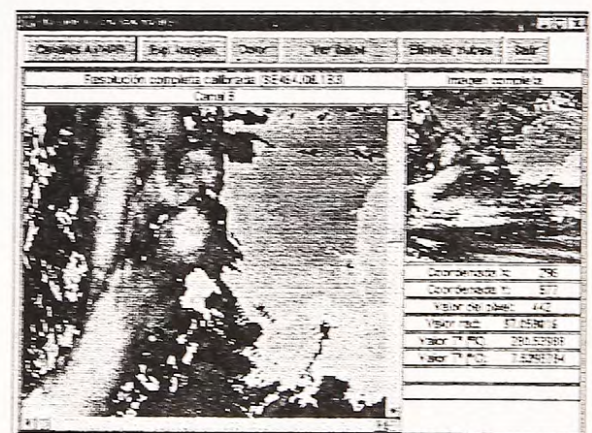


Figura 5.5.10

Al seleccionar el botón “Eliminar nubes” se acciona el algoritmo de detección y eliminación de nubes, el cual fue explicado en el capítulo 4. La primera pantalla que aparece es la mostrada en la Figura 5.6, donde al igual que en lo expuesto en este capítulo con anterioridad, aparecen dos cuadros, uno para la imagen en su tamaño real, y la otra para mostrarla en formato completo comprimido. En la parte superior de la pantalla se tienen una serie de botones, de los cuales sólo dos están activos; “Salir”, que tiene las mismas funciones

que las explicadas para otras pantallas, y “Comenzar 1ª etapa”, que da origen a la pantalla de la Figura 5.7.

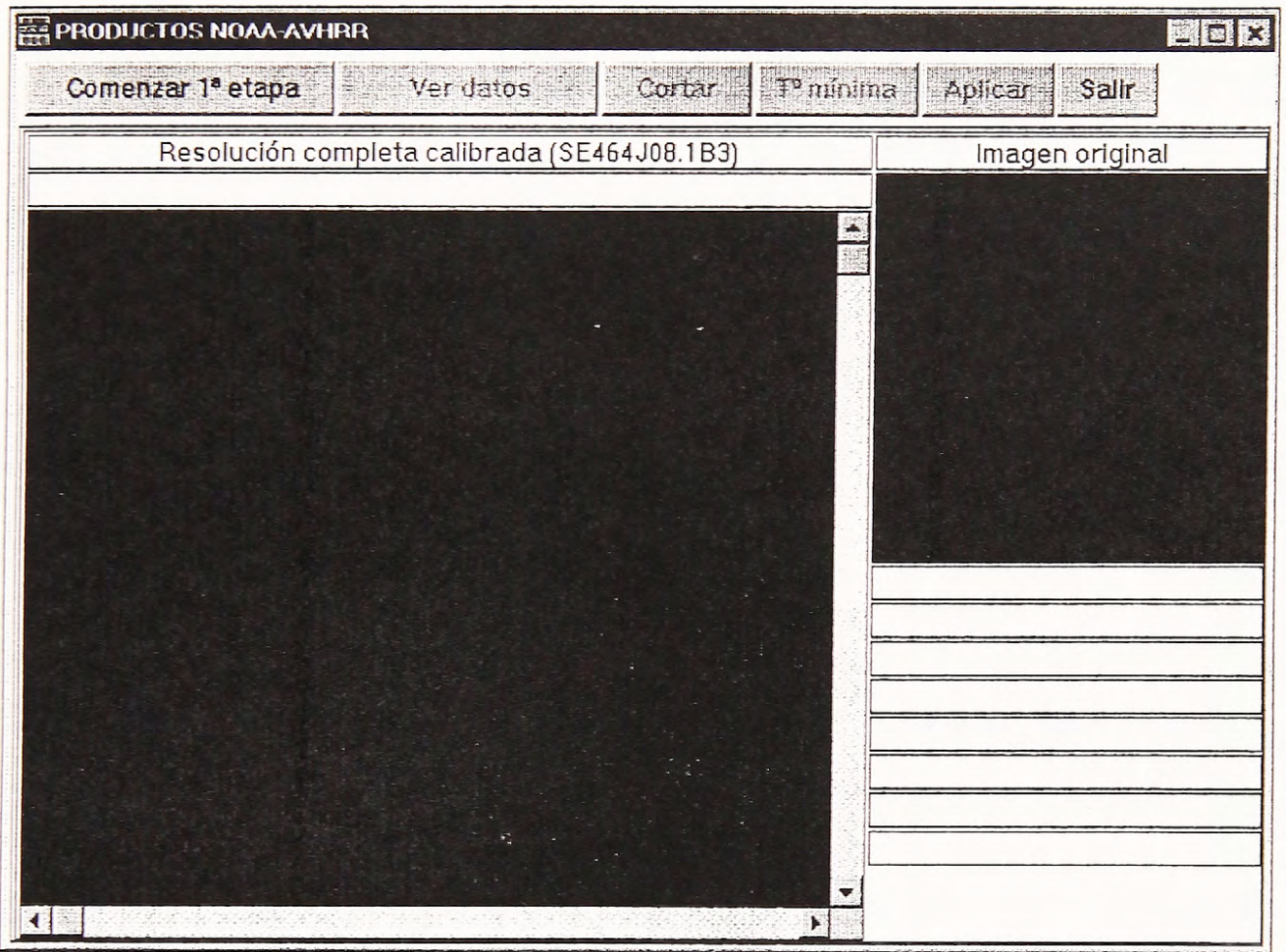


Figura 5.6.- Primera pantalla del algoritmo para la detección y eliminación de nubes.

Como se puede observar en la Figura 5.7, es aquí donde se da comienzo a la primera etapa del algoritmo de detección y eliminación de nubes; lo primero que hace MAGMASAT\_NOAA es cargar el canal 5 de la imagen que se está examinando, apareciendo una serie de botones en la parte superior de la pantalla. “Terminar 1ª etapa” permite saltar hacia la segunda etapa, sin realizar acción alguna en la primera, pero automáticamente se graba un archivo con sólo los cinco canales AVHRR (ej. si la imagen en revisión es SE464J08.1B3, se creará el archivo SE464J08.1P3, el cual contiene sólo los cinco canales calibrados AVHRR, con los datos en formato tipo doble punto flotante). Cada vez que se active y termine una etapa de este algoritmo, los cambios efectuados se aplicarán en los cinco canales, y se grabarán en este tipo

de archivo. “Ver datos” es similar a los explicados en los puntos anteriores, pues muestra el valor del pixel (de 0 a 1023), y la temperatura brillante en grados Kelvin y Celsius.

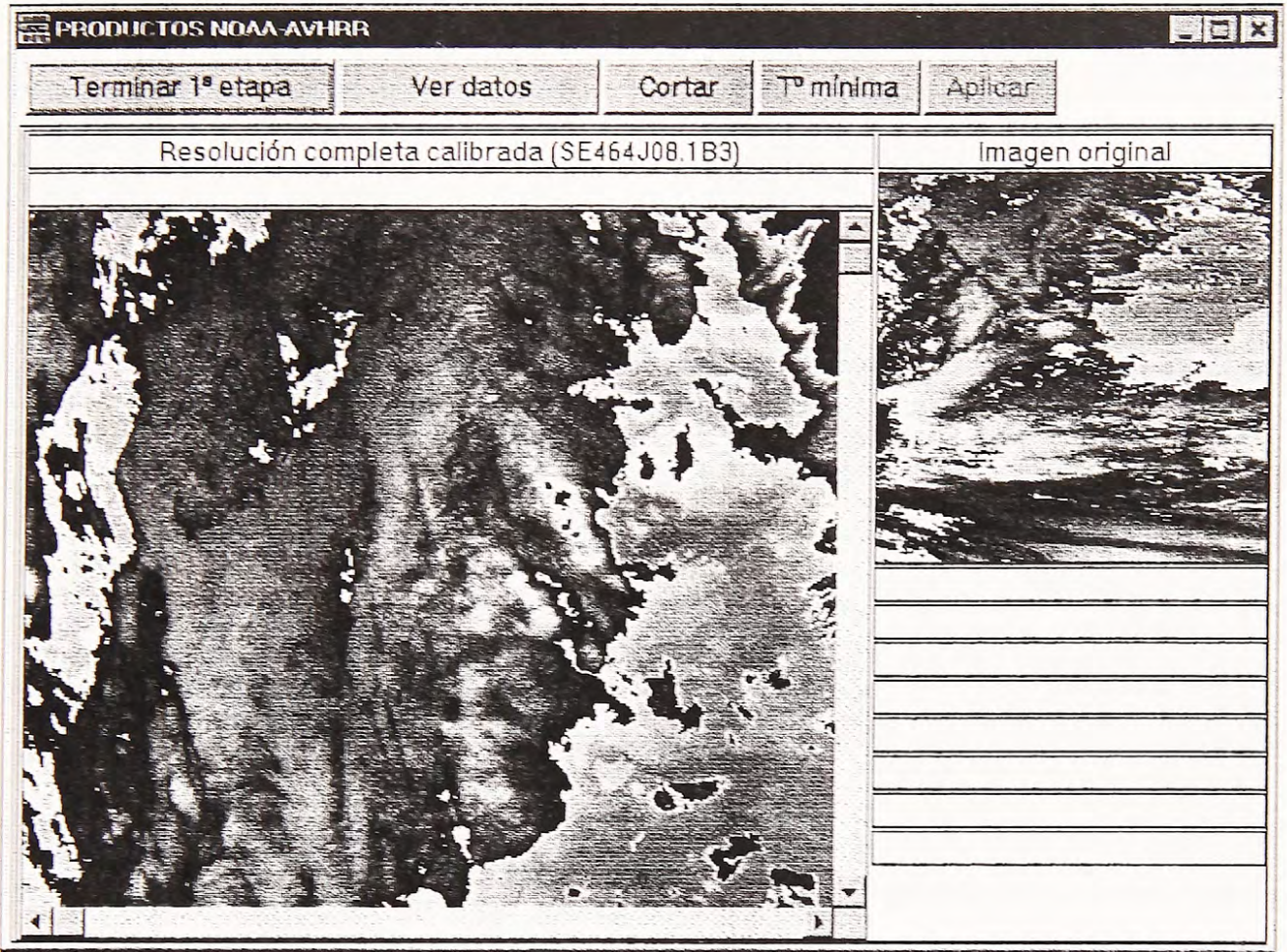


Figura 5.7.- Primera etapa del algoritmo de detección y eliminación de nubes.

El botón “Cortar” permite borrar parte de la imagen que no sirva; éste puede ser el caso en que la imagen aparezca con “ruido”, producto de un mal enlace al momento de ser enviados los datos desde el satélite hacia la estación en tierra. Lo que este botón hace es aparecer un cuadro pequeño de color amarillo, el cual puede ser movido a cualquier parte de la imagen, y agrandado a voluntad, todo ello al mantener apretado el botón izquierdo del mouse. Se selecciona la parte de la imagen que se quiera borrar, finalizando el proceso al apretar el botón derecho del mouse. De este modo todos los datos dentro de esta selección son colocados a “cero”, lo que es interpretado en todos los procesos posteriores como zonas sin interés de la imagen, sin ser tomados posteriormente en cuenta.

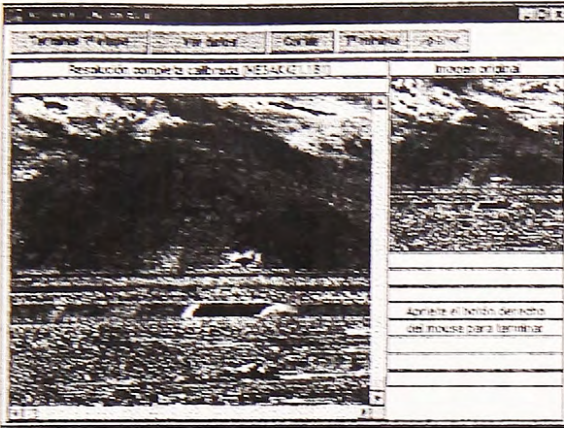


Figura 5.8.1

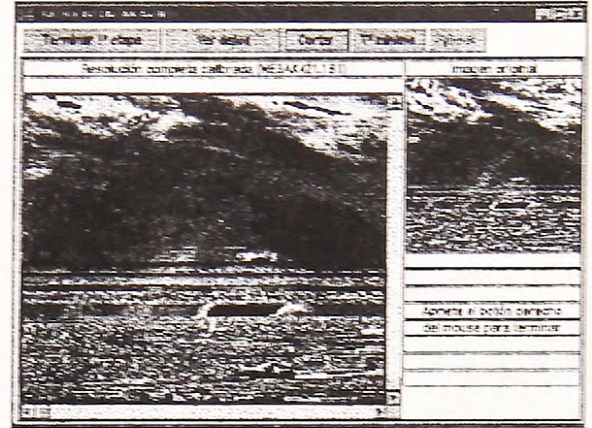


Figura 5.8.2

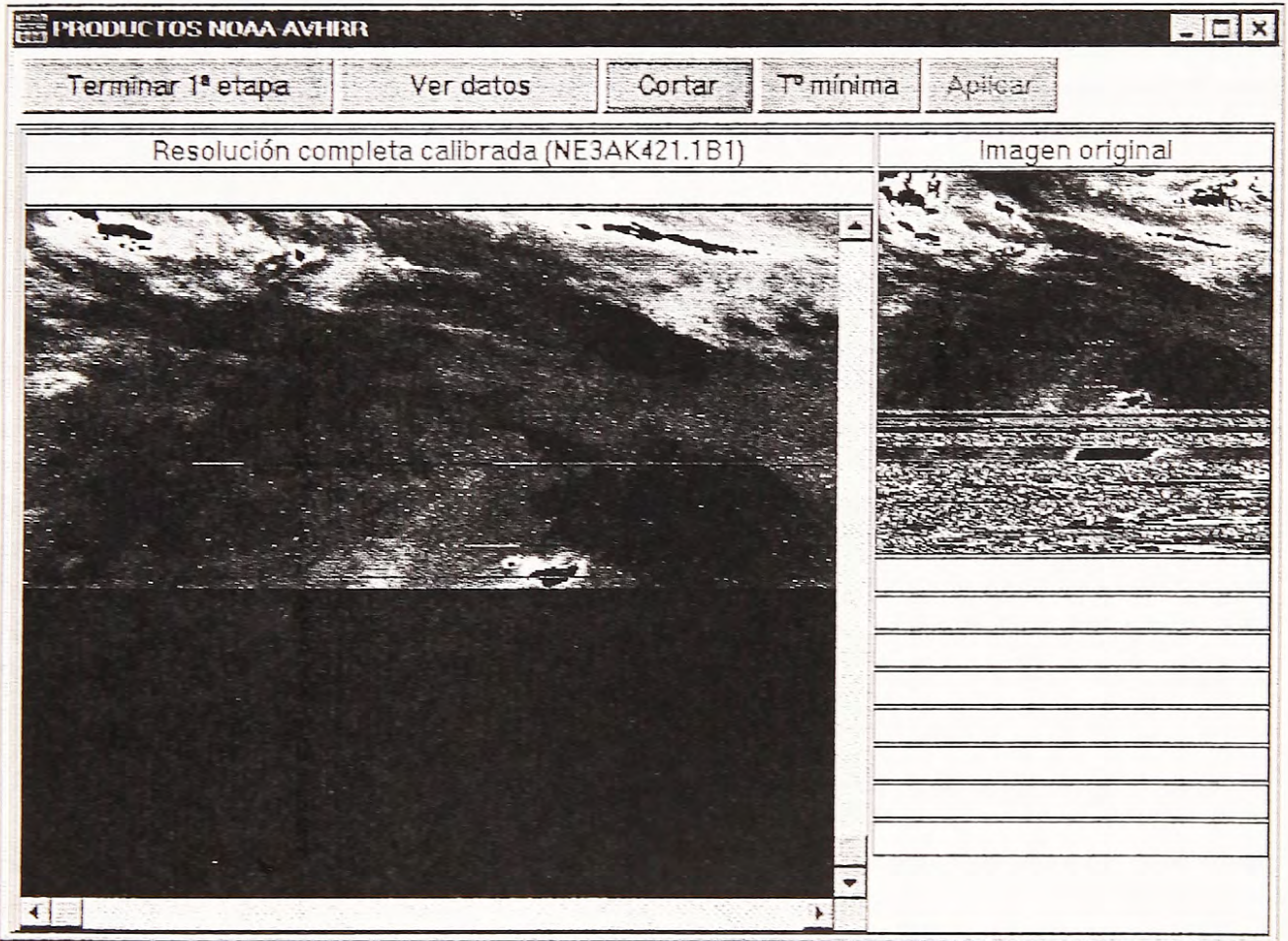


Figura 5.8.3.- Ejemplo de aplicación del botón "Cortar". En la Figura 5.8.1 se observa la imagen NOAA NE3AK421.1B1 y al cuadrado amarillo que aparece luego de seleccionar el botón "Cortar"; posteriormente se seleccionó toda la parte inferior de la imagen que corresponde a ruido (ver Figura 5.8.2). Finalmente se apretó el botón derecho del mouse, borrándose automáticamente lo seleccionado (los datos fueron puestos a "cero"), datos que no deben ser considerados para la obtención de productos finales útiles (ver Figura 5.8.3).

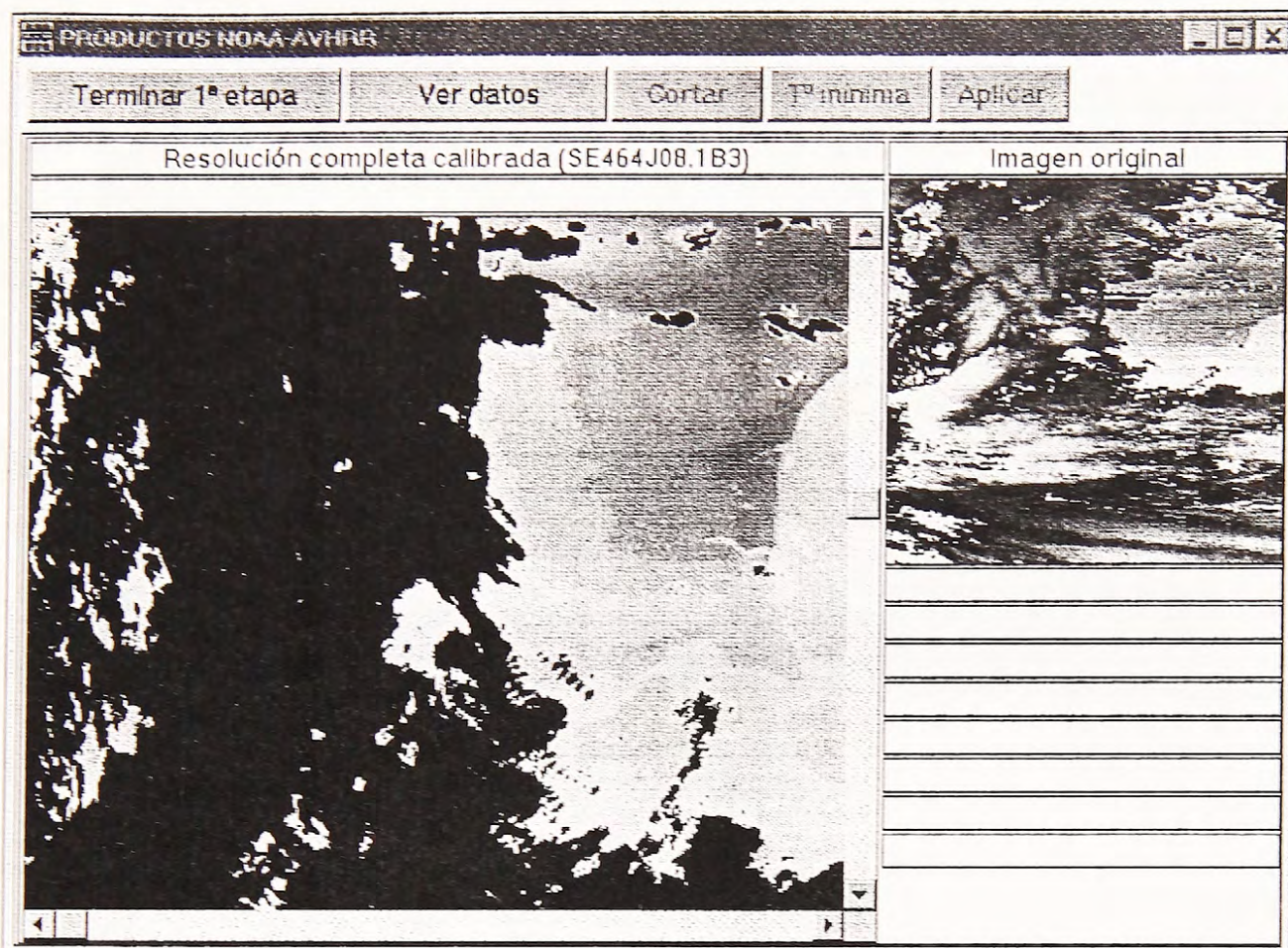


Figura 5.9.3.- Ejemplo de aplicación del botón "Tª mínima". En la Figura 5.9.1 se observa la imagen NOAA SE464J08.1B3 y el proceso de selección de la temperatura inferior límite entre las nubes altas y las zonas de tierra y mar "despejadas"; se finalizó el procedimiento al apretar el botón derecho del mouse, apareciendo la temperatura mínima seleccionada, e instando a apretar el botón "Aplicar" en caso de que esta sea la correcta (ver Figura 5.9.2), acción que fue realizada, obteniéndose la Figura 5.9.3, donde todos los pixeles con valores iguales o menores al límite seleccionado fueron puestos a "cero", los cuales aparecen de color negro en la imagen.

Las siguientes pantallas, correspondientes a las demás etapas de detección y eliminación de nubes, son similares, pero necesitan menos intervención del usuario. Como ocurre para esta etapa, las demás permiten ser saltadas en caso de que el operador del programa no quiera aplicarlas. Esto dependerá mucho del tipo de imagen que se desee procesar, y de la experiencia que tenga el usuario con el tratamiento de imágenes satelitales.

Una vez obtenido el archivo SE464J08.1P3, éste puede ser cargado por MAGMASAT\_NOAA desde su pantalla inicial (ver Figura 5.10), pasándose a la etapa de obtención de productos.

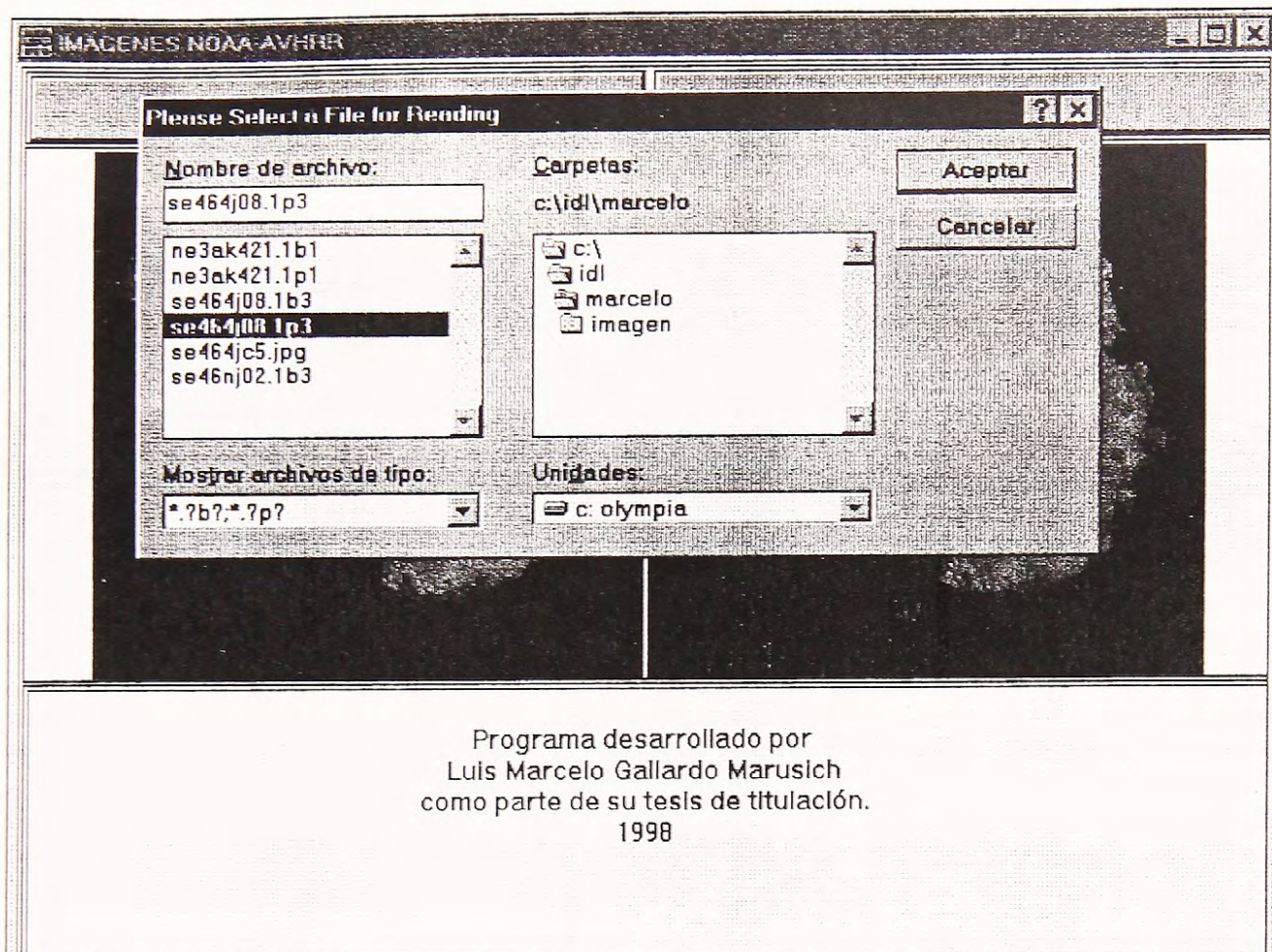


Figura 5.10.- Proceso de cargado del archivo SE464J08.1P3.

En este punto se tiene la imagen completamente calibrada, y pasada por el algoritmo de eliminación de nubes, estando lista para la obtención de índices vegetacionales, temperaturas superficiales de mar o cobertura de hielo marino. Al igual que en el caso de las pantallas anteriores, se cuenta con un cuadro para la presentación de la imagen en su tamaño real, y otro cuadro para mostrar la imagen completa reducida a un formato de 244 columnas por 244 filas.

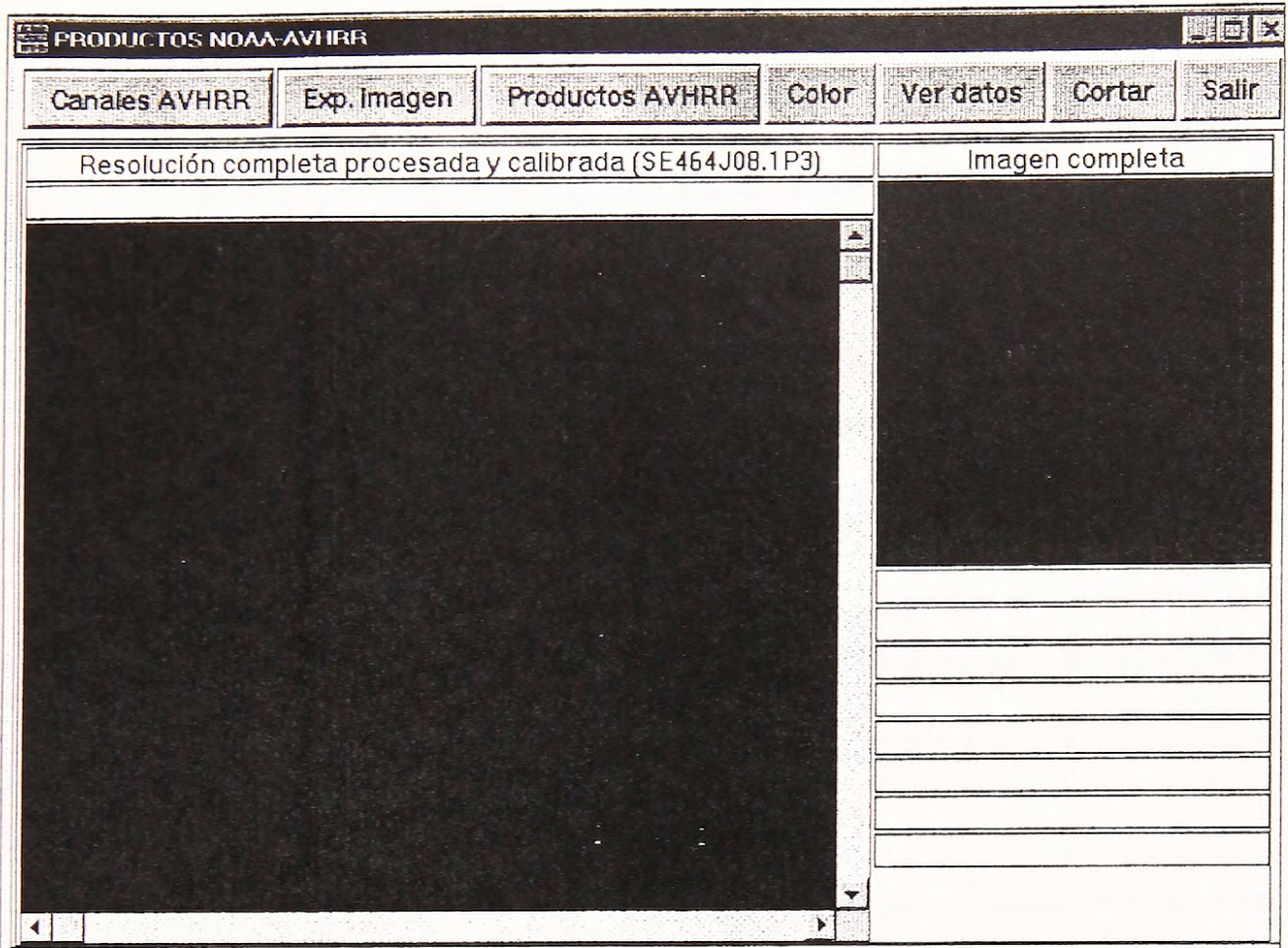


Figura 5.11.- Pantalla creada para el tratamiento de imágenes procesadas. En este caso se trata de la imagen SE464J08.1P3.

En la parte superior se tiene una serie de botones que a continuación se describen.

- “Canales AVHRR” al igual que en los casos anteriores, permite escoger el canal a visualizar (ver Figura 5.11), con sólo pulsar el botón izquierdo del mouse sobre la alternativa que se desea revisar; recién cargado el canal a examinar se activan los demás botones de la parte superior de la pantalla (Exp. Imagen, Color y Calibración), excepto “Salir”, que siempre está activo, y que permite abortar esta parte del programa sin ejecutar acción alguna, volviendo a la pantalla inicial.
- “Exp. Imagen” permite exportar el canal activo a formato gráfico JPEG en forma automática (ej. el primer canal de la imagen procesada SE464J08.1P3 queda grabada como SE464C1P.JPG, formato JPEG del canal 1), y que se activa con solo pulsar el botón del mouse sobre “Formato JPEG”.

- “Productos AVHRR” permite escoger el producto que se desea obtener (índice vegetacional, temperaturas superficiales del mar y cobertura de hielo marino), a partir de la imagen procesada. Esto será mejor explicado en el “CAPÍTULO 6: APLICACIONES DE LAS IMÁGENES NOAA-AVHRR” (ver Figura 5.12).
- “Color” permite cambiar el archivo de color de la imagen; al elegir esta alternativa aparecerá una interfaz gráfica con todas las alternativas de colores que se pueden escoger de las disponibles en IDL, y se seleccionará una de ellas al pulsar el botón del mouse sobre la deseada.
- “Ver datos” permite ver los datos calibrados de radiación, porcentaje de albedo (en el caso de los canales 1 y 2), y temperaturas en grados Kelvin y Celsius (en el caso de los canales 3, 4 y 5).
- “Cortar” que tiene la misma función a la explicada para el botón “Cortar” en la primera etapa del algoritmo de detección y eliminación de nubes (revisado en este mismo capítulo).
- “Salir” como se explicó anteriormente, permite abortar esta etapa del programa sin efectuar acción alguna, devolviéndonos a la pantalla inicial de MAGMASAT\_NOAA.

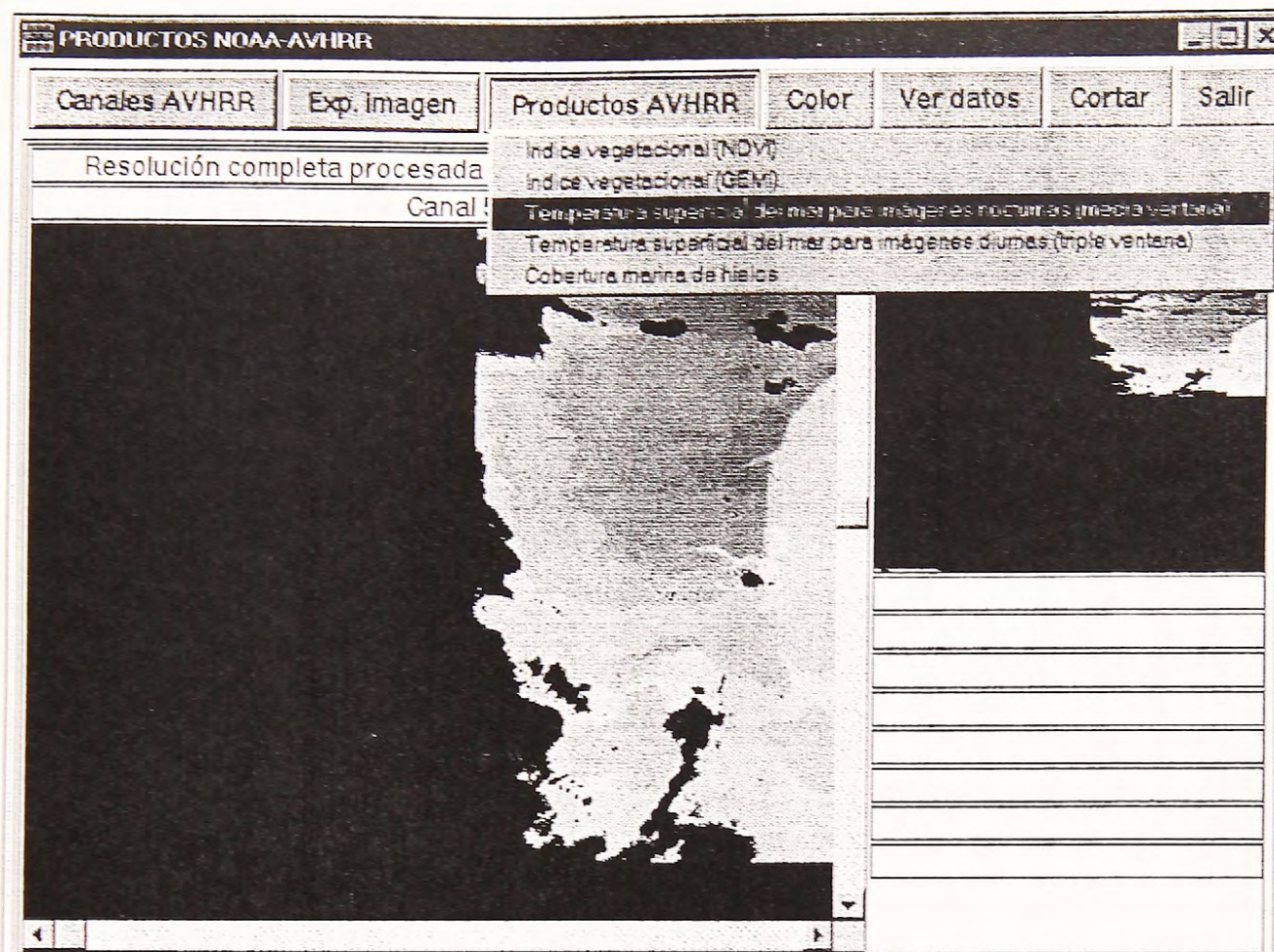


Figura 5.12.- Una vez cargado un canal de la imagen procesada, se puede activar el botón "Productos AVHRR" para la obtención de cinco alternativas de productos.

Al obtener el producto deseado, éste se muestra en un cuadro en su tamaño real, y en otro comprimido a 244 columnas por 244 filas, con dos botones en la parte superior de la pantalla, que son "Ver datos", para poder conocer los datos calibrados de los productos; y "Salir" para poder retornar a la pantalla anterior de MAGMASAT\_NOAA (ver Figura 5.13). Cada vez que se obtiene un producto, éste es guardado en forma automática como un archivo de datos de doble punto flotante, cuya extensión depende del producto elaborado (ej. en el caso de la imagen calibrada SE464J08.1P3, se obtienen índices vegetacionales de nombre SE464J08.NDV y SE464J08.GEM, temperaturas superficiales de mar SE464J08.SST, y coberturas marinas de hielo SE464J08.CHN).

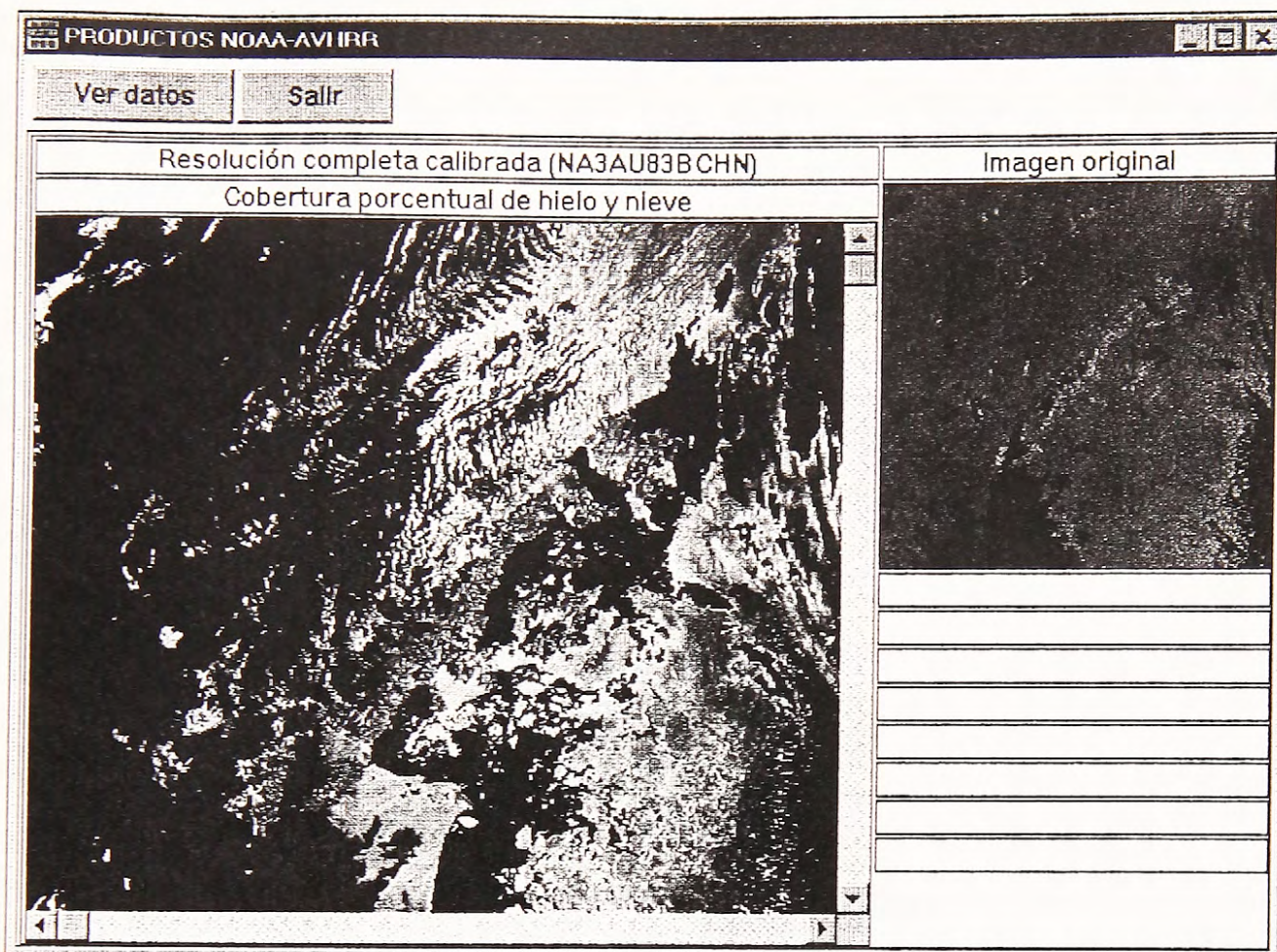


Figura 5.13.- Imagen típica de un producto AVHRR. En este caso se puede observar la cobertura de hielo y nieve en la península Antártica, producto que es grabado en el archivo NA3AUB3B.CHN. En el cuadro de la izquierda se puede observar el producto, mientras que en el cuadro de la derecha se ve el canal 2 de la imagen procesada. Los productos serán discutidos en mayor profundidad en el siguiente capítulo.

**CAPITULO 6**  
**APLICACIONES DE LAS IMÁGENES**  
**NOAA-AVHRR**

## **CAPÍTULO 6: APLICACIONES DE LAS IMÁGENES NOAA-AVHRR**

### **6.1 GENERALIDADES**

A lo largo de los años que llevan operando los satélites de la serie NOAA, se han desarrollado un sinnúmero de aplicaciones prácticas de ayuda a las actividades humanas diarias. Entre éstas se encuentran las temperaturas superficiales de mar (usadas especialmente por la industria pesquera), cubiertas de hielo marino (utilizadas por la navegación especialmente Ártica y Antártica), y los índices vegetacionales (usados por la agricultura, industria forestal, planificación urbana, etc.), que son productos factibles de obtener mediante el uso de sensores AVHRR, y son parte del objetivo principal de esta tesis. A continuación se presentará el marco teórico que las envuelve, para luego mostrar los resultados obtenidos mediante el programa MAGMASAT\_NOAA.

### **6.2 MEDICIONES INFRARROJAS MULTICANALES DE LA TEMPERATURA SUPERFICIAL DEL MAR**

La aparición del sensado remoto a través de satélites artificiales en las últimas décadas revolucionó las ciencias oceanográficas, debido a la cantidad de datos que se pueden obtener. Tradicionalmente los datos oceanográficos han sido obtenidos ocasionalmente gracias a cruceros científicos, y regularmente por medio de naves comerciales y de la armada. Estos han sido de áreas geográficas muy reducidas, y en forma irregular en el tiempo; en cambio los satélites proveen cobertura regular de todos los océanos y grandes cantidades de datos, que serían imposible de obtener a través de métodos convencionales. Existen muchos instrumentos que miden variables oceanográficas, como ser los AVHRR, que se ocupan especialmente para la

confección de cartas de temperatura superficial de mar (SST, Sea Surface Temperature), cuya elaboración fue uno de los objetivos de esta tesis, y que a continuación se expone.

La exactitud con la cual la temperatura del mar puede ser medida usando radiómetros infrarrojos en un satélite, se ve limitada principalmente en tres aspectos. La primera tiene relación con la identificación apropiada de regiones nubladas, ya que si no se cumple esta premisa, se pueden confundir las mediciones de la temperatura superficial del mar con las correspondientes a la temperatura de las nubes. En segundo lugar se tiene la absorción por parte de la atmósfera de algunas radiaciones emitidas por la superficie terrestre, y en tercer lugar se tiene la radiación que es reflejada desde la superficie de la atmósfera hacia el satélite. Parte de los problemas expuestos anteriormente son resueltos por el programa MAGMASAT\_NOAA en el proceso de calibración radiométrica de las imágenes, y mediante el algoritmo de eliminación de nubes<sup>1</sup>.

En el infrarrojo termal ( $\lambda=3-14 \mu\text{m}$ ) la emisividad del agua de mar es alta y relativamente constante, la instrumentación está bien desarrollada, y la eficiencia radiométrica es relativamente alta debido a la naturaleza de la función de Planck a temperaturas cercanas a los 300°K. En estas circunstancias por muy grande que sea la fuente, las inexactitudes en las mediciones recaen en la estimación de la corrección atmosférica - usualmente expresada como un déficit de temperatura que bordea bajo 1°K en latitudes altas y bajas, y sobre 20°K en los trópicos. Por esta razón es necesario el uso de modelos válidos de la transmitancia atmosférica. Estudios hechos al respecto (McClain, 1983) demuestran que el uso de dos o tres canales permite que se puedan inferir los valores de la SST global dentro de 1km en las mediciones. Para estimar la SST usando un radiómetro con N canales, las mediciones son hechas de la radiancia terrestre  $R_i$ ,  $i=1, \dots, N$ , en la banda N centrada a la longitud de onda  $\lambda_i$ . La radiancia se relaciona a la temperatura por la función de Planck, y para condiciones atmosféricas dadas, la temperatura de la superficie,  $\bar{T}_s$ , puede ser expresado como  $\bar{T}_s = f(T_1, T_2, \dots, T_N)$ , donde  $f$  es una función

complicada, dependiente de la estructura atmosférica, propiedades de la superficie, ángulo cenital del satélite, etc. Para efectos prácticos, la expresión se aproxima por:

$$T_s = a_0 + \sum_{i=1}^N a_i T_i \quad (6.1)$$

donde  $T_s$ : temperatura superficial del mar calibrada<sup>2</sup>

Se propuso que la medición de dos (o tres) bandas distintas en la ventana atmosférica de los 10-13  $\mu\text{m}$ , puede ser usada para determinar los efectos atmosféricos y así la SST (Prabhakara, 1974). Las longitudes de onda se escogen de tal forma que los efectos atmosféricos son diferentes para cada canal (Prabhakara, 1974; McMillan, 1975; Deschamps y Phulpin, 1980). De este modo durante el día, la temperatura brillante del canal 3.7  $\mu\text{m}$  tiene una contribución apreciable de la radiación solar reflejada y dispersada (Takashima y Takayama, 1981), por lo que sólo los canales 4 y 5 son usados para datos de día, conduciendo a la relación de regresión de la “media ventana”; en cambio para la determinación de la SST durante la noche se usan los canales 3, 4 y 5, conduciendo a la regresión de la “triple ventana” (McClain, 1985; Bernstein, 1982). El algoritmo de media ventana usa la temperatura brillante del canal 4 como la estimación de la SST de orden más bajo, y la diferencia entre los canales 4 y 5 para corregir las distorsiones producto de la atmósfera. En cambio el algoritmo de triple ventana usa la temperatura brillante del canal 4 como la estimación de la SST de orden más bajo y la diferencia entre los canales 3 y 5 para corregir las distorsiones producto de la atmósfera. Además se usó un término de corrección, sobre la base del ángulo cenital satelital, que debe ser aplicado para ajustar las mediciones hechas fuera de nadir; si se define  $\theta$  como el ángulo cenital del satélite, entonces los dos algoritmos son:

---

<sup>1</sup> Ver “CAPÍTULO 3: CALIBRACIÓN DE DATOS AVHRR” y “CAPÍTULO 4: DETECCIÓN Y ELIMINACIÓN DE LAS NUBES DE LAS IMÁGENES HRPT/AVHRR”.

$$T_{\text{media ventana}} = a_0 T_4 + a_1 (T_4 - T_5) + a_2 (T_4 - T_5)(\sec\theta - 1) + a_3 \sec\theta + a_4 \quad (6.2)$$

$$T_{\text{triple ventana}} = a_0 T_4 + a_1 (T_3 - T_5) + a_2 (T_3 - T_5)(\sec\theta - 1) + a_3 \sec\theta + a_4 \quad (6.3)$$

donde  $T_{\text{media ventana}}$ : temperatura superficial del mar calibrada, algoritmo de media ventana.

$T_{\text{triple ventana}}$ : temperatura superficial del mar calibrada, algoritmo de triple ventana.

$T_3$ : temperatura brillante del canal AVHRR número 3.

$T_4$ : temperatura brillante del canal AVHRR número 4.

$T_5$ : temperatura brillante del canal AVHRR número 5.

$a_0, a_1, a_2, a_3$  y  $a_4$ : coeficientes de corrección de la temperatura superficial del mar.

$\sec\theta$ : secante del ángulo cenital del satélite, para  $\theta < 55^\circ$ .

En la tabla 6.1 se entregan los parámetros usados para la obtención de las temperaturas superficiales del mar para media y triple ventana, coeficientes que fueron determinados mediante comparaciones de datos AVHRR y mediciones en terreno mediante el uso de boyas en el Atlántico Norte; posteriormente fue aplicado en la Antártica por investigadores alemanes, obteniendo errores dentro de  $0.5^\circ\text{K}$  como máximo. Los coeficientes son válidos para temperaturas expresadas en grados Celsius o Kelvin; la única excepción es el término  $a_4$  que varía dependiendo de la escala de temperatura.

---

<sup>2</sup> Ver "APÉNDICE G: JUSTIFICACIÓN MATEMÁTICA DEL ALGORITMO DE LA TEMPERATURA SUPERFICIAL DEL MAR".

Tabla 6.1.- Coeficientes para el algoritmo de media ventana.

SATELITE	TIEMPO	$a_0$	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_4$ (°K)	$a_5$ (°C)
NOAA-14	Diurno	1.017342	2.139588	0.779706	0	-5.28	-0.543
NOAA-14	Nocturno	1.029088	2.275385	0.752567	0	-9.09	-1.145
NOAA-12	Diurno	1.013674	2.443474	0.314312	0	-4.647	-0.912
NOAA-12	Nocturno	1.013674	2.443474	0.314312	0	-4.647	-0.912
NOAA-11	Diurno	1.01345	2.659762	0.526548	0	-4.592	-0.918
NOAA-11	Nocturno	1.052	2.397089	0.959766	0	-15.52	-1.316
NOAA-9	Diurno	0.9994	2.7057	-0.27	0.73	0.1177	-0.046
NOAA-9	Nocturno	0.9994	2.7057	-0.27	0.73	0.1177	-0.046
NOAA-7	Diurno	1.0346	2.5779	0	0	-10.05	-0.6
NOAA-7	Nocturno	1.0346	2.5779	0	0	-10.05	-0.6
NOAA-10	Diurno	1.1	0	0	0	-27.316	0
NOAA-10	Nocturno	1.1	0	0	0	-27.316	0
NOAA-8	Diurno	1.1	0	0	0	-27.316	0
NOAA-8	Nocturno	1.1	0	0	0	-27.316	0
NOAA-6	Diurno	1.1	0	0	0	-27.316	0
NOAA-6	Nocturno	1.1	0	0	0	-27.316	0

Tabla 6.2.- Coeficientes para el algoritmo de triple ventana.

SATELITE	TIEMPO	$a_0$	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_4$ (°K)	$a_5$ (°C)
NOAA-14	Nocturno	1.010037	0.920822	0	1.76	2.214	0.528
NOAA-12	Nocturno	1.058532	1.016347	0	2.081917	-3.407	12.58
NOAA-11	Nocturno	1.036027	0.892857	0.520056	0	-9.224	0.617

### 6.3 IDENTIFICACIÓN DE ÁREAS CON HIELO MARINO

Desde que comenzó a utilizarse la percepción remota mediante satélites, se han producido mapas de hielo marino usados en la navegación Ártica y Antártica. Se han investigado en especial las imágenes diurnas tomadas sobre la Antártica, y se ha propuesto una clasificación de sus características en base a patrones multiespectrales de los datos representados en ellas, obteniéndose resultados satisfactorios al ser comparados con observaciones en terreno. Sobre la base de observaciones hechas por los investigadores, se pueden distinguir cuatro categorías principales:

- Mar abierto.
- Hielo y nieve en tierra.
- Hielo marino.
- Nubes gruesas y delgadas, sobre agua o hielo/nieve.

Además, de estas mismas investigaciones, se desprenden que los mayores problemas que se presentan en el estudio de zonas cubiertas con hielo y/o nieve, marino y/o terrestre, para poder distinguir estas cuatro categorías en una imagen son :

- la nieve puede ser detectada por su brillo en el canal visible (canal 1) pero las nubes pueden estar presentes en ellas, las cuales son importantes de distinguir para no distorsionar los datos.
- normalmente se puede distinguir hielo marino de mar abierto en el canal 1 y 2 debido a su alta reflectancia, y en el canal termal infrarrojo por su baja temperatura, pero como en el caso anterior las nubes entorpecen la observación de la nieve y hielo.

En base al trabajo de Giuseppe Zibordi y G. Paolo Meloni (1990), se determinó que las radiancias medias medidas por los sensores AVHRR en presencia de agua con reflectancias muy bajas, y hielo generalmente cubierto con nieve de reflectancias muy altas, pueden ser relacionadas con la cobertura de hielo marino. Por lo tanto el porcentaje de cobertura de hielo marino 'C', suponiendo que tiene una dependencia lineal con respecto a radiaciones en el infrarrojo cercano, puede ser calculado usando la relación empírica:

$$C = \frac{\langle L \rangle_2 - \langle L_w \rangle_2}{\langle L_i \rangle_2 - \langle L_w \rangle_2} \times 100 \quad (6.4)$$

donde C: porcentaje de hielo marino o terrestre.

$\langle L \rangle_2$ : radiancia del canal 2.

$\langle L_w \rangle_2$ : valor de radiancia más alta en la imagen.

$\langle L_i \rangle_2$ : valor de radiancia más bajo de hielo/nieve terrestre en la imagen.

Ellos usaron el canal dos de los sensores AVHRR debido a su baja dependencia de la atmósfera y sus distorsiones, en comparación al canal uno. Además determinaron que las fuentes de errores se producían en los siguientes casos:

- hielo glacial fue clasificado como hielo común.
- hielos en tierra sobre superficies con presencia de sombras podían ser clasificadas como zonas con nubes.
- nubes delgadas sobre hielo/nieve en tierra fueron clasificadas como zonas de nubes.
- áreas continentales sin la presencia de hielo/nieve podían ser clasificadas como zona de nubes.

De todas formas, al realizar comparaciones entre las imágenes satelitales con diferentes condiciones de iluminación y observaciones visuales en terreno hechas mediante el uso de helicópteros durante un periodo de dos meses, determinó errores máximos de un 15% en las áreas investigadas, resultados que aún se consideran altamente aceptables para los usos que se le pretenden dar a este tipo de productos (Zibordi y Meloni, 1991)

## 6.4 ÍNDICES VEGETACIONALES

Otra de las grandes aplicaciones del sensado remoto mediante el uso de satélites, ha sido para la observación de la superficie terrestre, proponiéndose diversos métodos de estudio e interpretación en las pasadas décadas, dependiendo del objetivo que se le quiera dar a este tipo de datos. Una de las aplicaciones más importantes y comunes han sido los índices vegetacionales, los cuales también son diseñados dependiendo de la aplicación en particular que se les quiera dar. En teoría, los índices vegetacionales son una estimación cuantitativa de las propiedades de la cubierta vegetal sobre la superficie terrestre.

La vegetación crece asimilando dióxido de carbono atmosférico en sus hojas, proceso bioquímico llamado fotosíntesis. Este proceso se lleva a cabo debido a que la clorofila, pigmento presente en las hojas verdes, absorbe radiación solar. Esta energía es usada para sintetizar moléculas orgánicas, las cuales son la base de la vida vegetal. Pero no toda esta energía es útil en este proceso. En particular, la energía asociada con ondas electromagnéticas cuya longitud de onda exceda los 700nm no es suficiente para provocar reacciones bioquímicas. De acuerdo a lo mostrado en el capítulo 2 Tabla 2.2 “Respuesta espectral en  $\mu\text{m}$  de cada sensor para los diferentes satélites”, los dos primeros canales trabajan en el rango espectral a ambos lados de este límite de 700nm, entregando una oportunidad única para estudiar los procesos vegetativos, ya que presentan una gradiente más fuerte de la reflectancia en este punto que otras superficies naturales. Las diferencias espectrales fuertes entre la vegetación viva verde y otro tipo de superficies, combinado con las oportunidades tecnológicas para adquirir datos en este rango espectral, resultaron en la creación de expresiones matemáticas conocidas como ‘índices vegetacionales’. Estas fórmulas empíricas resaltan estos contrastes espectrales, y están diseñados tal que el mayor valor del índice corresponde a la mayor probabilidad de que ese punto de observación contenga vegetación verde viva.

Se han propuestos muchos tipos de índices a lo largo del tiempo, siendo el NDVI (Normalized Difference Vegetation Index, Índice Vegetacional Normalizado Diferencial), Pearson y Miller (1972), la expresión más simple, definida como:

$$\text{NDVI} = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_1 + \rho_2} \quad (6.5)$$

donde  $\rho_1$ : radiancia del canal 1.

$\rho_2$ : radiancia del canal 2.

Desde luego otro tipo de superficies pueden exhibir una respuesta espectral similar (ej. un incremento en la humedad del terreno puede ser interpretado erróneamente como un incremento en la cubierta vegetativa). Además los efectos atmosféricos siempre están presentes en las observaciones satelitales; es así como las radiaciones percibidas en el canal 2 tienden a ser absorbidas por vapor de agua, reduciendo sus reflexiones, o los aerosoles afectan al canal 1 dando por resultado una atenuación neta de las reflectancias medidas sobre ‘superficies brillantes’ o sobre ‘superficies oscuras’, dependiendo de las condiciones.

Otro tipo de índice vegetacional propuesto es el GEMI (Global Environment Monitoring Index, Índice de Monitoreo Ambiental Global), Pinty y Verstraete (1992), definido como:

$$\text{GEMI} = \eta(1 - 0.25\eta) - \frac{\rho_1 - 0.125}{1 - \rho_1} \quad (6.6)$$

$$\eta = \frac{2(\rho_2^2 - \rho_1^2) + 1.5\rho_2 + 0.5\rho_1}{\rho_2 + \rho_1 + 0.5} \quad (6.7)$$

donde  $\rho_1$ : radiancia del canal 1.

$\rho_2$ : radiancia del canal 2.

Este índice no lineal fue diseñado específicamente para ser menos sensible que otros índices a las perturbaciones atmosféricas y efectos provocados por los tipos de terrenos, y para ser muy sensible a superficies brillantes y nubes en la región visible.

Al realizar una comparación entre los dos índices vegetacionales propuestos, se tiene que ambos determinan la ubicación exacta de vegetación densa. Sin embargo, GEMI provee una información más detallada donde la cubierta vegetal es limitada. GEMI también mantiene una gama dinámica mayor que el NDVI en las regiones desérticas, pero este último distingue mejor las diferencias entre masas de tierra y agua; finalmente, GEMI distingue mejor las zonas terrestres cubiertas por nubes, la cual es importante en nuestra región.

## 6.5 EJEMPLOS DE APLICACIÓN

A continuación se procederá a mostrar paso a paso un ejemplo para cada una de las aplicaciones desarrolladas en esta tesis. Para los índices vegetacionales y temperaturas superficiales del mar se usará el bloque SE3BHI19.1B2, cuya información es la siguiente:

- Imagen tomada por el satélite NOAA-14, en órbita de sur a norte.
- El tamaño de la imagen es de 512 columnas por 1024 filas.
- La fecha de captura es el 17 de noviembre de 1995.
- La hora de captura es a las 18:19 horas de la tarde.
- Las coordenadas geográficas, en latitud y longitud respectivamente, son las siguientes:

	Latitud	Longitud
Centro de la imagen	-52.677044	-68.081804
Esquina superior izquierda	-48.101132	-77.267844
Esquina inferior izquierda	-57.878451	-76.7131
Esquina superior derecha	-47.408119	-65.774599
Esquina inferior derecha	-57.210602	-62.221787

Tabla 6.3.- Coordenadas geográficas del bloque SE3BHI19.1B2.

Y para calcular la cobertura de hielo se usará el bloque NA3AU83B.1B1, cuya información es la siguiente:

- Imagen tomada por el satélite NOAA-10, en órbita de norte a sur.
- El tamaño de la imagen es de 512 columnas por 512 filas.
- La fecha de captura es el 21 de octubre de 1995.
- La hora de captura es a las 8:33 horas de la mañana.
- Las coordenadas geográficas, en latitud y longitud respectivamente, son las siguientes:

	Latitud	Longitud
<b>Centro de la imagen</b>	-63.759384	-59.819069
<b>Esquina superior izquierda</b>	-66.709887	-53.309783
<b>Esquina inferior izquierda</b>	-61.736340	-51.947065
<b>Esquina superior derecha</b>	-65.726905	-65.809836
<b>Esquina inferior derecha</b>	-60.878724	-62.479148

Tabla 6.4.- Coordenadas geográficas del bloque NA3AU836.1B1.

Estas imágenes NOAA-AVHRR fueron tomadas desde la base de datos histórica, que el grupo de ozono perteneciente a nuestra universidad mantiene grabadas, y fueron gentilmente entregadas con el propósito de desarrollo de estos ejemplos.

El bloque SE3BHI19.1B3 fue cargado con el programa MAGMASAT\_NOAA, cuyos cinco canales son los mostrados en las Figuras 6.1 a la 6.5. Aquí se puede observar el sector sur de América del Sur, cuya parte inferior y superior presenta presencia de nubes, además de otros sectores no muy claramente identificables para personas que no tienen experiencia en el tema. Claramente es posible observar al Estrecho de Magallanes, con la Península de Brunswick y Tierra del Fuego, y Bahía Grande por el sector del Océano Atlántico (ver la Figura 6.5).

Luego de calibrar los datos de la imagen, se siguió con el proceso de eliminación de nubes. En la primera etapa se procedió a eliminar todas las nubes altas, cuyas temperaturas variaban desde los 0°C a los -15°C, para lo cual se fijó como temperatura límite mínima 0.00425°C (ver Figuras 6.6 a la 6.10). La segunda y terceras etapas no se aplicaron por no ser necesarias (se probó aplicarlas pero no eliminaban ningún tipo de nubes); posteriormente se aplicó la cuarta etapa, comprobándose que los datos del lado izquierdo de la imagen correspondían a información obtenida con ángulos satelitales cenitales mayores a 55° (ver Figuras 6.11 a la 6.15); se siguió con la quinta etapa la cual fue aplicada para eliminar todos los píxeles correspondientes a agua dulce y/o salada con el objetivo de determinar posteriormente los índices vegetacionales (NDVI y GEMI; ver las Figuras 6.16 a la 6.20); se debe aclarar que el proceso de eliminación de nubes se aplicó en dos oportunidades, puesto que se necesitaba obtener también una imagen sin presencia de tierra firme, con el objeto de determinar las temperaturas superficiales del mar (SST;

	Latitud	Longitud
Centro de la imagen	-63.759384	-59.819069
Esquina superior izquierda	-66.709887	-53.309783
Esquina inferior izquierda	-61.736340	-51.947065
Esquina superior derecha	-65.726905	-65.809836
Esquina inferior derecha	-60.878724	-62.479148

Tabla 6.4.- Coordenadas geográficas del bloque NA3AU836.1B1.

Estas imágenes NOAA-AVHRR fueron tomadas desde la base de datos histórica, que el grupo de ozono perteneciente a nuestra universidad mantiene grabadas, y fueron gentilmente entregadas con el propósito de desarrollo de estos ejemplos.

El bloque SE3BHI19.1B3 fue cargado con el programa MAGMASAT\_NOAA, cuyos cinco canales son los mostrados en las Figuras 6.1 a la 6.5. Aquí se puede observar el sector sur de América del Sur, cuya parte inferior y superior presenta presencia de nubes, además de otros sectores no muy claramente identificables para personas que no tienen experiencia en el tema. Claramente es posible observar al Estrecho de Magallanes, con la Península de Brunswick y Tierra del Fuego, y Bahía Grande por el sector del Océano Atlántico (ver la Figura 6.5).

Luego de calibrar los datos de la imagen, se siguió con el proceso de eliminación de nubes. En la primera etapa se procedió a eliminar todas las nubes altas, cuyas temperaturas variaban desde los 0°C a los -15°C, para lo cual se fijó como temperatura límite mínima 0.00425°C (ver Figuras 6.6 a la 6.10). La segunda y terceras etapas no se aplicaron por no ser necesarias (se probó aplicarlas pero no eliminaban ningún tipo de nubes); posteriormente se aplicó la cuarta etapa, comprobándose que los datos del lado izquierdo de la imagen correspondían a información obtenida con ángulos satelitales cenitales mayores a 55° (ver Figuras 6.11 a la 6.15); se siguió con la quinta etapa la cual fue aplicada para eliminar todos los píxeles correspondientes a agua dulce y/o salada con el objetivo de determinar posteriormente los índices vegetacionales (NDVI y GEMI; ver las Figuras 6.16 a la 6.20); se debe aclarar que el proceso de eliminación de nubes se aplicó en dos oportunidades, puesto que se necesitaba obtener también una imagen sin presencia de tierra firme, con el objeto de determinar las temperaturas superficiales del mar (SST;

ver las Figura 6.21 a la 6.25); es así como en la segunda oportunidad no se aplicó la quinta etapa, pero si la sexta, la cual eliminó todos los píxeles correspondientes a tierra firme. Finalmente se aplicó la séptima etapa que eliminó muy pocos píxeles contaminados por nubes. Las dos últimas etapas no se aplicaron debido a que funcionan sólo sobre imágenes nocturnas, lo cual no es el caso de este ejemplo.

De esta imagen limpia de nubes y otro tipo de píxeles contaminados, se procedió a determinar las temperaturas superficiales del mar, las que se muestran en la Figura 6.31. Las temperaturas obtenidas son desde los 7°C a los 14°C, las cuales fueron graficadas cada 0.5°C, con una escala de colores muy contrastada, de forma de poder apreciar fácilmente el resultado. Es así como las temperaturas más altas corresponden a las obtenidas hacia el norte de América del Sur, en Bahía Grande y sus alrededores, y a mar abierto (temperaturas entre los 10°C y 13.5°C). En cambio en el Estrecho de Magallanes estas son de alrededor de entre 8.5°C y 11.5°C, siendo coherentes con las temperaturas reales para esa estación del año (la imagen corresponde a primavera, y fue tomada a alrededor de las seis de la tarde, horario en que el mar ya se ha calentado producto de las radiaciones solares de todo el día). En el mar abierto las temperaturas son más homogéneas debido a la extensión de las aguas y a las corrientes marinas que fluyen sobre la superficie; en cambio en el Estrecho de Magallanes se puede observar una mayor diversidad de temperaturas en pequeñas áreas, debido a la poca profundidad de sus aguas y corrientes marinas existentes, y a la influencia de las actividades humanas (tuberías de desagües que dan a sus aguas).

Con la misma imagen se procedió a determinar índices vegetacionales, mostrándose en las figuras 6.32 y 6.33 el Índice Vegetacional Normalizado Diferencial (NDVI) y el Índice de Monitoreo Ambiental Global (GEMI) respectivamente. El NDVI normaliza los valores de los píxeles entre -1 y 1, detectando tanto tierra árida sin vegetación verde, como también tierra vegetada; por ésto se representa la tierra infértil con color café (índice entre -1 y 0), y la tierra vegetada con una escala de colores graduada cada 0.1 (para índices entre 0 y 1). Mientras más cercano a 1 sea el índice, significa que existe más presencia de cobertura vegetal verde; por el

contrario, mientras más se acerque el índice a 0 estaremos en presencia de muy poca vegetación. Se puede observar que existe coherencia en la imagen obtenida, ya que aquí se representa una mayor densidad de vegetación verde en la Península de Brunswick, en las tierras del lado chileno más cercanas al océano Pacífico, y al sur de Tierra del Fuego; en cambio existe más aridez en la zona norte de Tierra del Fuego, y de la Primera Angostura hacia el norte por tierras Argentinas, donde se encuentran las llamadas “pampas Argentinas”, cubiertas a lo sumo de pasto coirón.

En la Figura 6.33 se observa el GEMI obtenido para esta imagen, la cual se confeccionó sobre la base de las mismas tonalidades usadas para el NDVI, sólo que por el hecho de que este índice sólo detecta tierra con vegetación verde, la escala de colores se expandió para todos los datos presentes. Al realizar una comparación de ambas, se observa que en el GEMI no se muestra la tierra árida en la zona superior de la imagen, correspondientes a las “pampas Argentinas”; pero lo más importante es que si se observa con detención el GEMI ayuda a eliminar nubes que no son identificadas en el proceso de eliminación de nubes del programa MAGMASAT\_NOAA, como se ve en la Figura 6.34.



Figura 6.1.- Canal 1 (visible) de la imagen NOAA-AVHRR SE3BHI19.1B2. Aquí se puede apreciar la imagen tal cual la entrega el sistema LARST del grupo de ozono de la UMAG.



Figura 6.2.- Canal 2 (infrarrojo cercano) de la imagen NOAA-AVHRR SE3BHI19.1B2.



Figura 6.3.- Canal 3 (infrarrojo termal) de la imagen NOAA-AVHRR SE3BHI19.1B2.



Figura 6.4.- Canal 4 (infrarrojo lejano) de la imagen NOAA-AVHRR SE3BHI19.1B2.



Figura 6.5.- Canal 5 (infrarrojo lejano) de la imagen NOAA-AVHRR SE3BHI19.1B2. Utilizando el programa AUTOCAD R14 se procedió a identificar algunas zonas de la imagen para una mejor interpretación. En general es en este canal donde se aprecia mejor la presencia de nubes.



Figura 6.5.- Canal 5 (infrarrojo lejano) de la imagen NOAA-AVHRR SE3BHI19.1B2. Utilizando el programa AUTOCAD R14 se procedió a identificar algunas zonas de la imagen para una mejor interpretación. En general es en este canal donde se aprecia mejor la presencia de nubes.



Figura 6.6.- Canal 1 (visible) después de la aplicación de la primera etapa de eliminación de nubes. Los píxeles contaminados y eliminados de la imagen son marcados, de forma de saber su condición para futuros procesamientos; ellos son mostrados en la imagen como de color blanco.



Figura 6.7.- Canal 2 (infrarrojo cercano) después de la aplicación de la primera etapa de eliminación de nubes.



Figura 6.8.- Canal 3 (infrarrojo termal) después de la aplicación de la primera etapa de eliminación de nubes.



Figura 6.9.- Canal 4 (infrarrojo lejano) después de la aplicación de la primera etapa de eliminación de nubes.

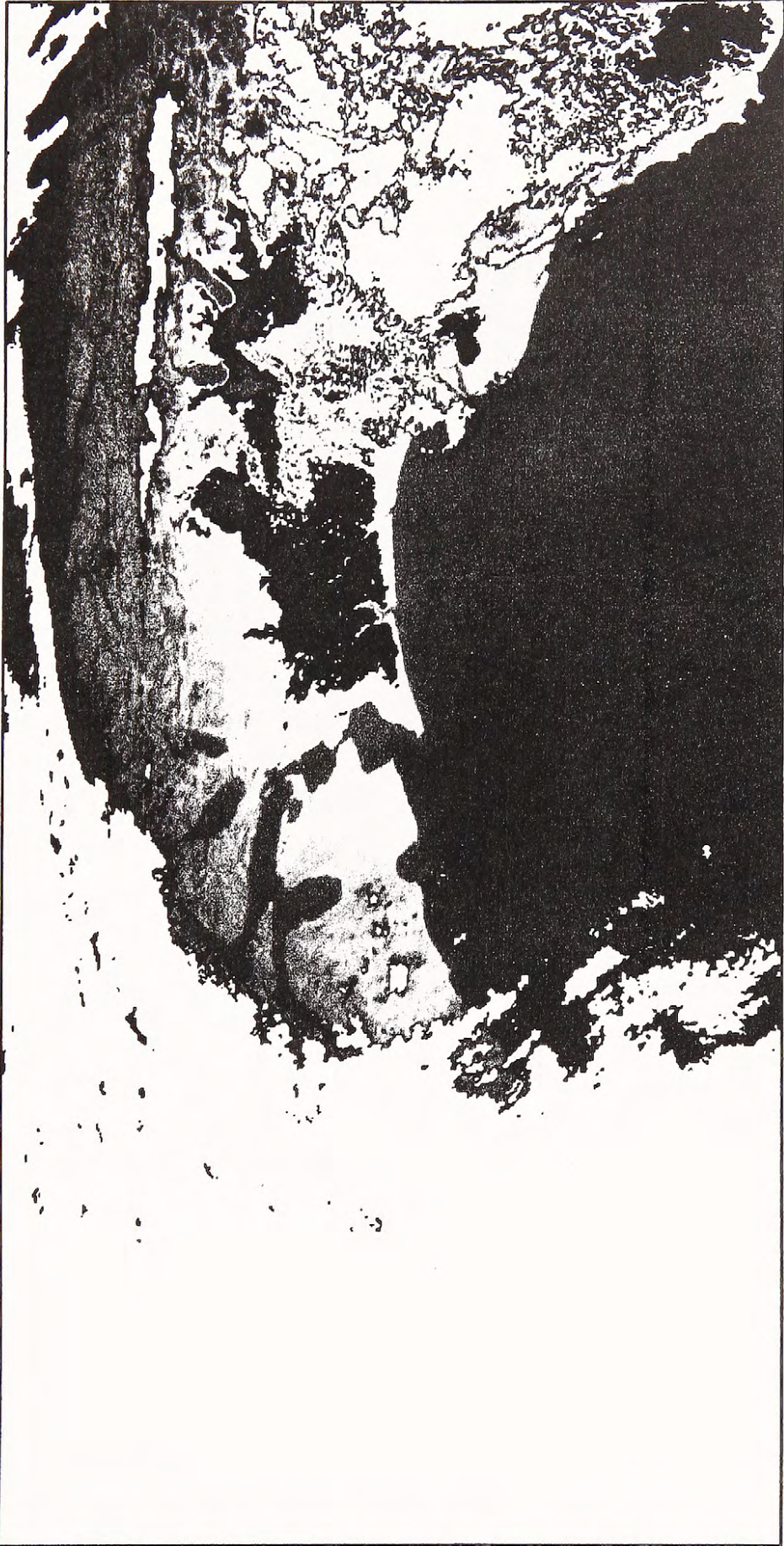


Figura 6.10.- Canal 5 (infrarrojo lejano) después de la aplicación de la primera etapa de eliminación de nubes.



Figura 6.11.- Canal 1 (visible) después de la aplicación de la cuarta etapa de eliminación de nubes. Realmente esta etapa verifica que el ángulo cenital satelital de cada píxel no sea mayor a  $55^\circ$ , debido a la distorsión excesiva de los datos para ángulos mayores.

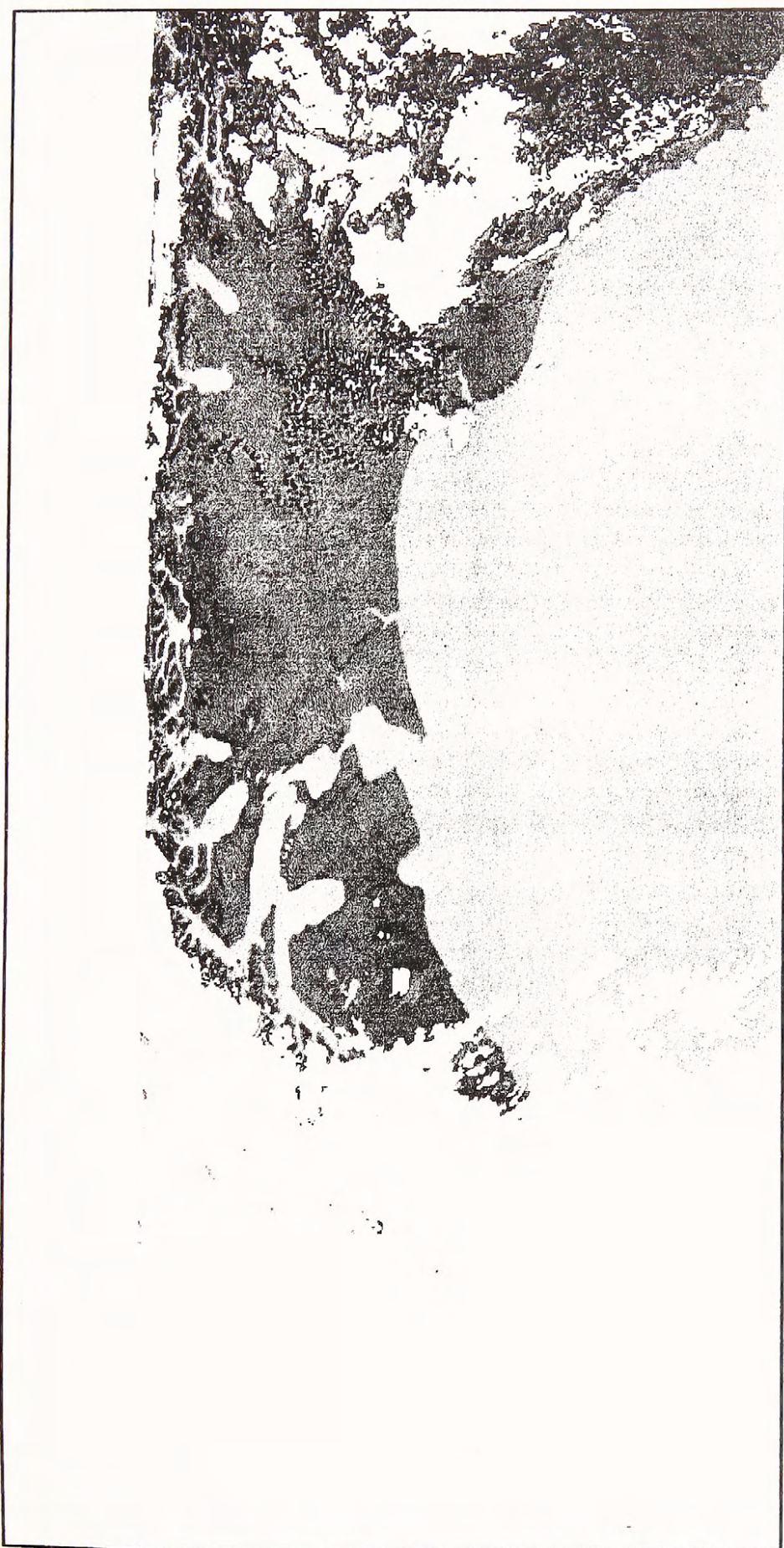


Figura 6.12.- Canal 2 (infrarrojo cercano) después de la aplicación de la cuarta etapa de eliminación de nubes.

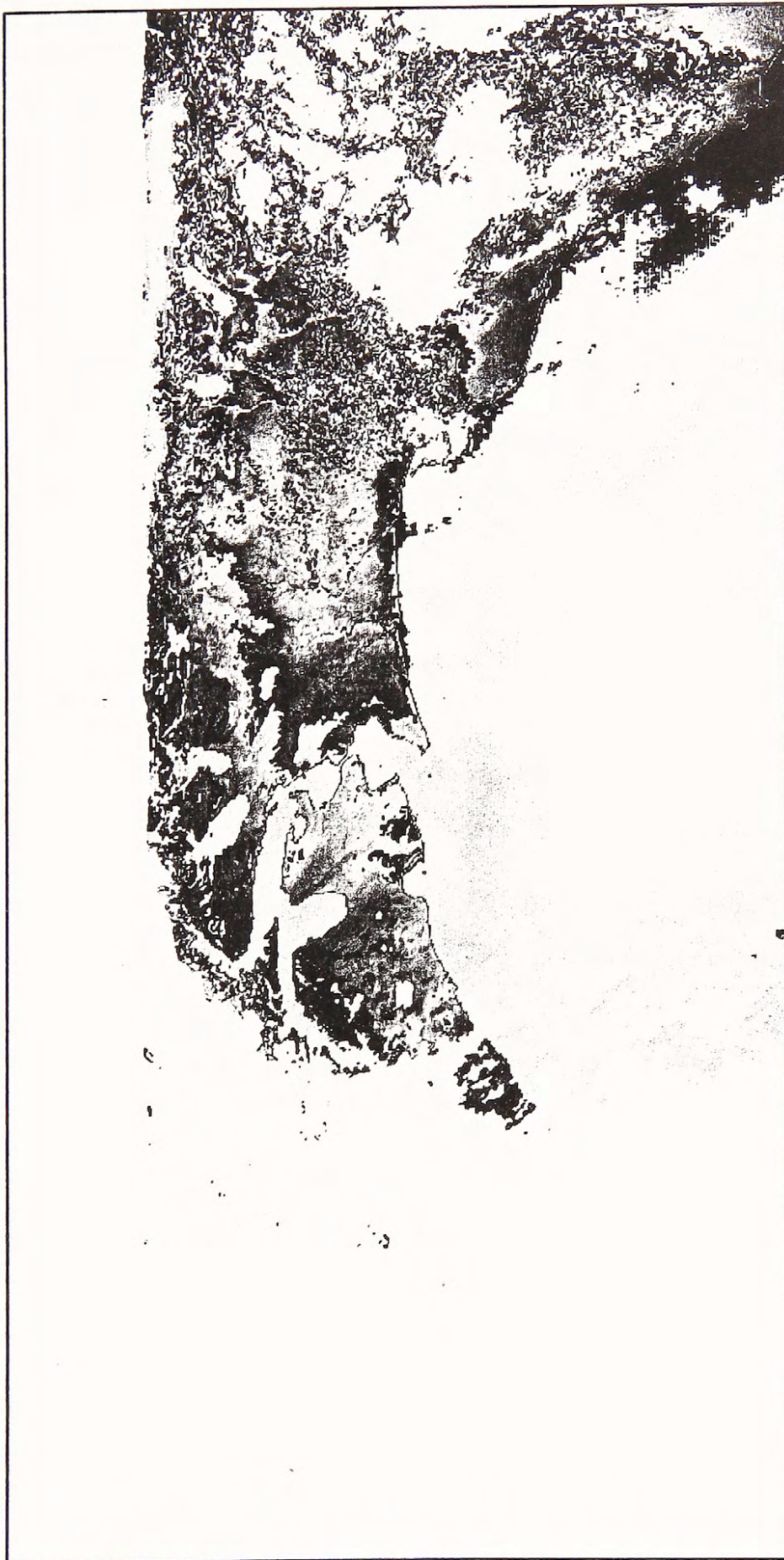


Figura 6.13.- Canal 3 (infrarrojo termal) después de la aplicación de la cuarta etapa de eliminación de nubes.



Figura 6.13.- Canal 3 (infrarrojo termal) después de la aplicación de la cuarta etapa de eliminación de nubes.

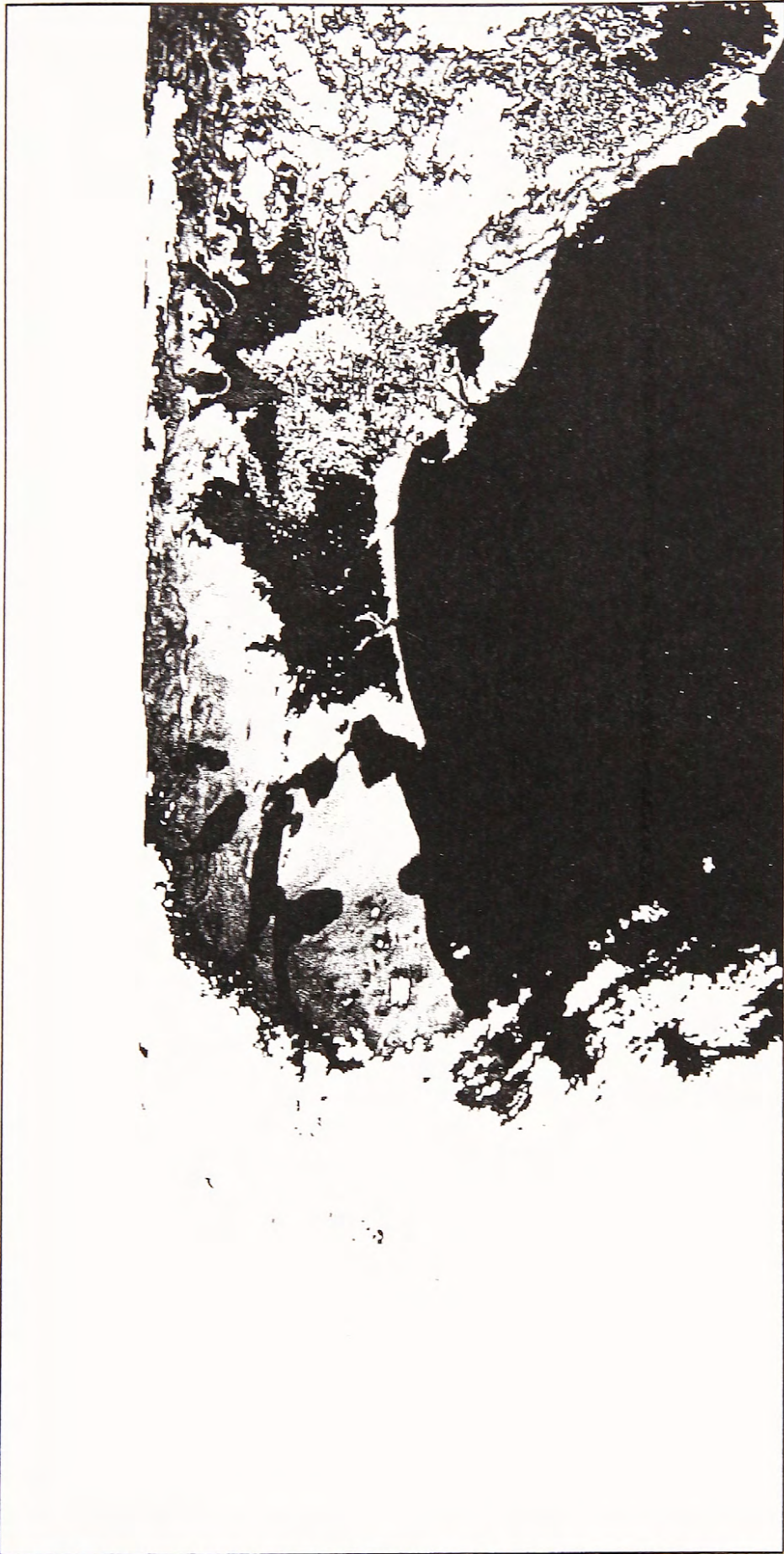


Figura 6.14.- Canal 4 (infrarrojo lejano) después de la aplicación de la cuarta etapa de eliminación de nubes.

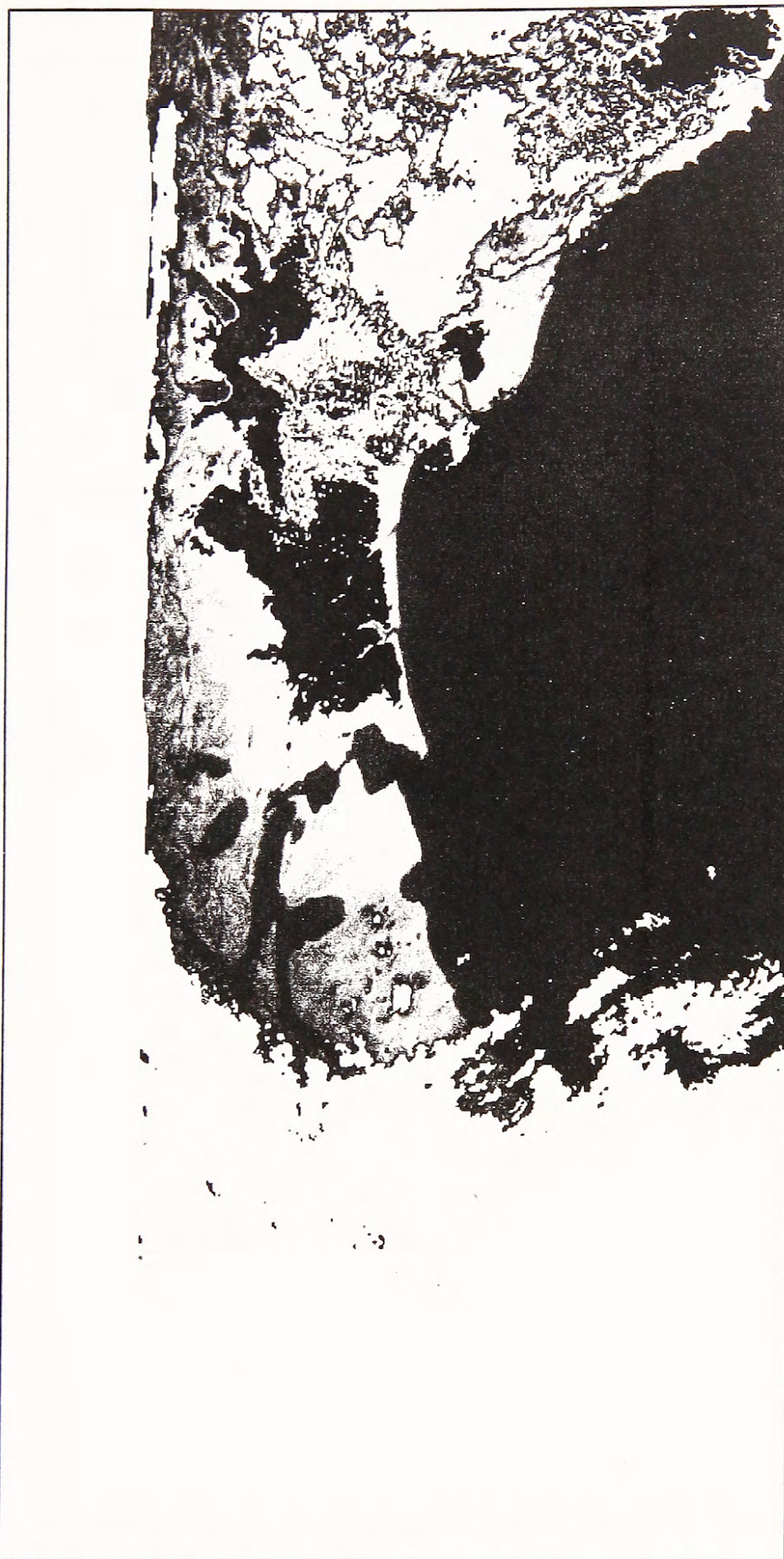


Figura 6.15.- Canal 5 (infrarrojo lejano) después de la aplicación de la cuarta etapa de eliminación de nubes.

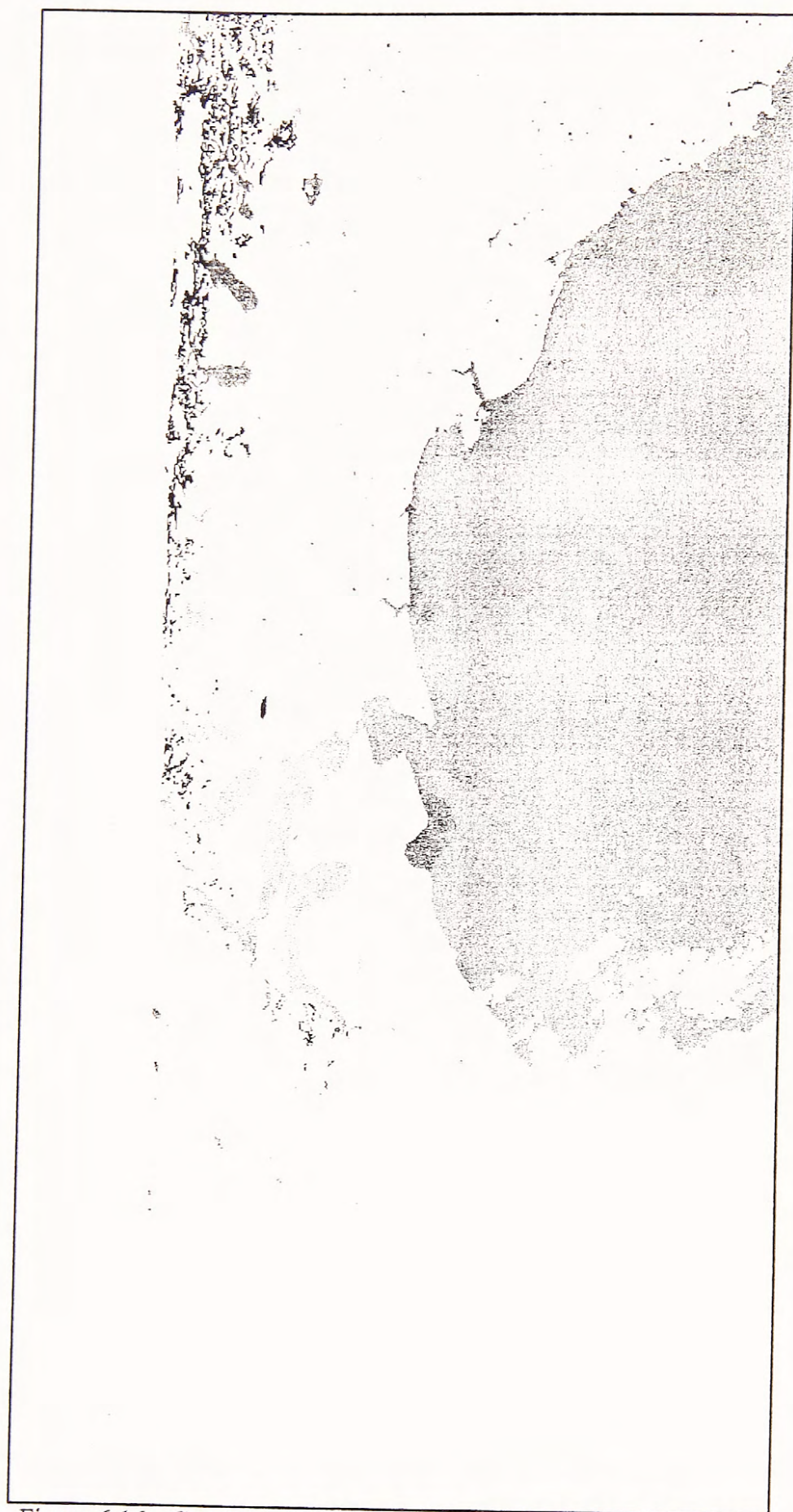


Figura 6.16.- Canal 1 (visible) después de la aplicación de la quinta etapa de eliminación de nubes. Aquí se eliminó toda la tierra firme, con el objeto de posteriormente obtener temperaturas superficiales del mar.

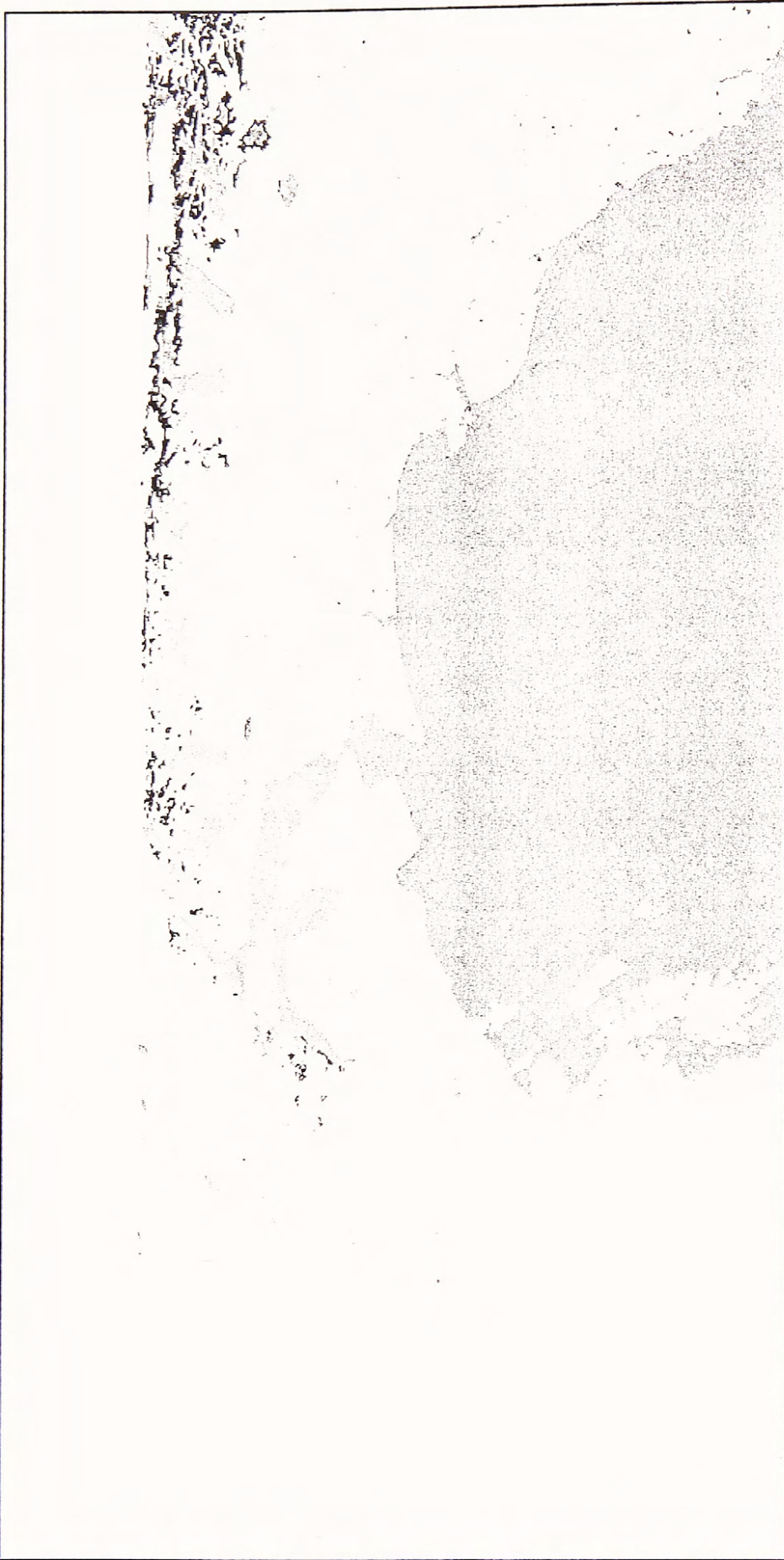


Figura 6.17.- Canal 2 (infrarrojo cercano) después de la aplicación de la quinta etapa de eliminación de nubes.

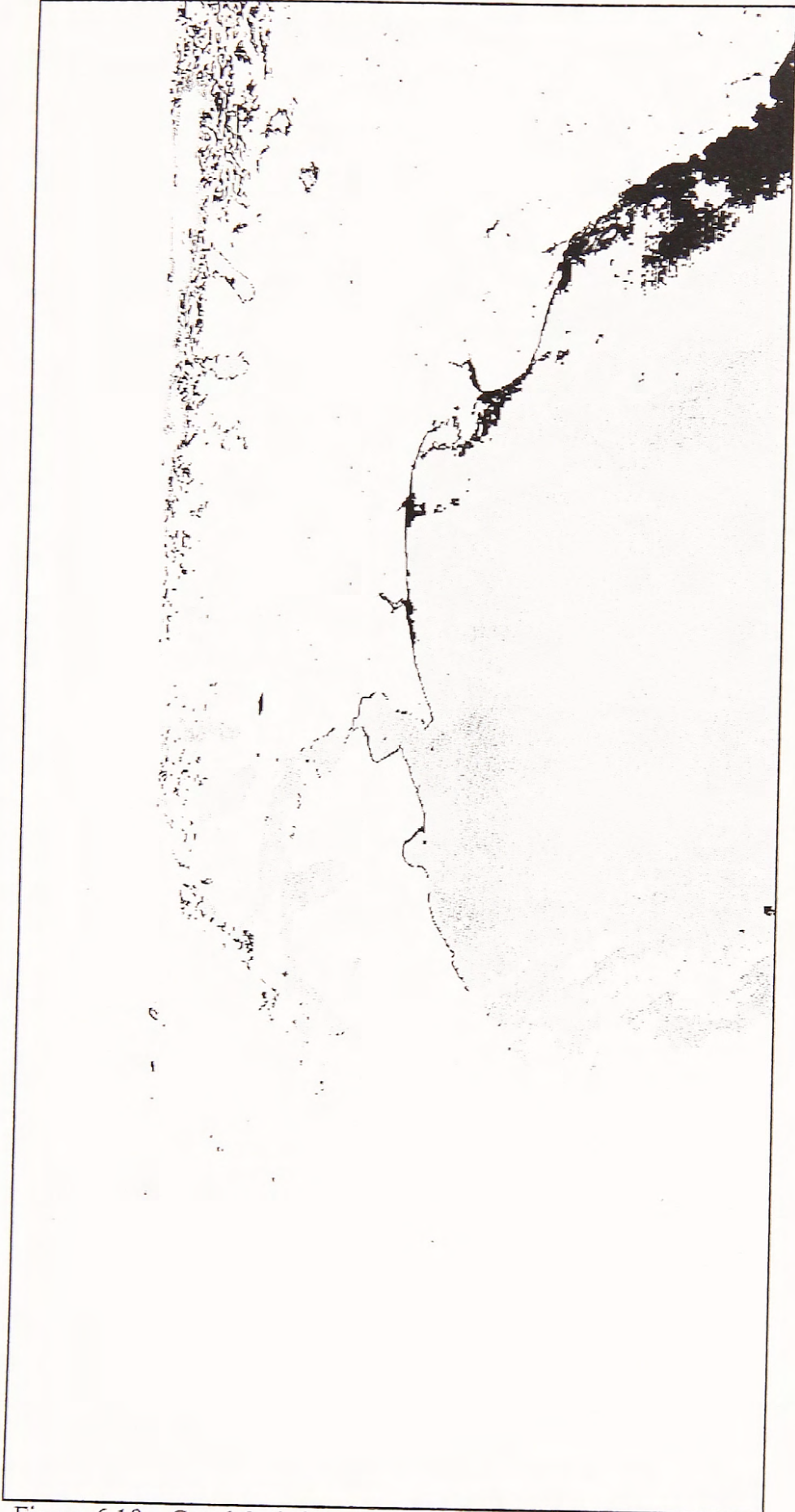


Figura 6.18.- Canal 3 (infrarrojo termal) después de la aplicación de la quinta etapa de eliminación de nubes.

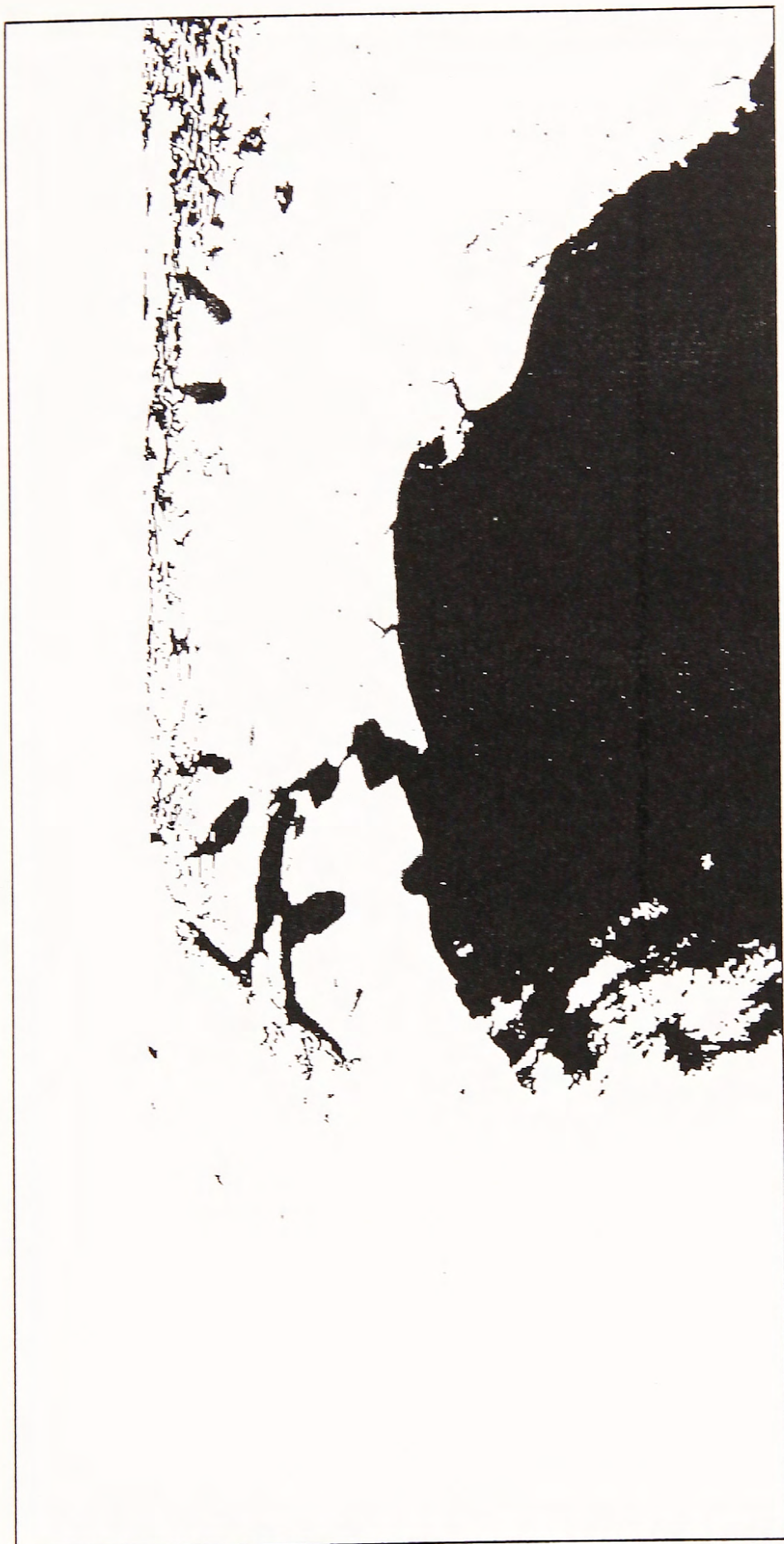


Figura 6.19.- Canal 4 (infrarrojo lejano) después de la aplicación de la quinta etapa de eliminación de nubes.

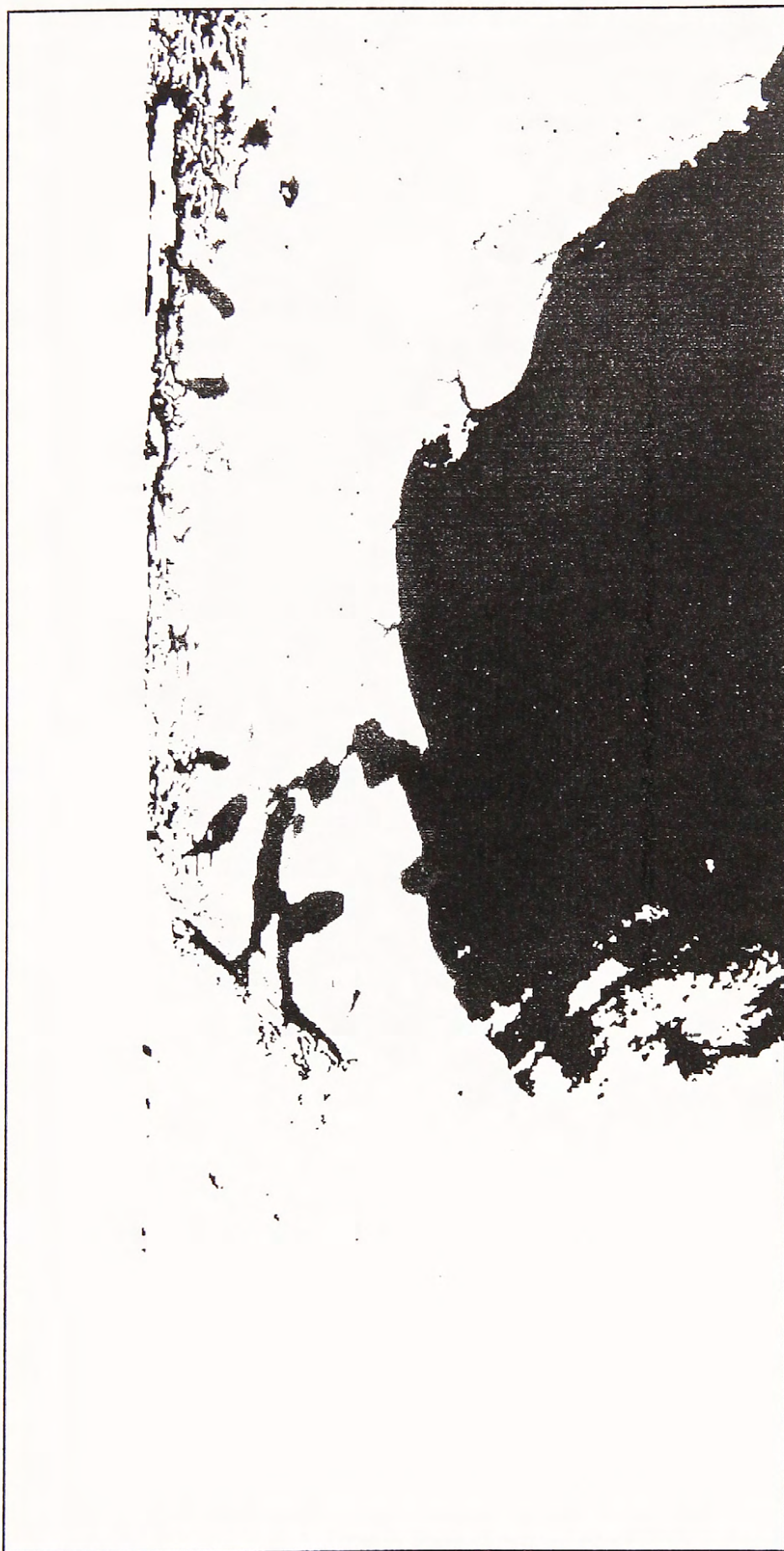


Figura 6.20.- Canal 5 (infrarrojo lejano) después de la aplicación de la quinta etapa de eliminación de nubes.



Figura 6.21.- Canal 1 (visible) después de la aplicación de la sexta etapa de eliminación de nubes. Debido a que se desea determinar los índices vegetacionales de esta imagen, se debió aplicar por segunda vez el proceso de eliminación de nubes, solo que en esta oportunidad se aplicó la sexta etapa en vez de la quinta.



Figura 6.22.- Canal 2 (infrarrojo cercano) después de la aplicación de la sexta etapa de eliminación de nubes.



Figura 6.23.- Canal 3 (infrarrojo termal) después de la aplicación de la sexta etapa de eliminación de nubes.



Figura 6.24.- Canal 4 (infrarrojo lejano) después de la aplicación de la sexta etapa de eliminación de nubes.



Figura 6.25.- Canal 5 (infrarrojo lejano) después de la aplicación de la sexta etapa de eliminación de nubes.

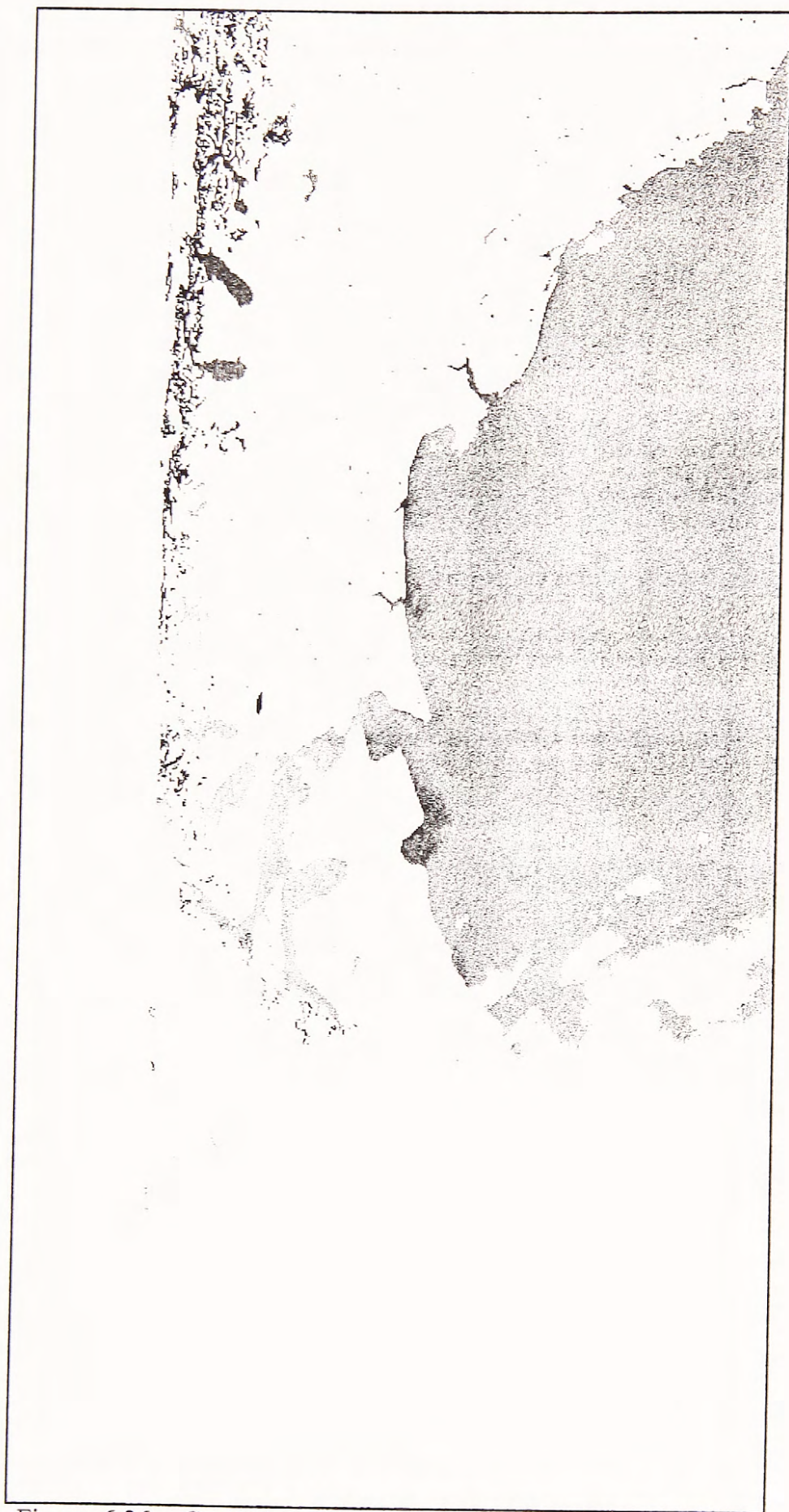


Figura 6.26.- Canal 1 (visible) después de la aplicación de la séptima etapa de eliminación de nubes. Aquí fue muy poco lo que aún se eliminó.

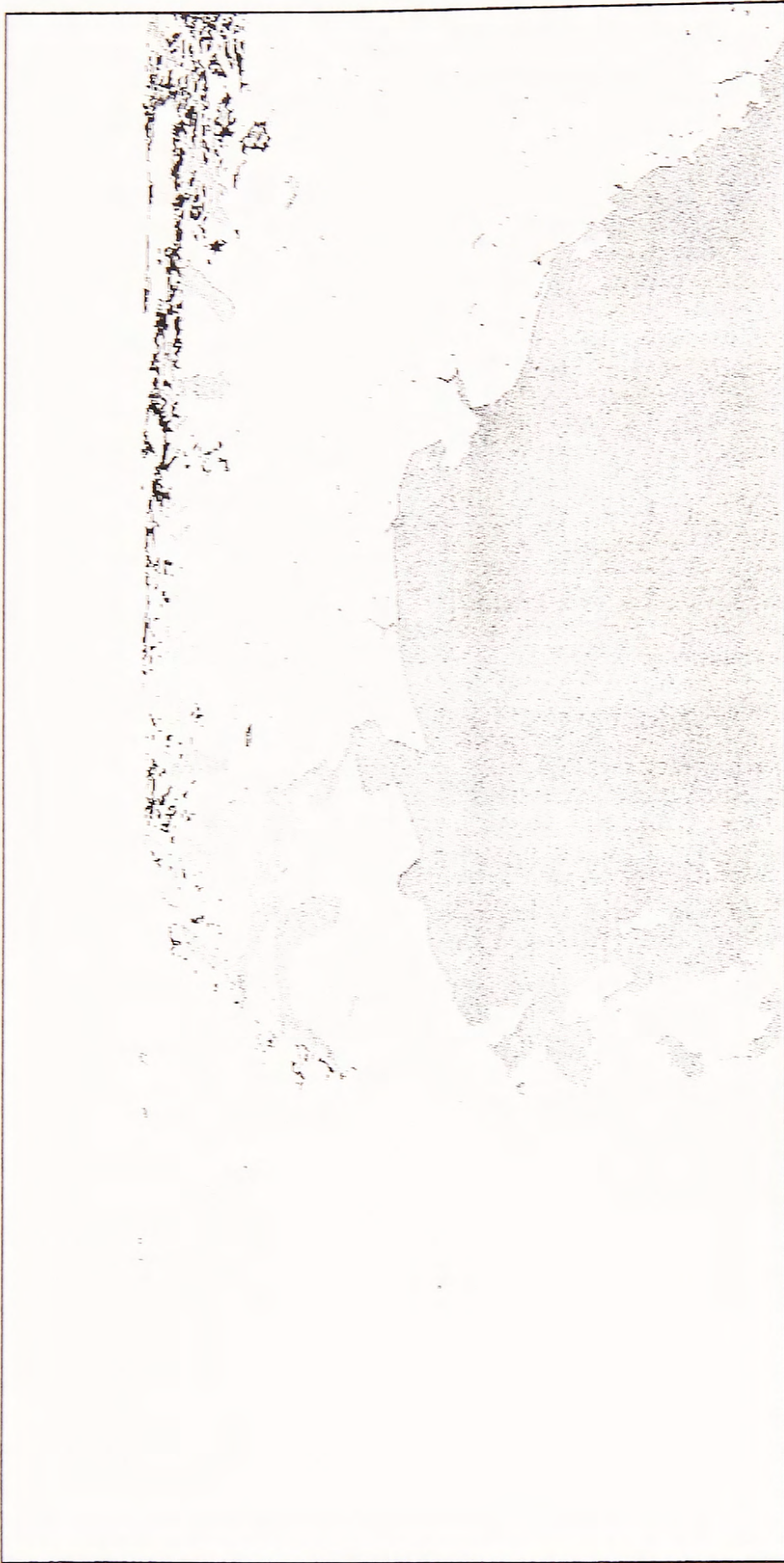


Figura 6.27.- Canal 2 (infrarrojo cercano) después de la aplicación de la séptima etapa de eliminación de nubes.

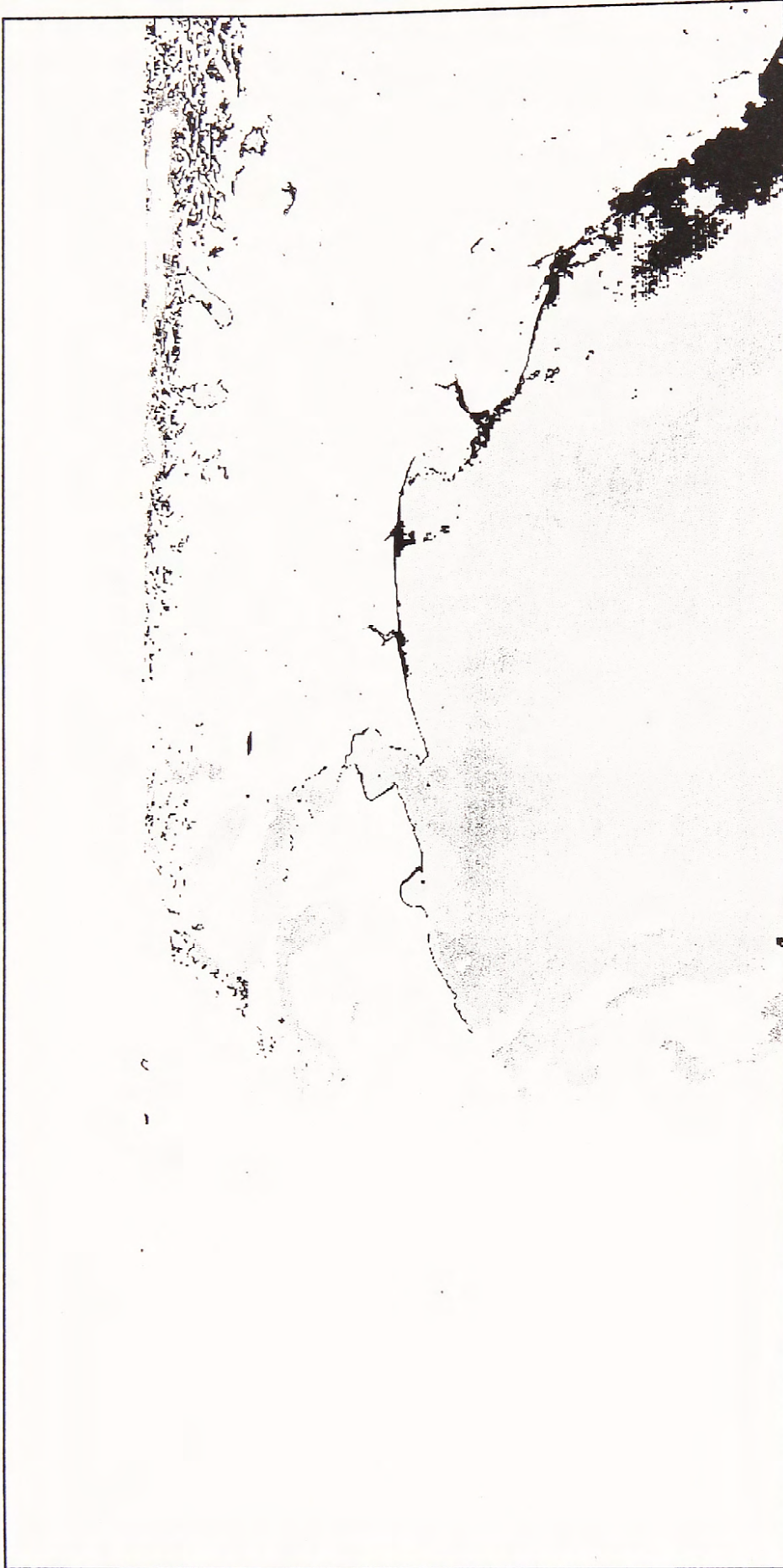


Figura 6.28.- Canal 3 (infrarrojo termal) después de la aplicación de la séptima etapa de eliminación de nubes.



Figura 6.29.- Canal 4 (infrarrojo lejano) después de la aplicación de la séptima etapa de eliminación de nubes.

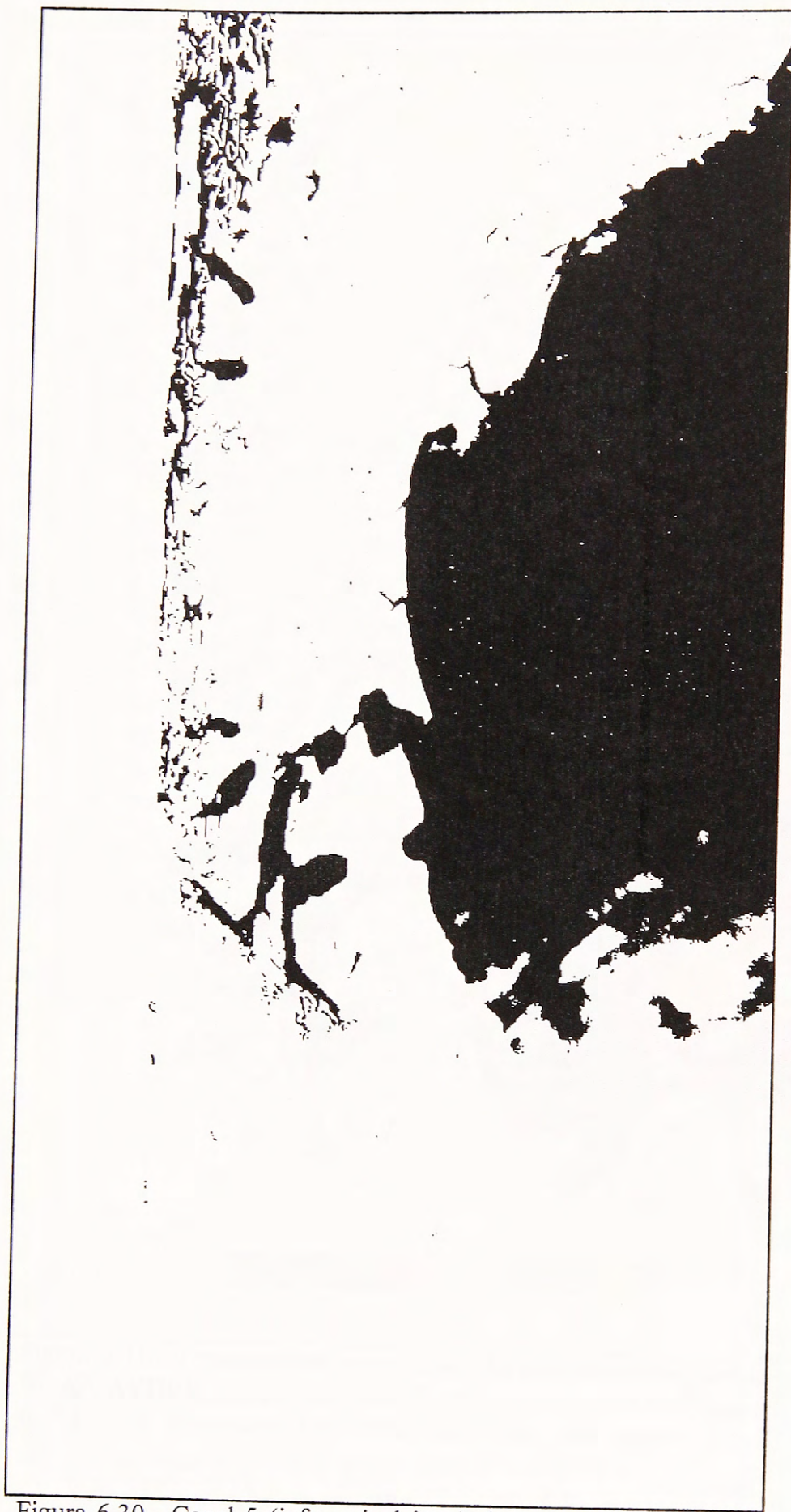


Figura 6.30.- Canal 5 (infrarrojo lejano) después de la aplicación de la séptima etapa de eliminación de nubes.

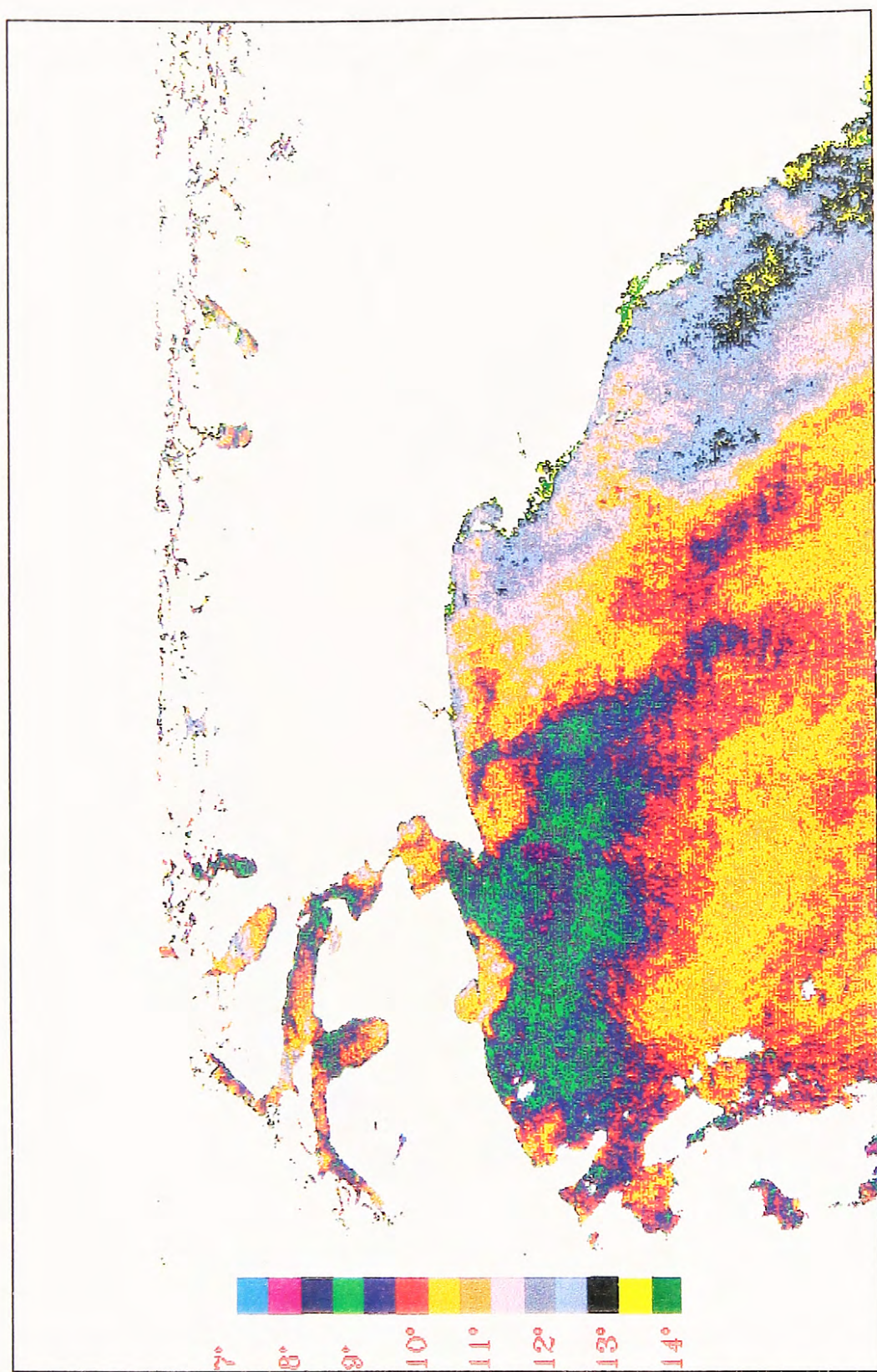


Figura 6.31.- Temperaturas superficiales del mar obtenidas para la imagen NOAA-AVHRR SE3BHI19.1B2. Se representaron las temperaturas cada 0.5° Celsius, eligiéndose los colores para tener gran contraste entre uno y otro.



Figura 6.32.- Índice vegetal normalizado (NDVI) obtenido para la imagen NOAA-AVHRR SE3BHI19.1B2. El color café corresponde a tierra árida, sin vegetación verde. Se eligieron los colores de forma que exista un gran contraste entre uno y otro, de forma de ser fácilmente identificables.

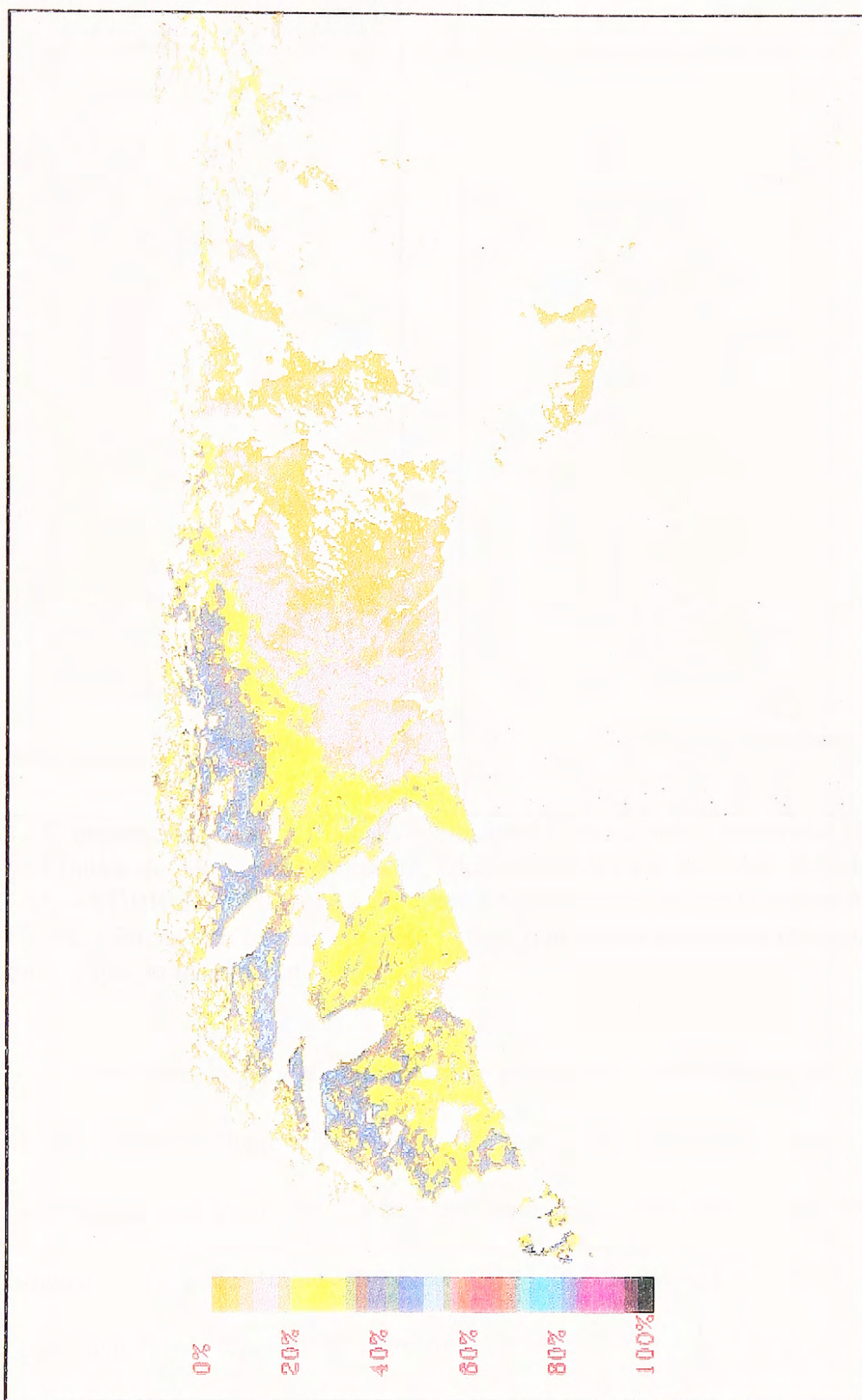


Figura 6.33.- Índice de Monitoreo Ambiental Global (GEMI) obtenido para la imagen NOAA-AVHRR SE3BHI19.1B2. La escala de colores es la misma utilizada para el NDVI (Figura 6.32), de forma de poder realizar una comparación. Como el GEMI sólo detecta tierra con vegetación verde, se eliminó el color café y se expandieron los colores a toda la escala.

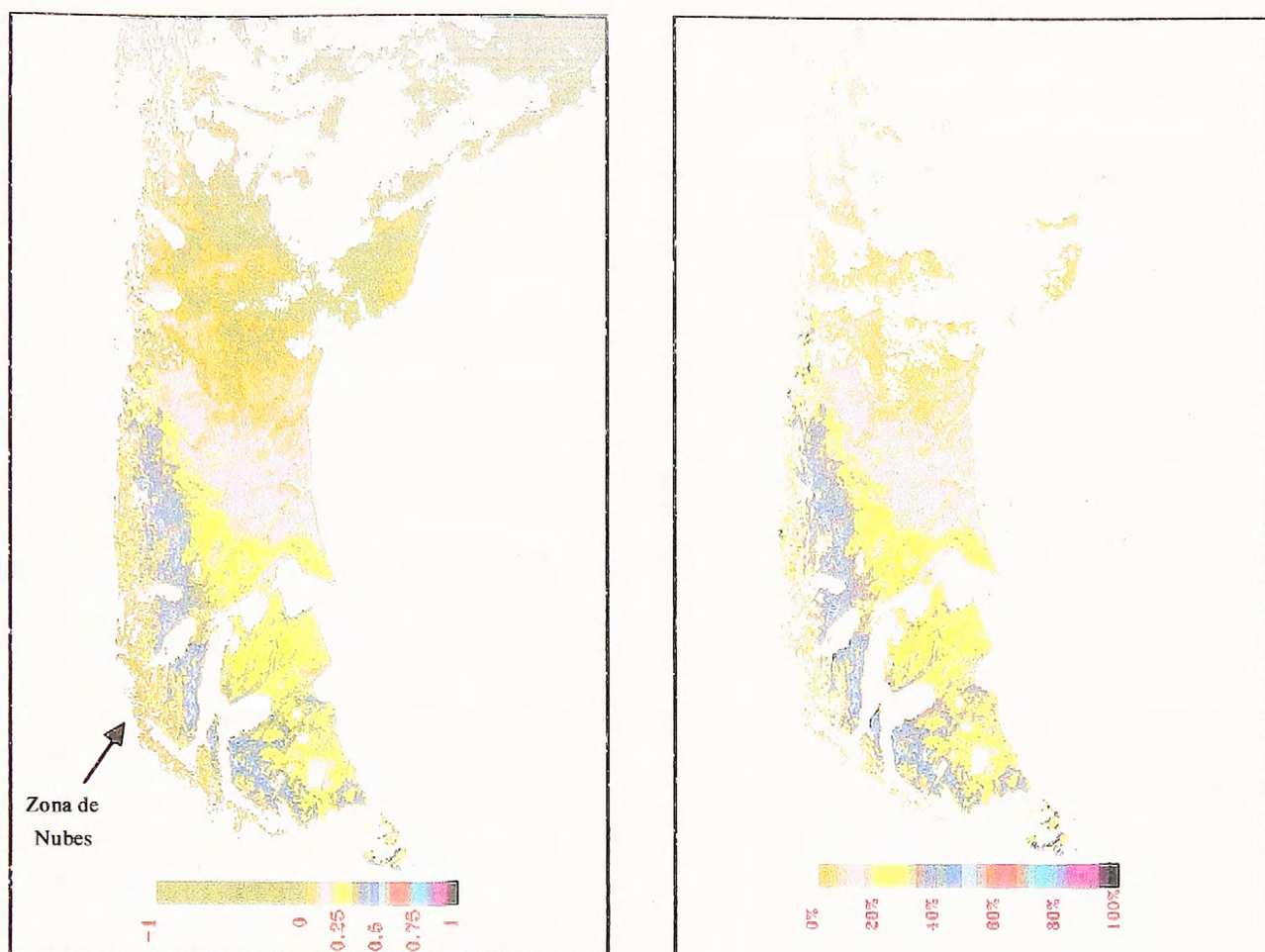


Figura 6.34.- Comparación entre el Índice Vegetacional Normalizado Diferencial (NDVI) a la izquierda, y el Índice de Monitoreo Ambiental Global (GEMI) a la derecha, obtenidos para la imagen NOAA-AVHRR SE3BHI19.1B2. El Gemi no muestra las zonas de tierras áridas como lo hace el NDVI, además que es más eficiente puesto que ayuda a eliminar regiones cubiertas de nubes como la que se muestra en la figura.

Como ejemplo para la determinación porcentual de hielo/nieve se utilizó la imagen NA3AU83B.1B1 correspondiente a la Tierra de O'Higgins en la Antártica, tomada en octubre del año 1995 (ver Figuras 6.35 a la 6.39). En este tipo de terrenos extremos es muy difícil determinar qué es hielo/nieve, mar o nubes (tanto altas como bajas), incluso para el proceso de eliminación de nubes, que poco ayudó a la limpieza de la imagen. Es así como se aplicó la primera etapa, ya que como los canales AVHRR 4 y 5 miden temperatura brillante, estos marcaban entre  $-43^{\circ}\text{C}$  y  $13^{\circ}\text{C}$  debido al efecto de reflejo del hielo/nieve; por ello tomamos como temperatura mínima  $-2^{\circ}\text{C}$  correspondientes al límite de temperatura inferior entre nubes altas y pixeles "despejados" (ver Figuras 6.40 a la 6.44). Luego de probar la efectividad de las demás etapas, se concluyó que la única que además servía es la siete, mostradas en las Figuras 6.45 a la 6.49. De esta imagen "limpia de nubes" (aunque no es de este modo) se procedió a determinar los porcentajes de

cobertura de hielo/nieve, obteniéndose la imagen 6.50. Aquí se puede observar la efectividad de este algoritmo para poder detectar y eliminar nubes sobre hielo/nieve, puesto que el resultado lo entrega en porcentajes, siendo todos los pixeles con valores sobre 100% los que están con algún grado de contaminación por estratos altos, medios o bajos; como aquí se graficó los valores entre 0% y 100%, los pixeles contaminados por estratos fueron eliminados. Aunque esta imagen no es interpretable por si sola, sino que hay que observarla con el conjunto de imágenes originales, se puede determinar que todos los pixeles con porcentajes entre un 40% a un 70% son clasificados como hielo continental y marino (icebergs), estos últimos fácilmente identificables por su forma semi redonda en la zona inferior derecha. Además se concluye que los valores bajo 40% pueden catalogarse como nieve (tanto fresca como vieja) y los pixeles marcados sobre el 70% pueden ser mar congelado o posiblemente nubes no eliminadas en el proceso de eliminación de nubes ni por este algoritmo.

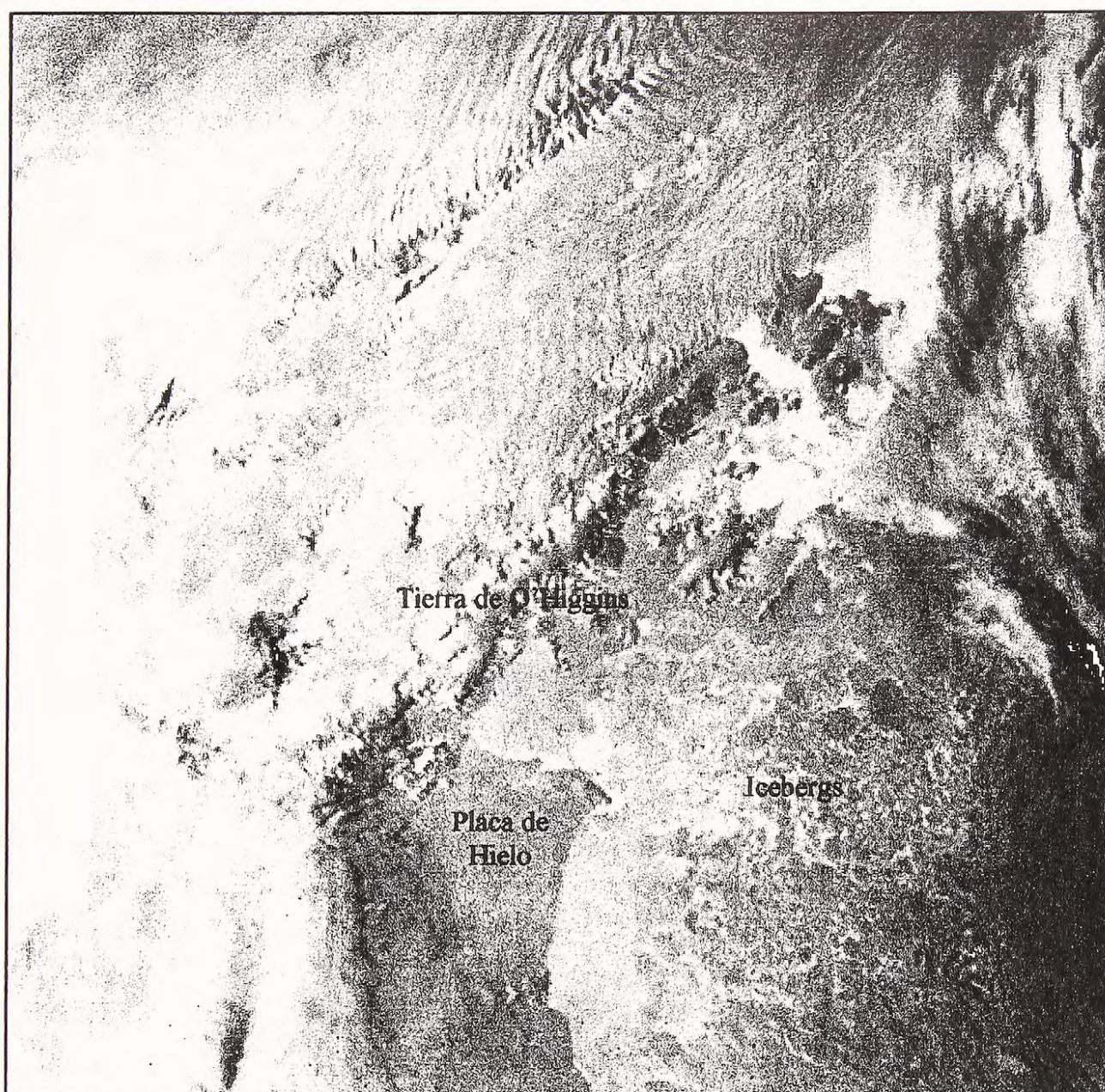


Figura 6.35.- Canal 1 (visible) de la imagen NOAA-AVHRR NA3AU83B.1B1. Aquí se puede apreciar la imagen tal cual la entrega el sistema LARST del grupo de ozono de la UMAG. En ella se puede observar la capa de hielo y icebergs presentes en el mar, además de la Tierra de O'Higgins, que en su mayor parte se confunden con nubes.

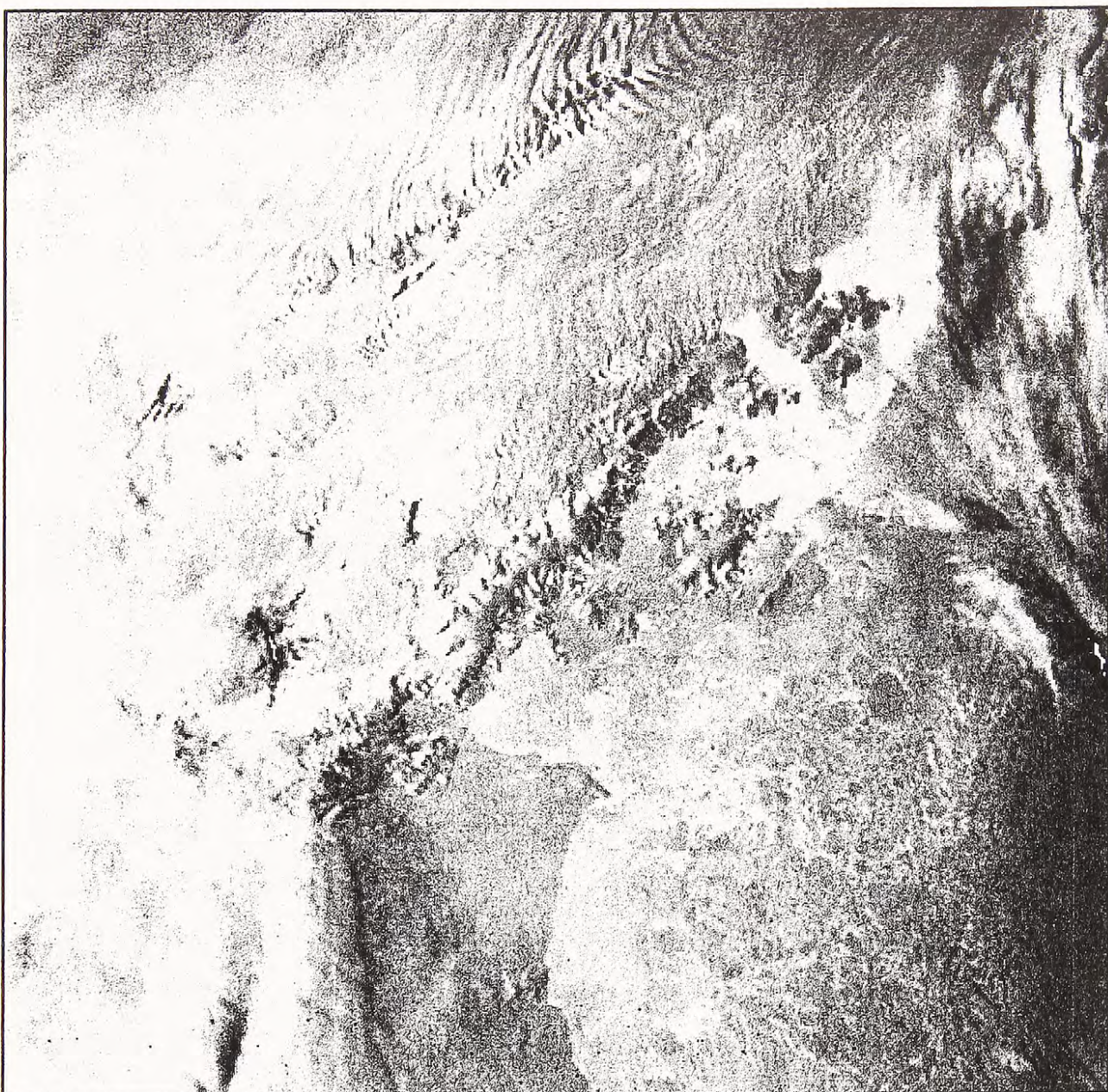


Figura 6.36.- Canal 2 (infrarrojo cercano) de la imagen NOAA-AVHRR NA3AU83B.1B1.

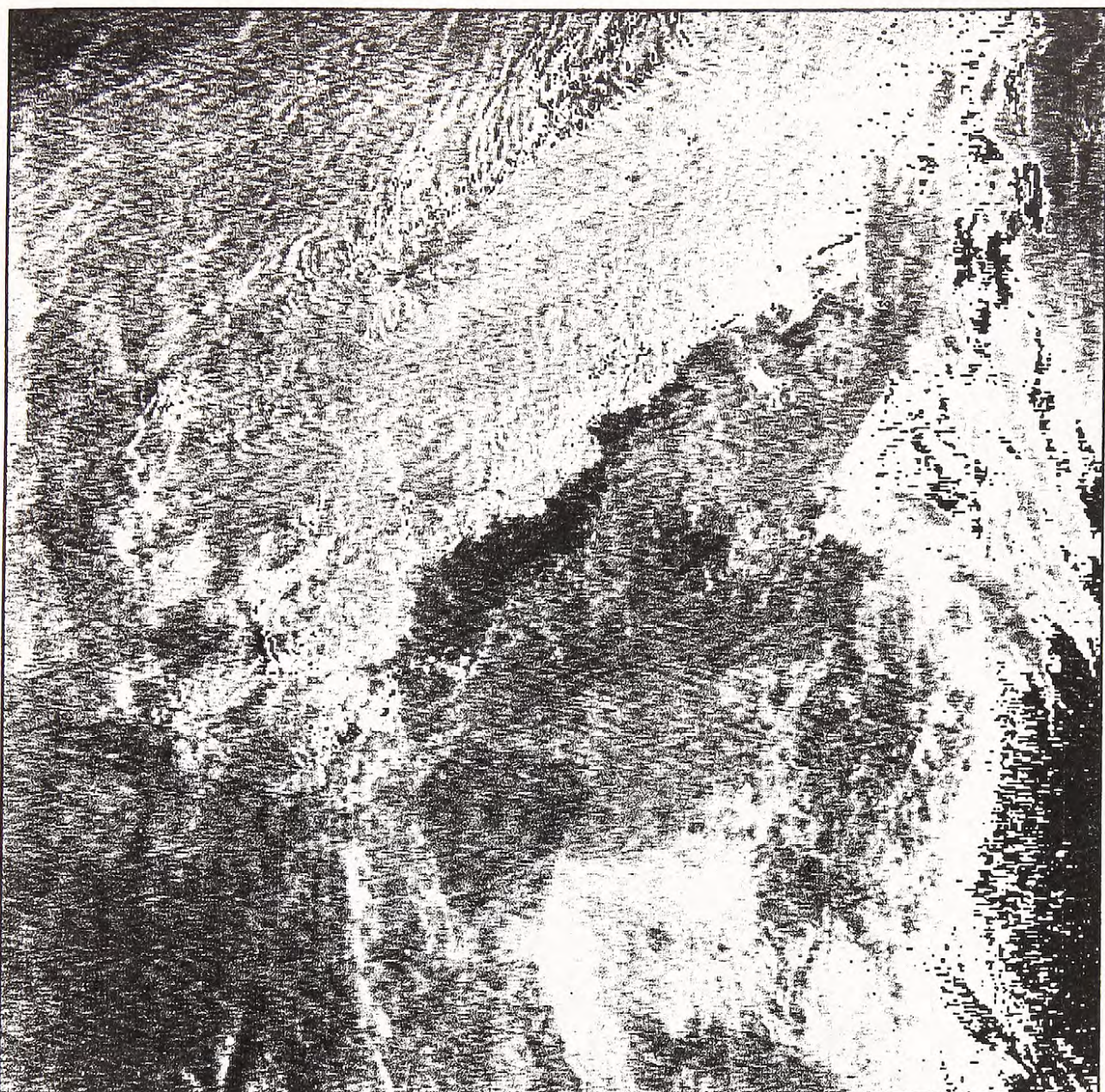


Figura 6.37.- Canal 3 (infrarrojo termal) de la imagen NOAA-AVHRR NA3AU83B.1B1.

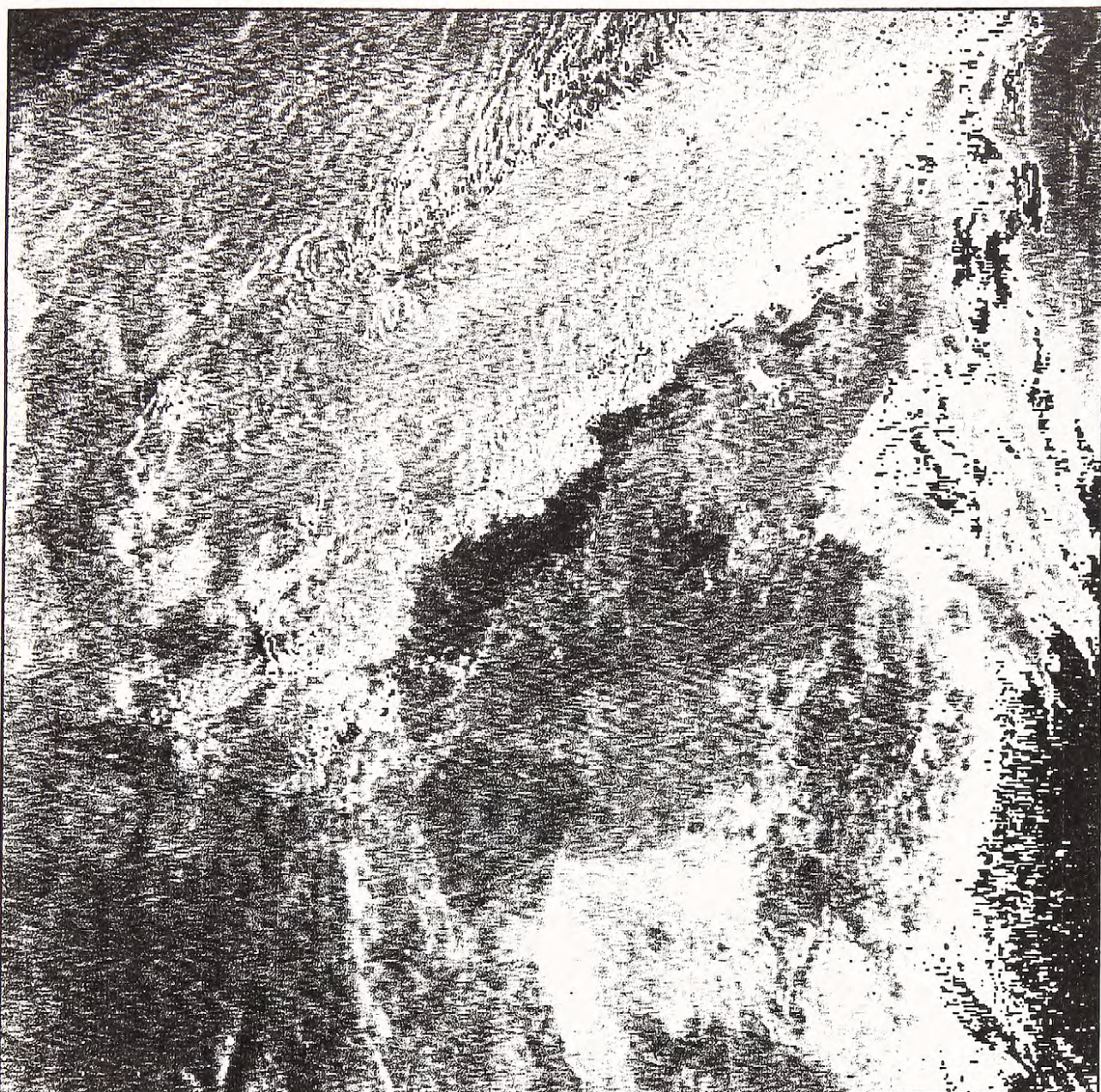


Figura 6.37.- Canal 3 (infrarrojo termal) de la imagen NOAA-AVHRR NA3AU83B.1B1.

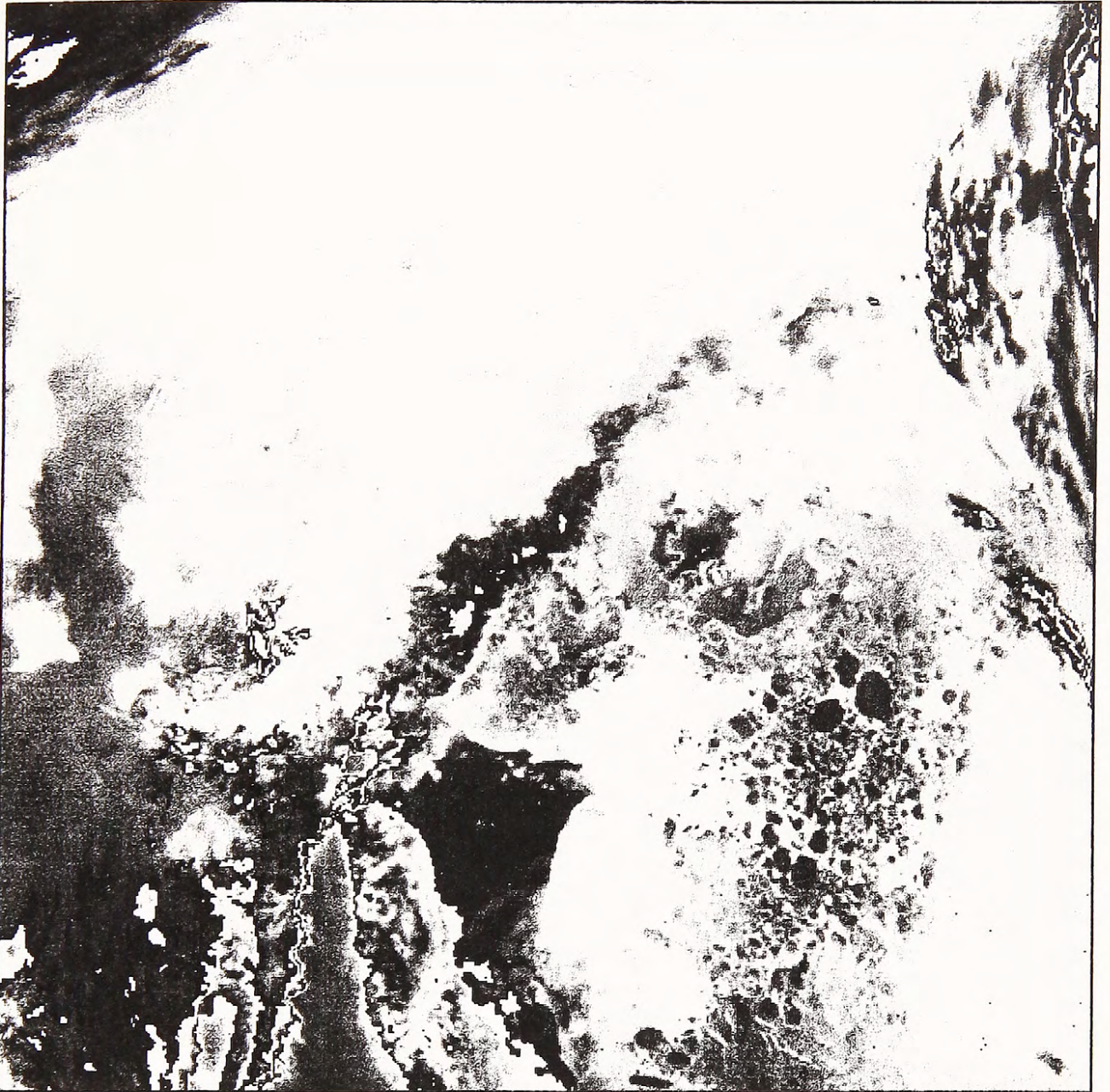


Figura 6.38.- Canal 4 (infrarrojo lejano) de la imagen NOAA-AVHRR NA3AU83B.1B1.

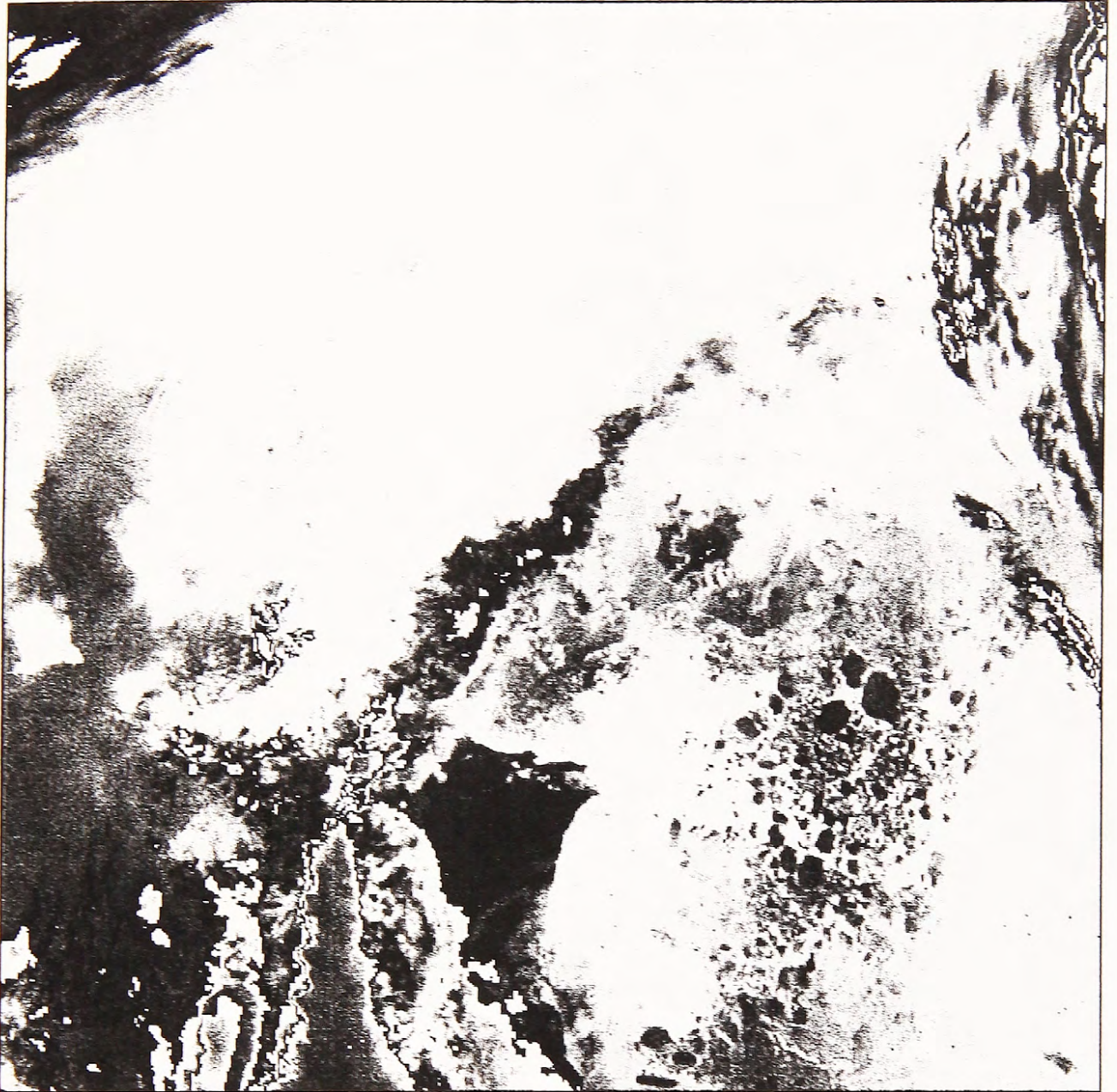


Figura 6.39.- Canal 5 (infrarrojo lejano) de la imagen NOAA-AVHRR NA3AU83B.1B1.

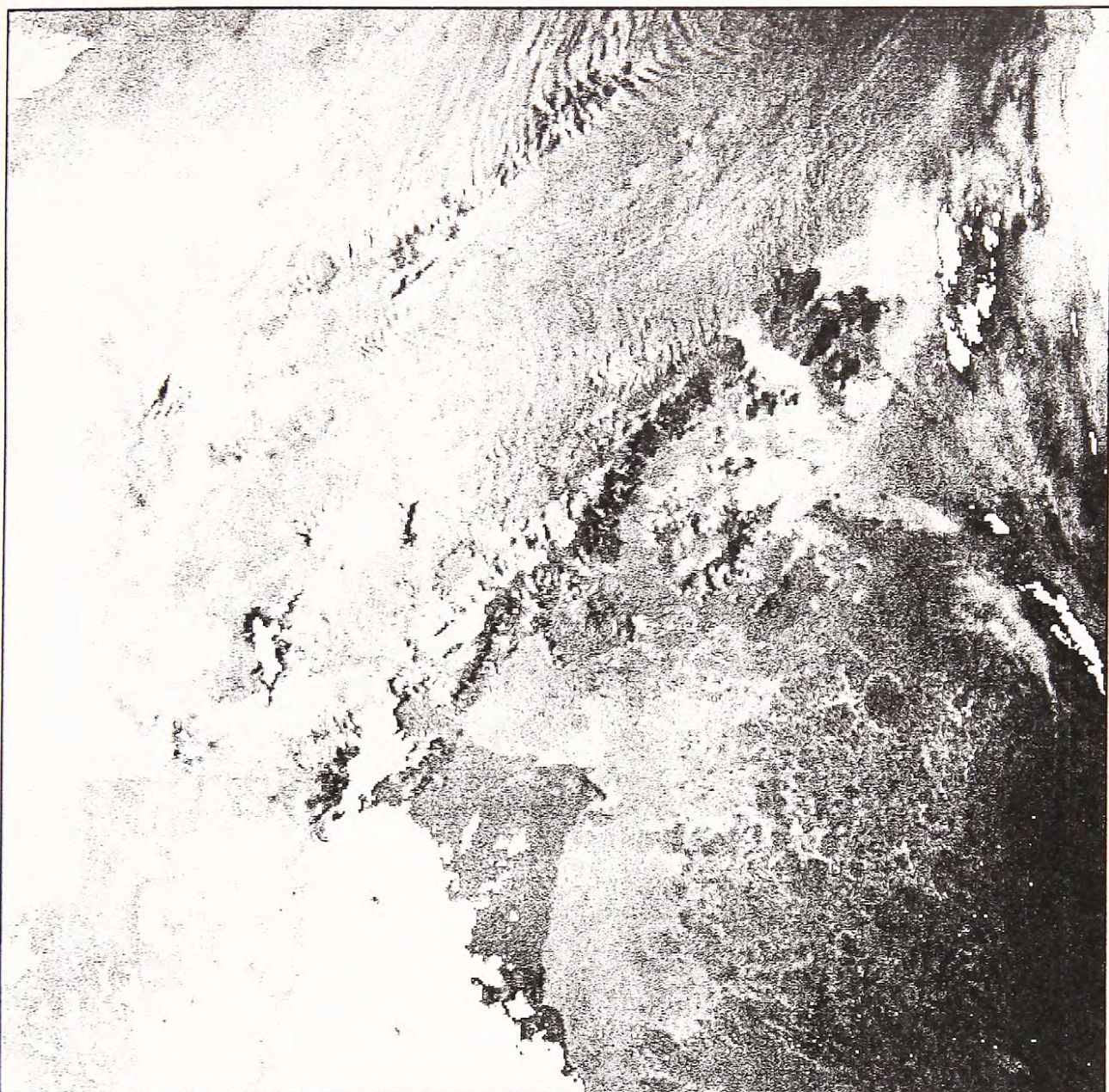


Figura 6.40.- Canal 1 (visible) después de la aplicación de la primera etapa de eliminación de nubes. Los píxeles contaminados y eliminados de la imagen son marcados, de forma de saber su condición para futuros procesamientos; ellos corresponden a nubes altas, las cuales son mostradas en la figura como píxeles blancos.

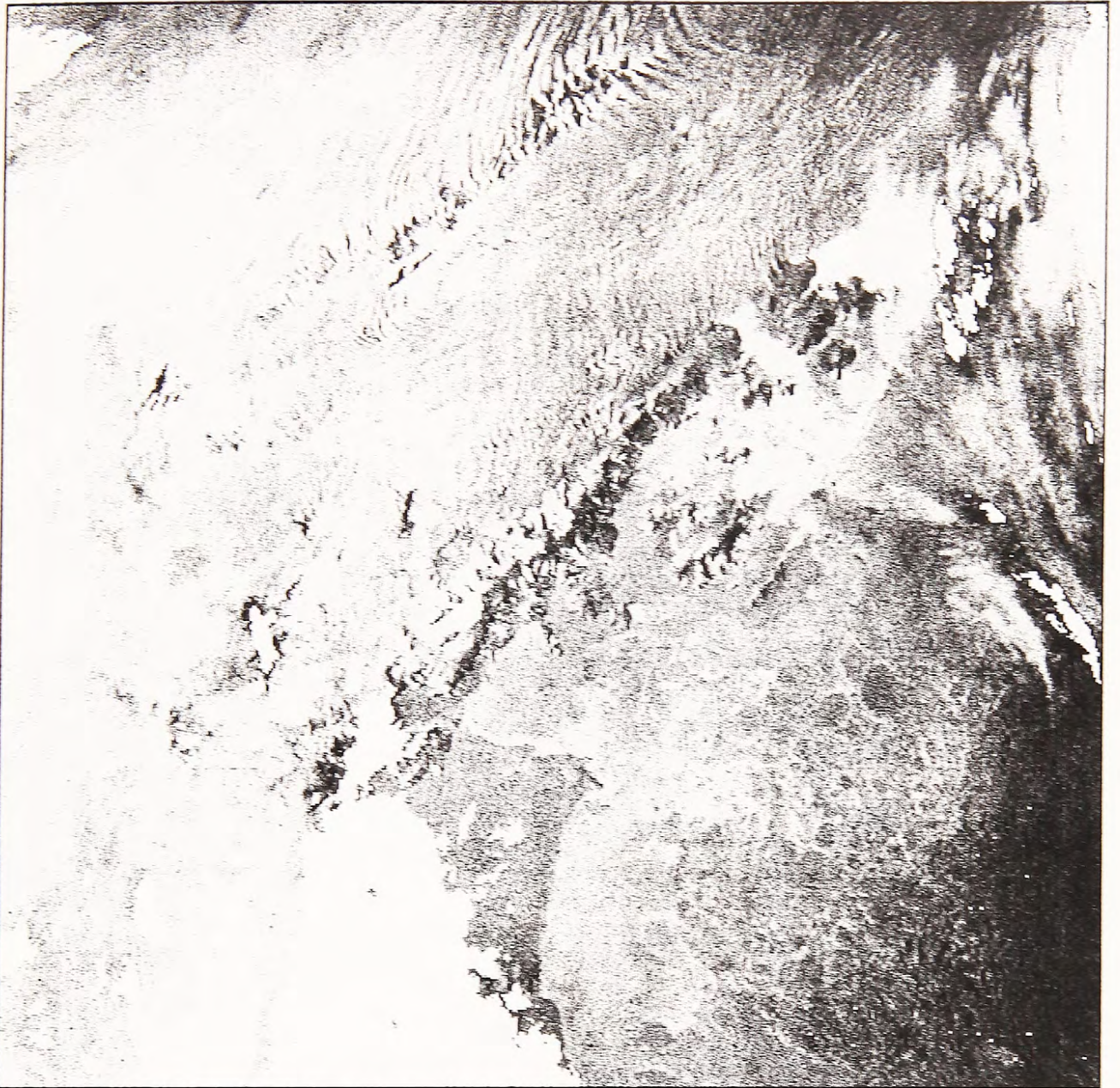


Figura 6.41.- Canal 2 (infrarrojo cercano) después de la aplicación de la primera etapa de eliminación de nubes.

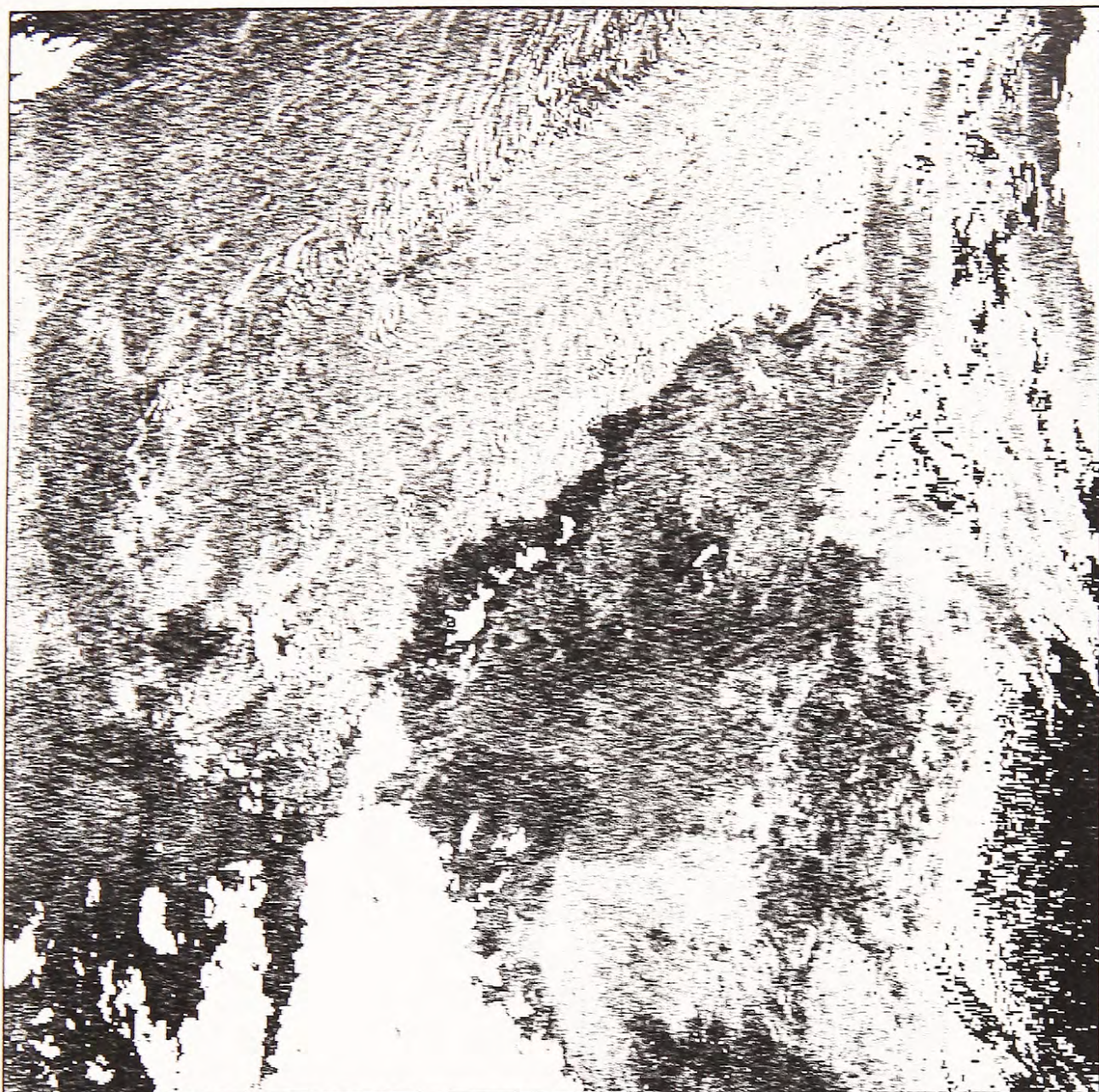


Figura 6.42.- Canal 3 (infrarrojo termal) después de la aplicación de la primera etapa de eliminación de nubes.

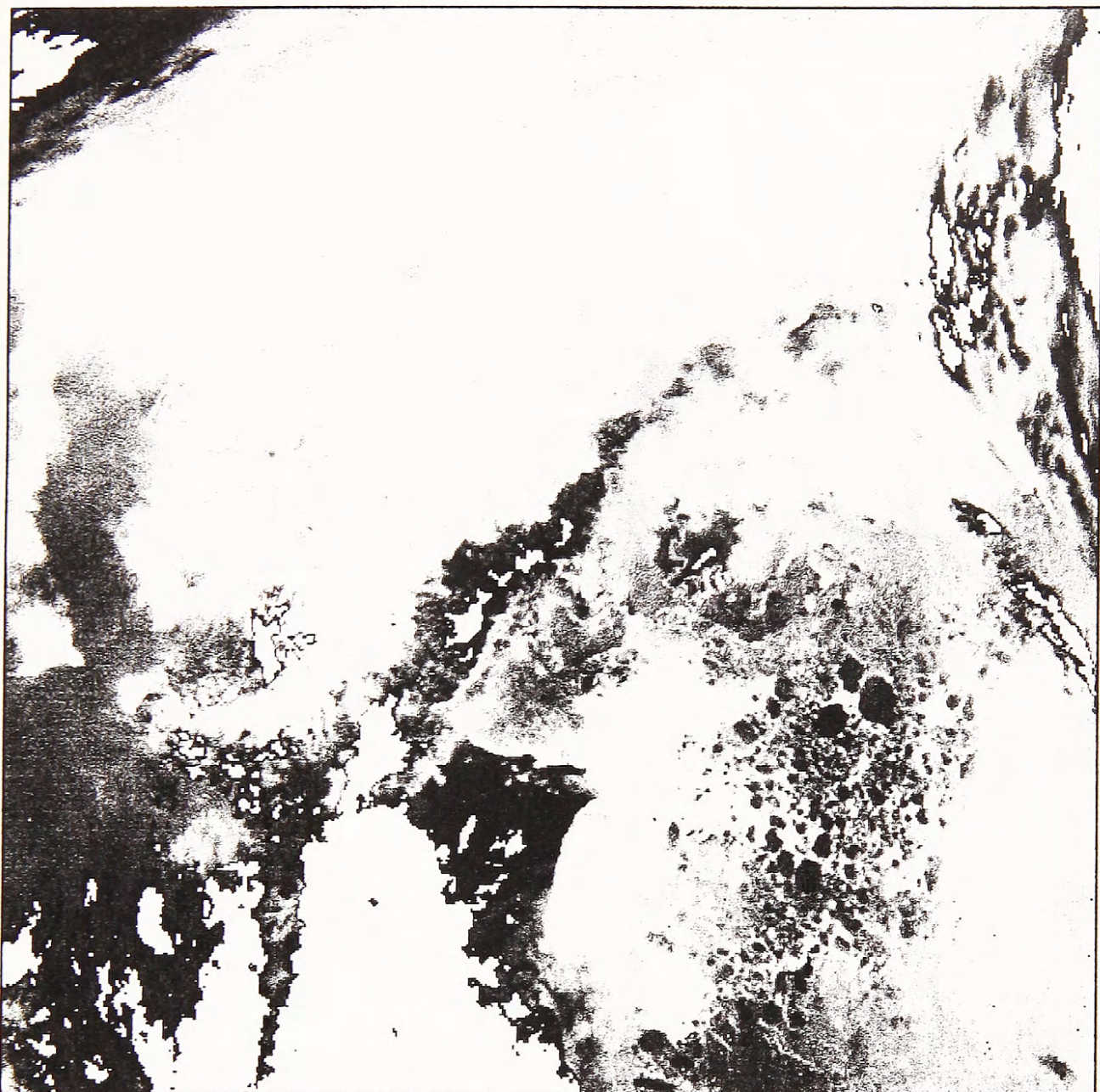


Figura 6.43.- Canal 4 (infrarrojo lejano) después de la aplicación de la primera etapa de eliminación de nubes.

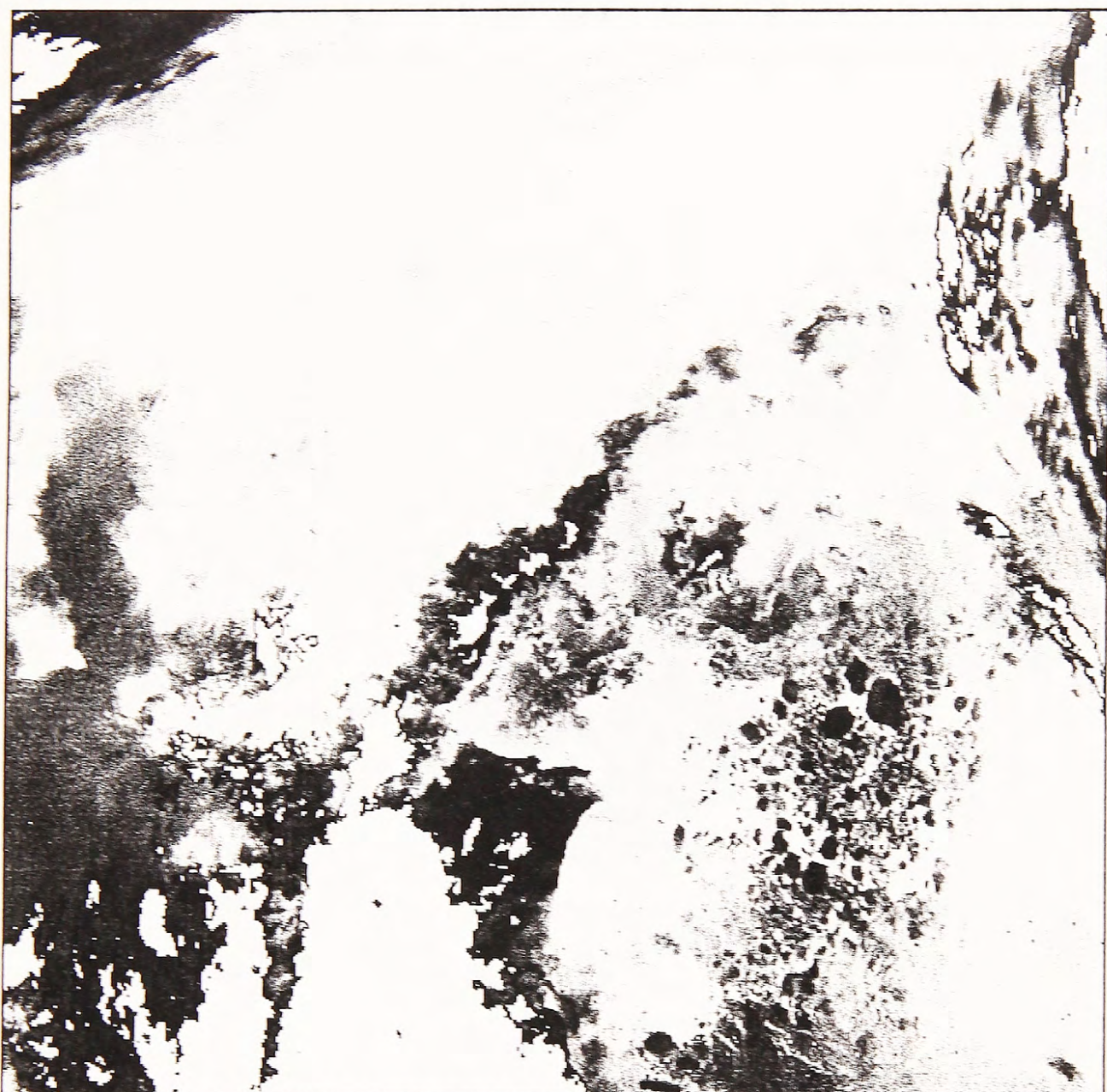


Figura 6.44.- Canal 5 (infrarrojo lejano) después de la aplicación de la primera etapa de eliminación de nubes.

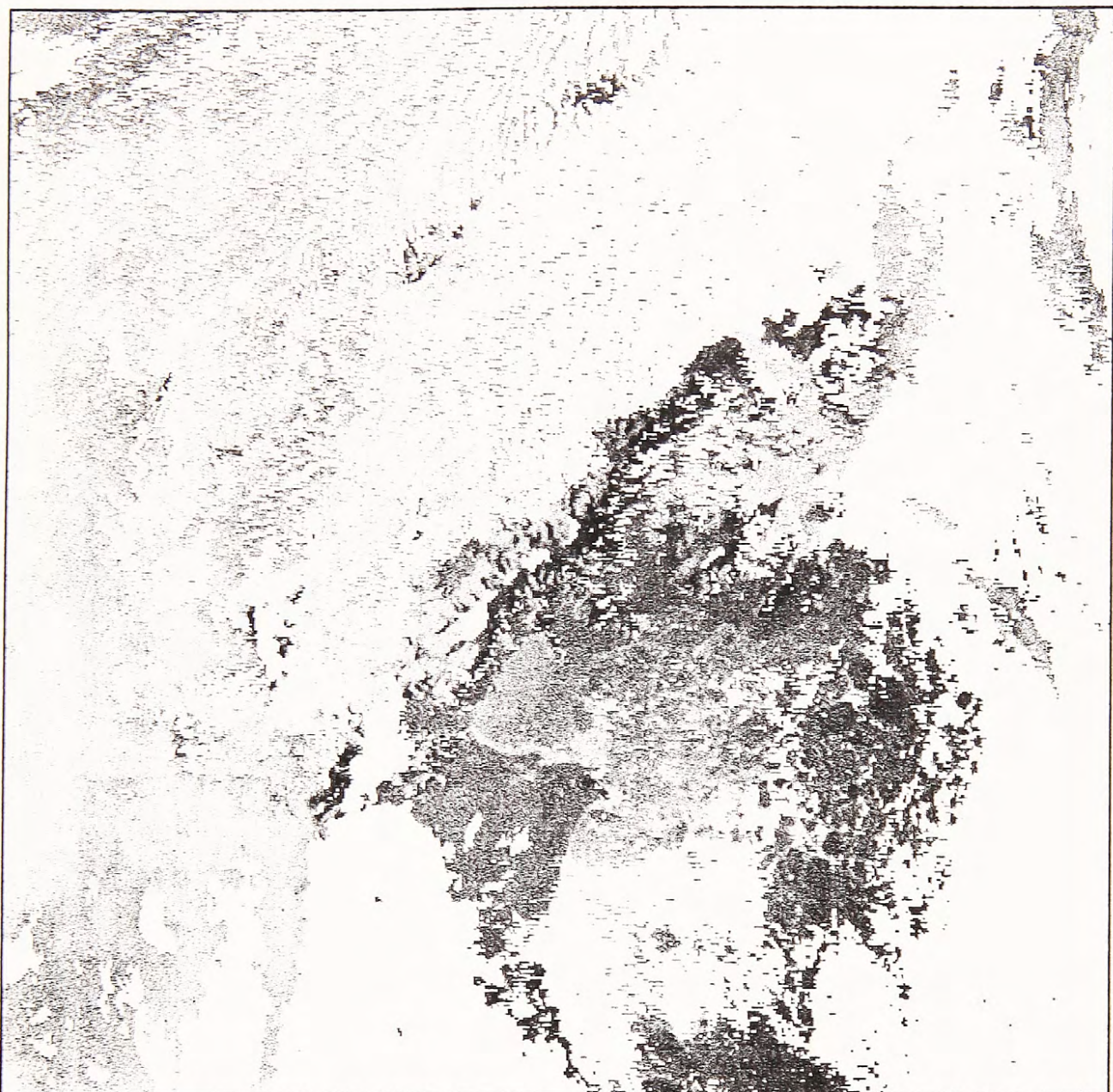


Figura 6.45.- Canal 1 (visible) después de la aplicación de la séptima etapa de eliminación de nubes. Se puede observar que se eliminaron más zonas cubiertas con nubes altas y medias, además de regiones presumiblemente de mar abierto.

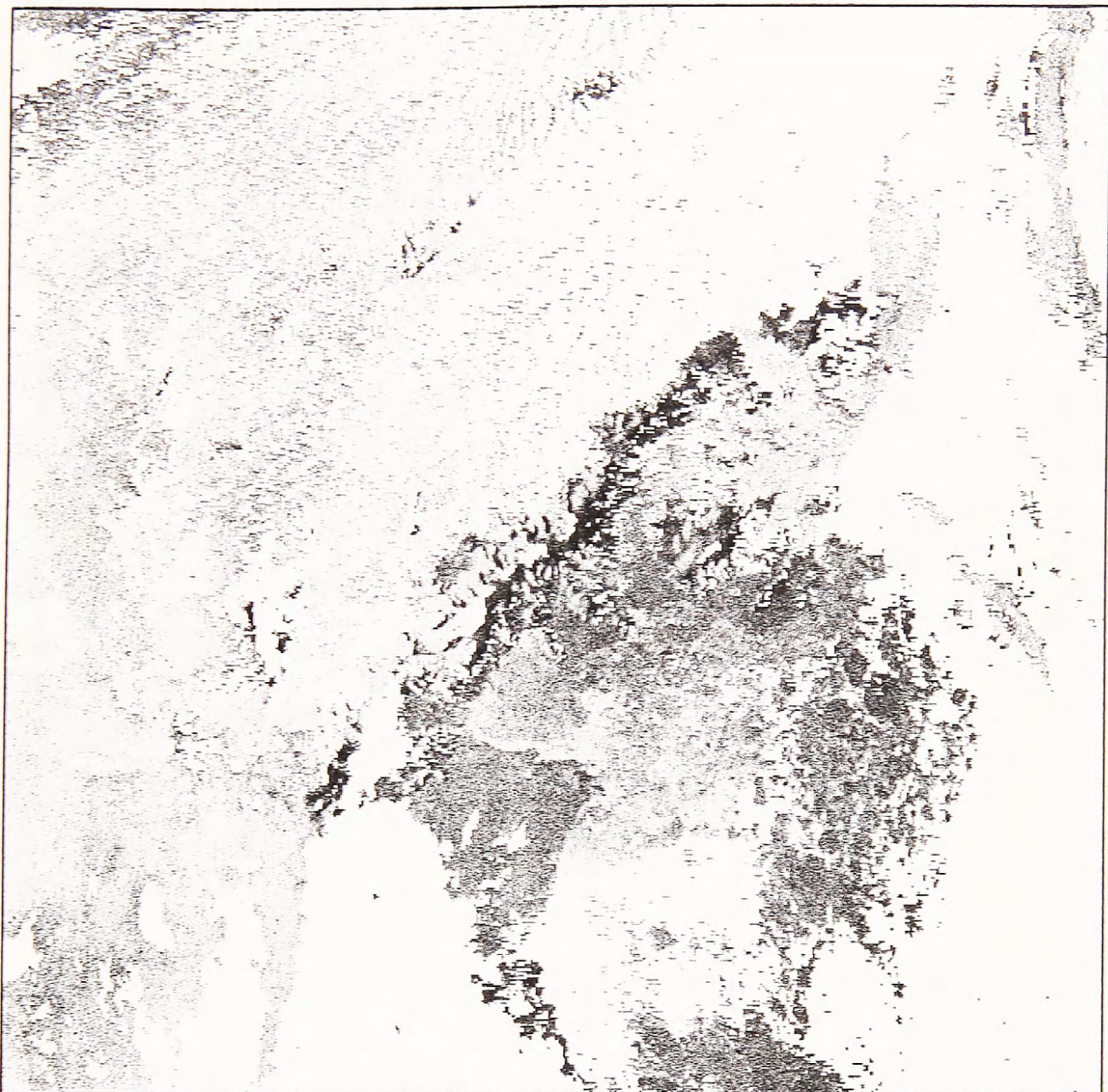


Figura 6.46.- Canal 2 (infrarrojo cercano) después de la aplicación de la séptima etapa de eliminación de nubes.

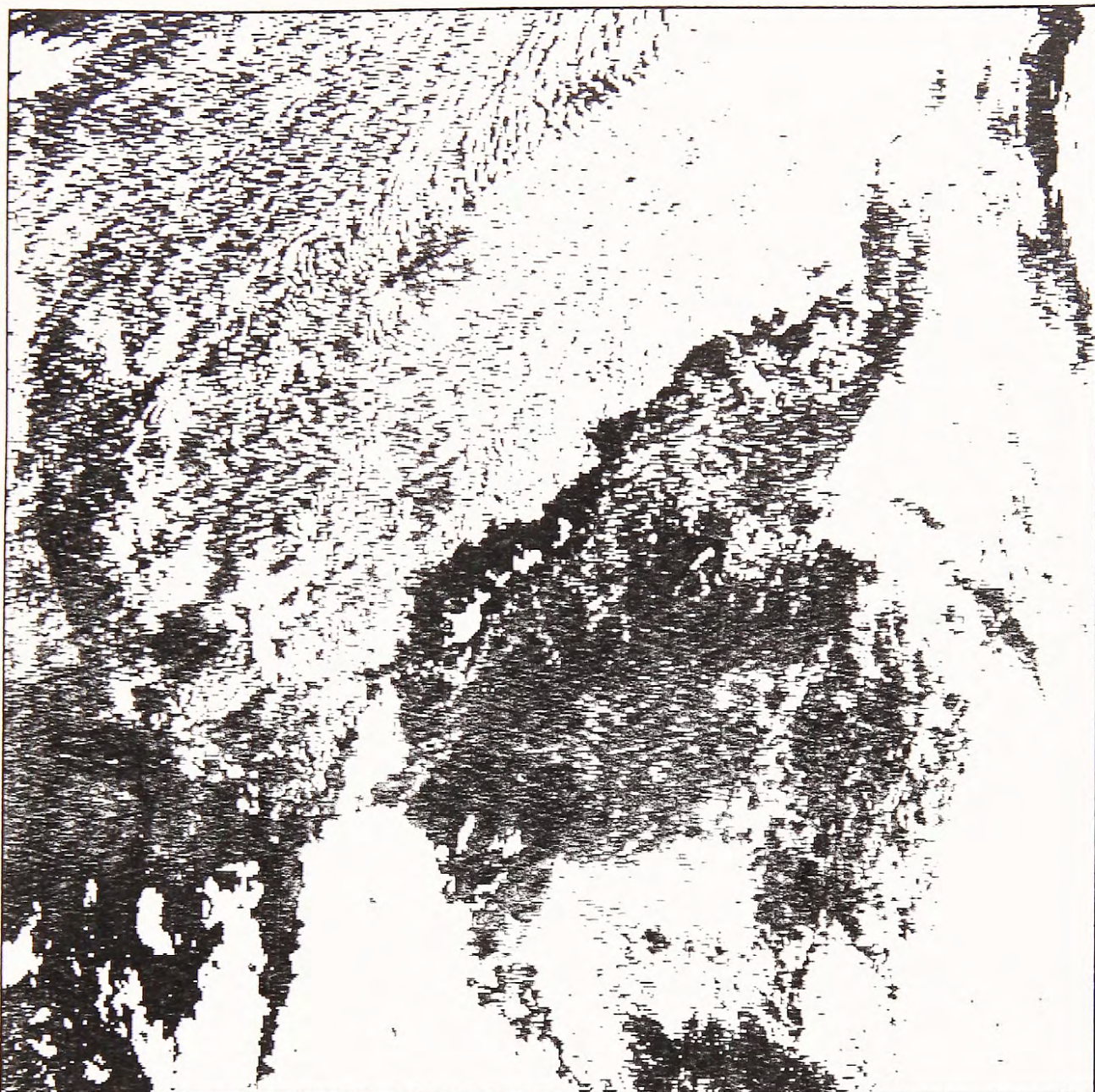


Figura 6.47.- Canal 3 (infrarrojo termal) después de la aplicación de la séptima etapa de eliminación de nubes.

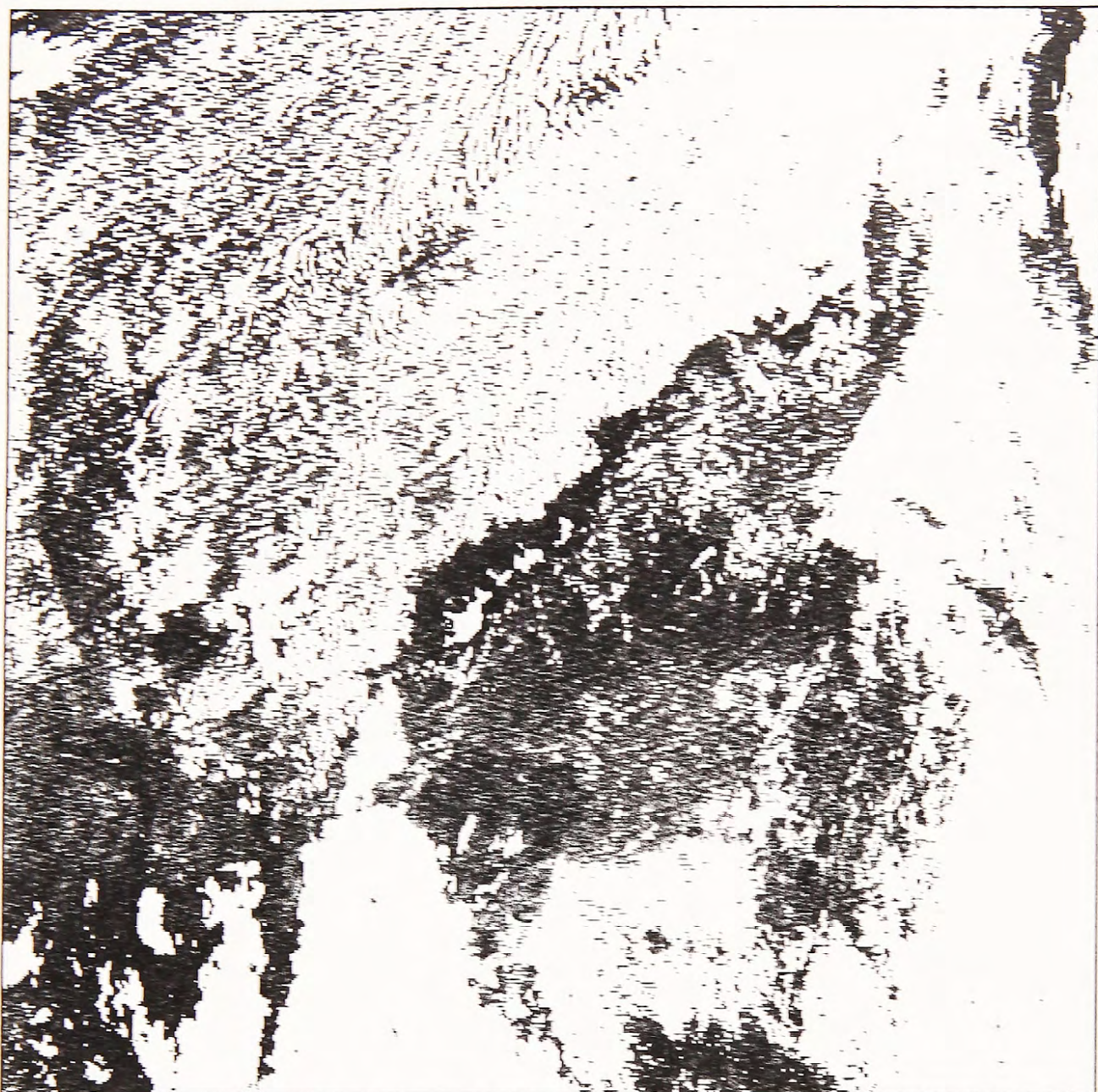


Figura 6.47.- Canal 3 (infrarrojo termal) después de la aplicación de la séptima etapa de eliminación de nubes.

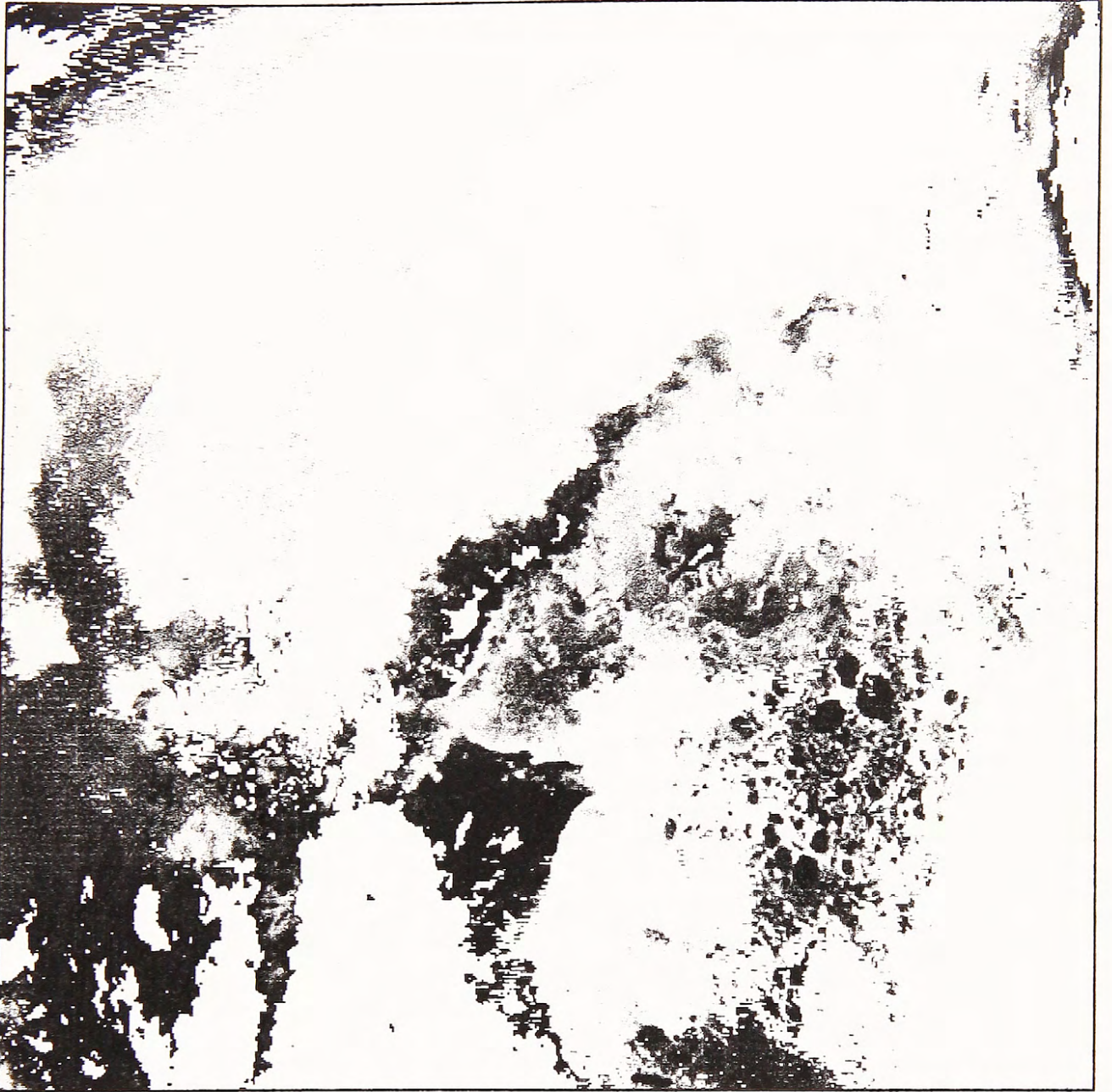


Figura 6.48.- Canal 4 (infrarrojo lejano) después de la aplicación de la séptima etapa de eliminación de nubes.



Figura 6.49.- Canal 5 (infrarrojo lejano) después de la aplicación de la séptima etapa de eliminación de nubes.

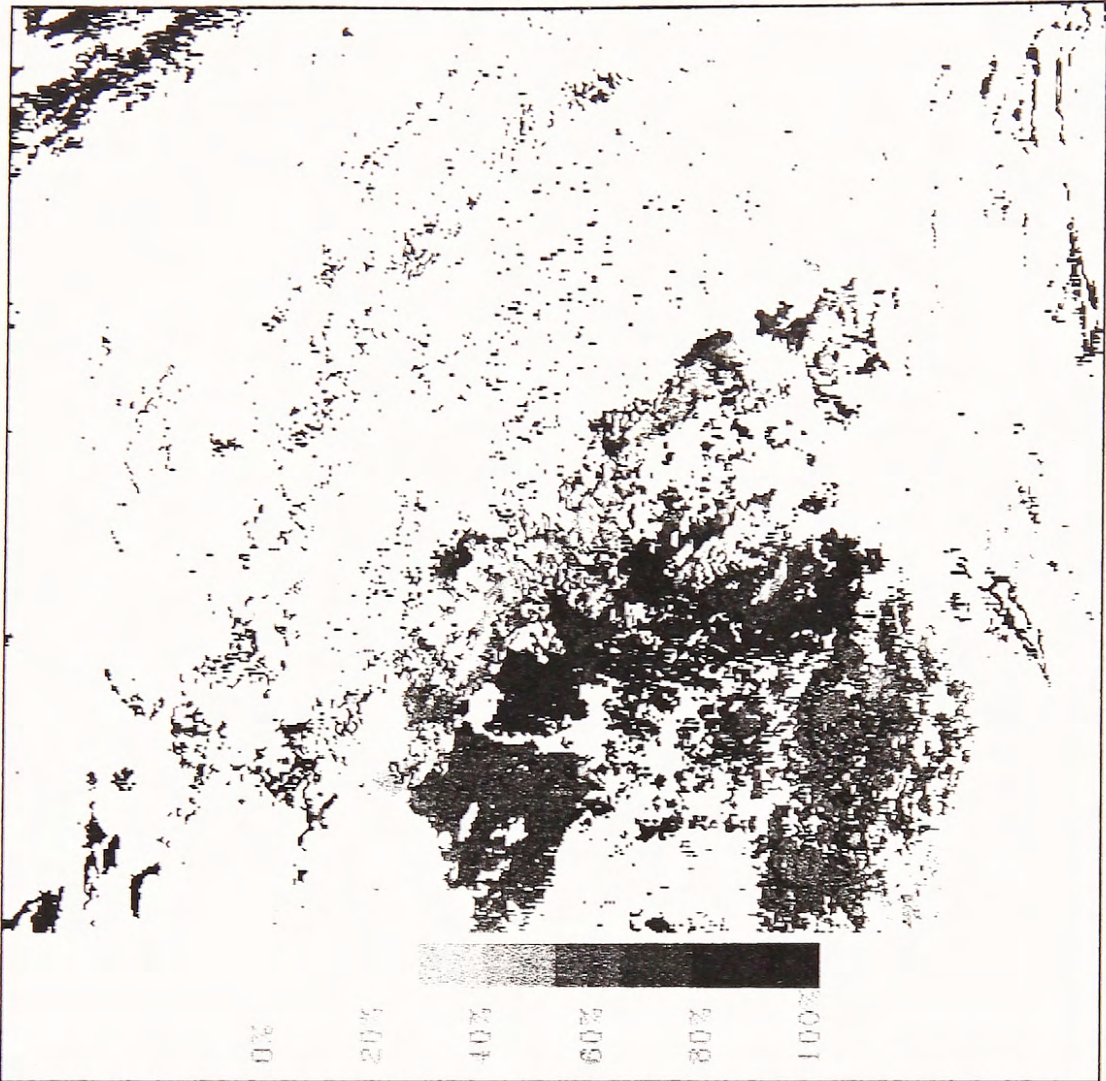


Figura 6.50.- Imagen de cobertura porcentual de hielo/nieve. Analizando la imagen se puede concluir que lo que corresponde a hielo, tanto marino como placas sobre continente, son aquellas que se encuentran entre un 40% a un 70% de la escala de colores; en cambio la nieve se muestra entre un 20% a 40% y lo que está sobre un 70% puede ser mar congelado.

## CONCLUSIONES

## CONCLUSIONES

- Se revisó las bases teóricas básicas de la percepción remota, rama nueva de la ingeniería y poco conocida en nuestra universidad, de forma de poder entender claramente los procesos involucrados en la obtención de productos acordes con la realidad que representan.
- Se describió el instrumento AVHRR montado sobre la serie de satélites NOAA, su sistema de transmisión a tierra y su formato, el sistema receptor ubicado en el Edificio Antártico, el cual pertenece al grupo de investigación del ozono, dependiente del Departamento de Matemáticas y Física de la Universidad de Magallanes. Se mostró los sistemas receptores de este tipo de satélites, para luego exponer características y ventajas del que se dispone en la universidad.
- Utilizando el lenguaje de programación IDL y basándose en trabajos publicados sobre calibración de datos de los cinco canales AVHRR, se logró desarrollar un programa interactivo y de fácil uso bautizado como MAGMASAT\_NOAA (Marcelo Gallardo Marusich Aplicaciones Satelitales NOAA) con los algoritmos necesarios para poder calibrar en forma adecuada la información.
- En este mismo programa se diseñó un algoritmo para la detección y eliminación de nubes, principal obstáculo al momento de filtrar las imágenes.
- Se obtuvo temperaturas superficiales del mar para imágenes diurnas y nocturnas, dos tipos de índices vegetacionales y un algoritmo para la identificación de coberturas de hielo y nieve, objetivo de esta tesis. Ahora las imágenes pueden ser usadas en trabajos de investigación (biológicas, forestales, de planificación, etc.), pero no pueden ser comerciales sino hasta después que se logre hacer un seguimiento de ellas y se someta a cuidadosas comparaciones en terreno.

Las tareas pendientes y posibles de realizar en otros futuros trabajos de titulación del Departamento de Ingeniería Eléctrica son:

- Comparar datos de los productos obtenidos con mediciones en terreno en un periodo no inferior a un año, debido a las fluctuaciones que se presentan entre las estaciones, que pueden alterar la información estimada.
- Superponer electrónicamente un mapa geográfico con las imágenes, labor imposible de realizar en este trabajo debido al excesivo tiempo que involucraba, la cual no se considera como parte de esta tesis.
- Aplicación de métodos o programas para confeccionar collages de imágenes, efectuar análisis de series en el tiempo, o el promedio de ellas, etc., las cuales pueden programarse en el MAGMASAT\_NOAA, debido a que fue desarrollado en base a módulos de fácil ampliación, para quien domine la teoría subyacente.

Finalmente se debe destacar que la obtención de buenos productos se deberá, en parte, a la experiencia que tenga el usuario que maneje el programa. Si bien el programa creado no es aún comercial, se debe tener en cuenta que se realizó con materiales existentes en la Universidad de Magallanes, lo cual no significó inversión económica, en comparación a programas comerciales valorados por sobre los US\$4.000.- e imágenes AVHRR de alta resolución (1km por 1km) que cuestan alrededor de US\$500.- cada una en un tamaño limitado. Es de esperar que otros estudiantes o investigadores tomen en sus manos la continuación de este estudio, de forma de hacer ampliamente accesibles los productos obtenidos, especialmente considerando que el gobierno de Estados Unidos pretende continuar lanzando al espacio la serie de satélites NOAA, lo que asegura el uso de MAGMASAT\_NOAA en el tiempo, puesto que es inmune a las modificaciones que NOAA-TIROS presentará en los próximos 20 años.

APÉNDICE

## APÉNDICE A

### ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO

La figura abajo muestra aquella parte del espectro electromagnético que es importante en la percepción remota, junto a los nombres convencionales que reciben sus regiones divisorias. Las letras usadas en el espectro de las microondas (P, L, S, etc.), son comúnmente usadas en el sensado remoto. Note también la terminología usada en las subdivisiones de la región infrarroja (IR); aquí se definió la banda infrarroja termal entre los 3 y 15  $\mu\text{m}$ , conteniendo esta región la mayor parte de la potencia emitida por cuerpos negros a temperaturas terrestres.

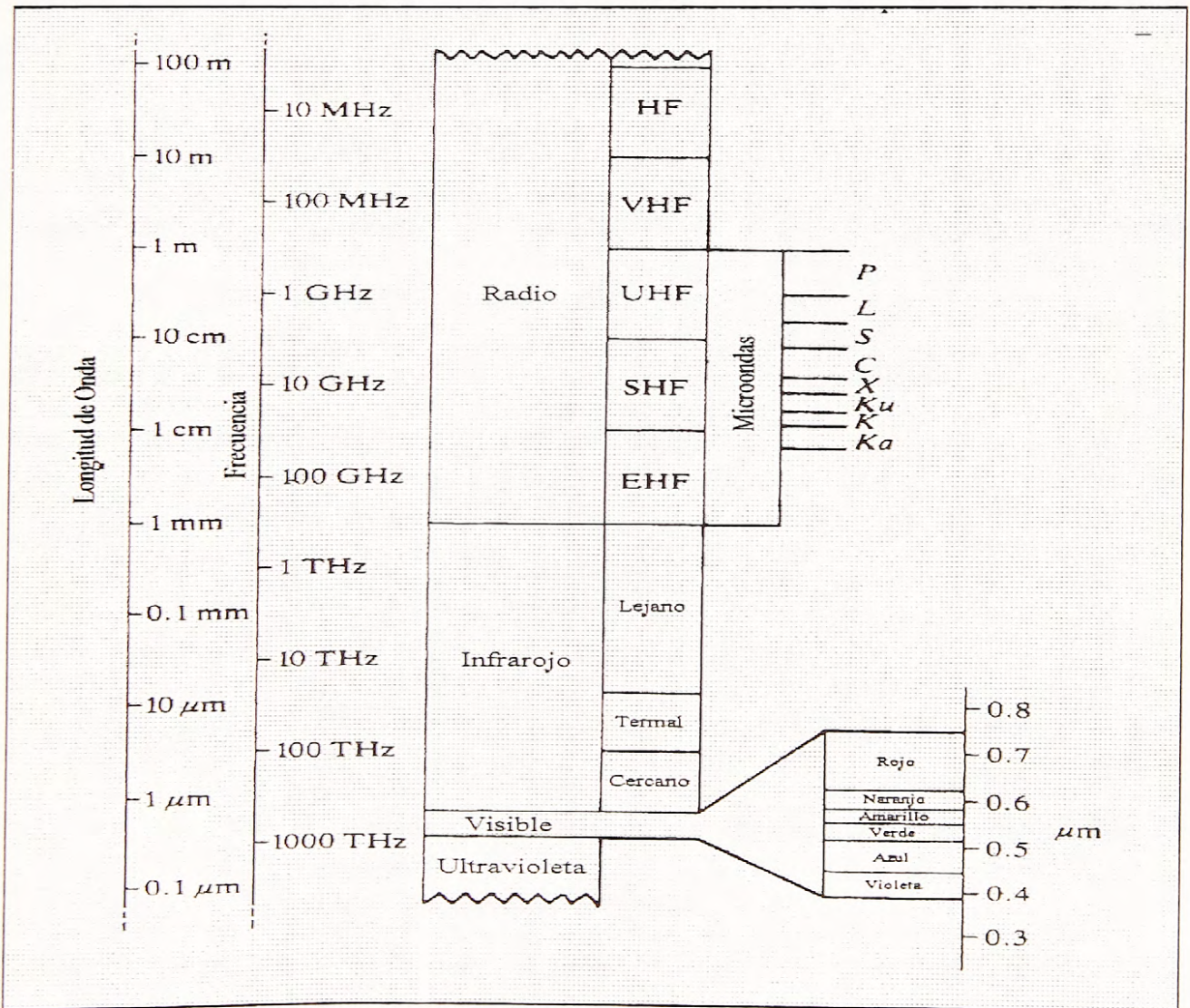


Figura A.1.- Espectro electromagnético (Rees, 1990).

## APÉNDICE B

### GLOSARIO

**Reflectancia Aparente :** es la reflectancia calculada a partir de la radiancia (L) medida por el sensor a bordo del satélite, afectada por los efectos atmosféricos; por lo tanto

$$\rho = \frac{\pi L}{\mu_s E_s} \quad (\text{B.1})$$

$E_s$  = excitancia incidente

S depende de las condiciones de irradiación.

**Espesor Óptico:** parámetro que permite estimar el poder absorbente y de dispersión (opacidad) de la atmósfera.

$$\tau_{total} = \tau_r + \tau_p \quad (\text{B.2})$$

$\tau_r$  = dispersión molecular.

$\tau_p$  = dispersión en aerosoles.

Ella puede ser estimada con la visibilidad V (en kilómetros) observada en el sitio, por medio de la relación:

$$\tau = 0.613 \exp(-2V/30) \quad (\text{B.3})$$

La precisión alcanzada es del orden del 50%.

**Órbita sincrónica al Sol:** la Tierra órbita alrededor del Sol, en el sentido contrario a los punteros del reloj, cuando se ve desde el polo Norte. Así pareciera, desde la Tierra, que el Sol cruza el campo de estrellas de Oeste a Este en el periodo de un año; de otra forma, el Sol parece que rota alrededor de la Tierra con una velocidad angular de  $1.991 \times 10^{-7} \text{ seg}^{-1}$ . Si los satélites artificiales tienen la misma velocidad, estos parecen seguir al Sol. Esta clase de órbita se llama sincrónica al Sol, y su implicancia práctica es que el satélite cruzará una latitud dada a la misma hora solar cada día.

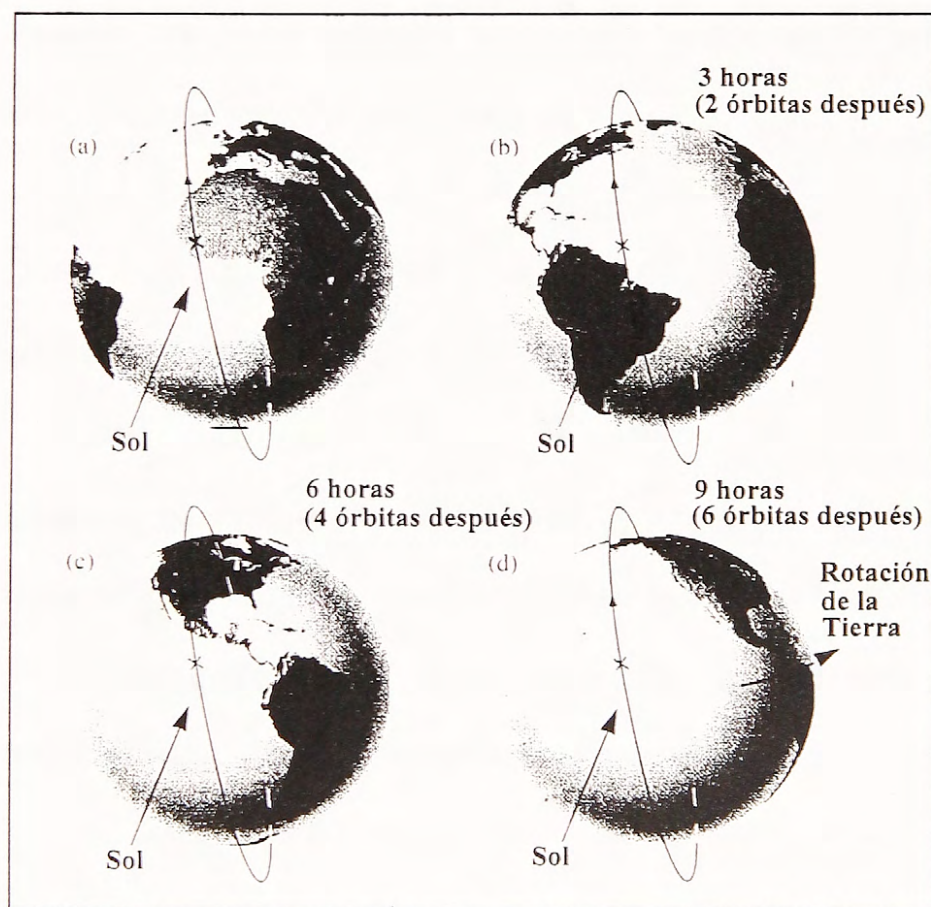


Figura B.1.- Desde la posición del Sol, el satélite se mueve en un círculo que parece permanecer en el mismo lugar; significa que cada parte de la Tierra es sobrevolada a la misma hora local (llamado **hora de cruce local**).

- Albedo:** se define como la razón de la radiación reflejada con la incidente. Los objetos con altos albedos reflejan más radiación incidente, y parecen más brillantes a la vista. El albedo puede ser expresado como un número no dimensional entre 0 y 1; también puede ser expresado en porcentaje, donde 100% ó 1 corresponde a un objeto que puede reflejar totalmente la radiación. Por el contrario, un valor 0 ó de 0% significa que el objeto es negro.
- Acimut:** es una convención para designar direcciones. Los acimut son medidos en grados, en el sentido de los punteros del reloj, desde el Norte. Por ejemplo, 315 grados indicarían la dirección Nor-Oeste, 135 grados la dirección Sur-Este, y 0 ó 360 el Norte.
- Nadir:** O SUB-PUNTO DEL SATÉLITE, es la distancia más cercana que existe entre el satélite y la superficie de la Tierra.
- IFOV:** Instantaneous Field of View, o Campo de Visión Instantáneo, es un elemento físico, con dimensiones físicas, sobre una escena a ser capturada por un sistema de percepción remota, representado por un número en una imagen digital (pixel), correspondiente a la energía promedio que proviene de dicho campo. El IFOV define la resolución espacial del sensor remoto, es decir el grado de detalle que se puede discernir de la escena.
- Número central de la onda:** todos los radiómetros abordo de la serie de satélites NOAA fueron extensamente probados y calibrados radiométricamente antes de su lanzamiento. Uno de los parámetros fundamentales derivados durante

estas calibraciones, es la respuesta espectral para todos los canales. La calibración se hace utilizando cuerpos negros estándares cuyo comportamiento es muy conocido. La sensibilidad de cada uno de estos canales es determinada realizando 60 muestras muy finas, de alrededor de  $0.03 - 0.06 \mu\text{m}$  cada una. Por convenciones de la NOAA, la sensibilidad se expresa como una función del número de onda, inversa con la longitud de onda.

## APÉNDICE C

### ESTRUCTURA DE LA TRAMA DE DATOS HRPT

Los datos AVHRR se digitalizan con una precisión de 10 bits, siendo transmitidos desde el satélite en tiempo real como datos HRPT. Su formato consiste de una trama grande, compuesto de tres tramas pequeñas. Los datos son entregados a los transmisores de banda S en formato de fase dividida, que consiste en que los datos “1” se definen como una senoide positiva en la primera mitad del periodo del bit, y una negativa durante la segunda mitad del periodo del bit; en cambio los datos “0” se definen como una senoide negativa en la primera mitad del periodo del bit, y positiva en su segunda parte.

Tabla C.1.- Parámetros típicos de los datos HRPT.

<b>TRAMA GRANDE</b> Velocidad Número de tramas menores	dos tramas por segundo dos
<b>TRAMA MENOR</b> Velocidad Número de palabras	seis tramas por segundo 11090
<b>PALABRA</b> Velocidad Número de bits Orden	66540 palabras por segundo 10 Bit 1 = bit más significativo Bit 10 = bit menos significativo El bit 1 se transmite primero
<b>BIT</b> Velocidad Formato	665400 bits por segundo fase dividida

Hay 2048 puntos como máximo en una línea de barrido HRPT. El ángulo solar cenital y los datos de ubicación respecto a la Tierra (latitud y longitud), son muestreados cada 40 puntos, partiendo en el punto 25 (25, 65, 105, ..., 1945, 1985, 1985, 2025). Hay 51 posibles ángulos cenitales y ubicaciones geográficas de la Tierra para cada línea barrida. Cada dato es grabado en un byte, como grados por dos. Los valores de latitud y longitud son grabados en dos

bytes, siendo de 0 a 180 para el Este positivos, y de 0 a 180 para el Oeste negativos, almacenándolos en notación en complemento a dos.

Los datos HRPT contienen cinco valores, uno para cada canal, para cada uno de los 2048 puntos como máximo, lo que nos entrega 2048 puntos x 5 canales =10240 muestras. El orden de los datos HRPT es: punto de barrido 1 (canales 1, 2, 3, 4 y 5), punto de barrido 2 (canales 1, 2, 3, 4 y 5), etc., siendo grabados los datos en binario.

El código de tiempo consiste en información del año, día del año (días Julianos<sup>1</sup>), y hora GMT del día en milisegundos. Además se tienen indicadores de calidad, que contienen el estatus de las condiciones detectadas durante el procesamiento, y de los subsistemas de control y adquisición de datos (si el bit es uno, ON, entonces la condición es verdadera); los coeficientes de calibración anteriormente mencionados, consistentes en los valores de pendiente y corte para cada uno de los cinco canales, determinados de los datos de telemetría, y así sucesivamente.

---

<sup>1</sup> Ver "APÉNDICE B, GLOSARIO".

Tabla C.2.- Formato de la trama de datos HRPT.

DESCRIPCIÓN	NÚMERO DE PALABRAS	POSICIÓN DE LAS PALABRAS	NÚMERO DE BITS 12345678910
Trama de sincronización	6	1 2 3 4 5 6	1010001000 0101101111 1101011100 0110011101 1000001111 0010010101
Identificador del satélite	2	7 8	Bit 1: 0 = sincronización interna; 1 = sincronización del AVHRR Bit 2 y 3: 00 = no se usa; 01 = trama menor 1; 10 = trama menor 2; 11 = trama menor 3. Bit 4-7: dirección del satélite; bit 4 (bit más significativo); bit 7 (bit menos significativo) Bit 8: 0 = trama estable; 1 = se llevó a cabo una resincronización de la trama Bit 9-10: libres; bit 9 = 0; bit 10 = 1 Palabra libre (indefinida)
Código de tiempo	4	9 10 11 12	Bit 1-9: día Juliano en binario; bit 1 = bit más significativo; bit 9 = bit menos significativo Bit 10: 0; libre Bit 1-3: todos ceros; libres Bit 4-10: parte de la hora del día en milisegundos; bit 4 = bit más significativo Bit 1-10: parte de la hora del día en milisegundos Bit 1-10: parte de la hora del día en milisegundos; bit 10 = bit menos significativo
Telemetría	10	13 14 15 16 17 18 19 20 21 22	Rampa de calibración del canal 1 del AVHRR Rampa de calibración del canal 2 del AVHRR Rampa de calibración del canal 3 del AVHRR Rampa de calibración del canal 4 del AVHRR Rampa de calibración del canal 5 del AVHRR Temperatura del blanco interno tomada por el canal 3 Temperatura del blanco interno tomada por el canal 4 Temperatura del blanco interno tomada por el canal 5 Temperatura de prueba del canal 3 0 0 0 0 0 0 0 0 1 (libre)
Calibración	30	23 ... 52	10 palabras de datos sensados con anterioridad de los canales 3, 4 y 5. Cada uno de estos datos están multiplexados como: canal 3 (palabras 1), canal 4 (palabras 1), canal 5 (palabras 1), canal 3 (palabras 2), canal 4 (palabras 2), canal 5 (palabras 2), etc.
Información TOVS	50	53 ... 102	10 palabass de datos especiales de los canales 1, 2, 3, 4 y 5. Estos datos se re-multiplexan en el tiempo como canal 1 (palabras 1), canal 2 (palabras 1), canal 3 (palabras 1), canal 4 (palabras 1), canal 5 (palabras 1), canal 1 (palabras 2), canal 2 (palabras 2), canal 3 (palabras 2), canal 4 (palabras 2), canal 5 (palabras 2), etc.
Sincronización	1	103	Bit 1: 0 = sincronización AVHRR al principio; 1 = sincronización AVHRR al final Bit 2-10: conteo binario de 9 bits de periodos de 0.9984 MHz
Datos TIP	520	104 ... 623	Las 520 palabass contienen cuatro tramas de datos TIP (104 palabass de datos TIP por trama). Bit 1-8: datos TIP tal cual son generados Bit 9: chequeo de paridad par sobre los bits 1-8 Bit 10: 1
Palabass libres	127	624 625 626 627 628 ... 748 749 750	1010001110 1110001011 0000101111 1011000111 1101010010 ... 1001011010 1100100010 1000000000
Datos AVHRR	10240	751 752 753 754 755 756 ... 10985 10986 10987 10988 10989 10990	Canal 1: primer muestreo Canal 2: primer muestreo Canal 3 primer muestreo Canal 4: primer muestreo Canal 5: primer muestreo Canal 1: segundo muestreo ... Canal 5: muestra número 2047 Canal 1: muestra número 2048 Canal 2: muestra número 2048 Canal 3: muestra número 2048 Canal 4: muestra número 2048 Canal 5: muestra número 2048 Cada trama menor contiene los datos barridos desde un sensor AVHRR
Sincronismo auxiliar	100	10991 10992 10993 10994 ... 11089 11090	1111100010 1111110011 0110110101 1010111101 ... 0111110000 1111001100

## APÉNDICE D

### ESTRUCTURA DE LOS DATOS TLE

La captura de los datos TLE (Two Line Elements, Elementos de dos Líneas) se basa en la hora en el reloj del satélite, siendo leída para realizar la adquisición entre dos tiempos definidos; esto quiere decir que la exactitud de la captura depende del reloj del satélite (no del reloj del computador perteneciente a la estación receptora), y de la fecha de antigüedad del conjunto de datos TLE. Estos datos se basan en el modelo de predicción NORAD SGP4, y es usado para propósitos de navegación, control y mapeo. El conjunto se mantiene en archivos con extensión .TWL (ej: NOAA9.twl, NOAA10.TWL, etc.), según los satélites NOAA que se encuentren vigentes. Como se describió en el punto 2.4.2 del segundo capítulo, el programa ORBIT.EXE usa los datos TLE para predecir la posición del satélite, y así apuntar la antena en la posición correcta para capturar los datos de una región especificada por el usuario.

Es importante mantener el reloj del computador aproximadamente correcto (hora GMT, no local), debido a que el software examina todas las órbitas que pasan por el campo de interés del usuario, desde la hora GMT que tenga el reloj del computador en ese momento, hacia el futuro (ignora todas las órbitas de los satélites que hayan pasado).

Los nuevos datos TLE son grabados en un archivo de texto llamado NEW.TLE; el archivo contiene los datos y los nombres de los satélites, de modo que el programa extrae los detalles relevantes.

La lista de satélites de interés es especificada en un archivo llamado SATLIST.LST, que presenta el siguiente formato:

- 1 NOAA9 NOAA9.TWL
- 2 NOAA10 NOAA10.TWL
- 3 NOAA11 NOAA11.TWL
- 4 NOAA12 NOAA12.TWL
- 5 NOAA14 NOAA14.TWL

Se puede extender la lista cambiando el contenido de SATLIST.LST usando un editor de texto cualquiera. Al hacer correr el programa DATE.EXE, los archivos con extensión .TWL son actualizados con la nueva información extraída de NEW.TLE. El programa actualizador añade los nuevos datos a los anteriormente usados, de forma que el usuario tiene un registro histórico, haciendo además copias de respaldo de estos archivos previos, y dándole nombres con extensión .TBK. Los datos consisten de dos líneas con el siguiente formato:

```

AAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAA
1      nnnnnn nnnnnnnn nnnnn.nnnnnnnn + .nnnnnnnn + nnnnn-n + nnnnn-n n nnnnn
2      nnnnn nnn.nnnn nnn.nnnn nnnnnnnn nnn.nnnn nnn.nnnn nn.nnnnnnnnnnnnnnnnn

```

La línea 0 es un nombre de hasta 22 caracteres. El resto del formato es la que se muestra a continuación.

Tabla C.1.- Línea 1 correspondiente a los datos TLE.

Columna	Descripción
01-01	Número de la línea de datos
03-07	Número del satélite
10-11	Designación internacional (los últimos dos dígitos del año de lanzamiento)
12-14	Designación internacional (número del lanzamiento)
15-17	Designación internacional (momento del lanzamiento)
19-20	Época del año (últimos dos dígitos del año)
21-32	Época (día Juliano y fracción de éste)
34-43	Primera determinación de la hora, en base al movimiento medio o coeficiente balístico
45-52	Segunda determinación de la hora, en base al movimiento medio
54-61	Término de la fricción BSTAR, si se usa la teoría general de la perturbación, o sino el coeficiente de presión de la radiación
63-63	Tipo de efemérides
65-68	Número de elemento
69-69	Suma de chequeo (módulo 10); letras, espacios en blanco, periodos, signo (+) = 0; signo (-) = 1

Tabla C.2.- Línea 2 correspondiente a los datos TLE.

Columna	Descripción
01-01	Número de la línea de datos
03-07	Número del satélite
09-16	Inclinación (en grados)
18-25	Ascensión correcta del nodo (en grados)
27-33	Excentricidad (se con punto decimal)
35-42	Argumento del perigeo (en grados)
44-51	Anomalía media (en grados)
53-63	Movimiento medio (revoluciones por día)
64-68	Número de revoluciones en ese momento del año
69-69	Suma de chequeo (módulo 10)

Todas las demás columnas permanecen en blanco.

## APÉNDICE E

### ESTRUCTURA INTERNA DE UN BLOQUE

El sistema LARST creado por la Bradford University Research Ltd., genera archivos de salida en formato de "bloque", una vez que los datos, en formato HRPT, están en la memoria RAM del computador controlador. Este consiste a su vez en una serie de sub-bloques, cada uno comenzando con su largo, seguido por el nombre de éste, el número del canal, datos de la imagen, histogramas, etc., y los datos en sí. Los largos totales de los bloques son grabados como un valor binario de cuatro bytes, primero el menos significativo, incluyendo la longitud, nombre, número del canal y datos. Los nombres son de ocho bytes de longitud, rellenos con espacios si se requiere. El número del canal es guardado como valores binarios de dos bytes, el menos significativo primero.

El nombre del bloque entrega información acerca del satélite que capturó los datos, la fecha completa, incluyendo la hora, su extensión, etc. A continuación se da un ejemplo para clarificar este aspecto.

Supongamos que tenemos un archivo en formato de bloque con el siguiente nombre:

SE38GD26.1B2

- La primera letra, **S**, indica que el satélite seguía una trayectoria de Sur a Norte.
- La segunda letra corresponde al número hexadecimal del satélite que envió la información, por lo que este archivo en especial fue enviado a tierra por el satélite NOAA-14.

<b>NOAA</b>	9	10	11	12	13	14
<b>Número hexadecimal</b>	9	A	B	C	D	E

- El tercer número representa el año en que se realizó el archivo, siendo éste generado en el año 1995.

<b>Año</b>	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998
<b>Número correspondiente</b>	0	1	2	3	4	5	6

- El cuarto número representa el mes, nombrándose éstos mediante notación hexadecimal (de 1 a B); el archivo en cuestión es de Agosto.
- El quinto número es el día, sólo que aquí se utilizan los números del 1 al 9, y luego se usan las letras del abecedario; nuestro ejemplo es del día 16.
- El siguiente número corresponde a la hora de inicio de la captura de datos (hora GMT), usando el mismo formato que para anotar el día; aquí se representó las trece horas.
- Los dos últimos dígitos corresponden a los minutos de la hora de inicio de captura de los datos; en nuestro caso 26 minutos.
- La extensión indica el tamaño en pixeles de la imagen, en múltiplos de 512. Así, en nuestro ejemplo, el primer número en la extensión corresponde a 512 pixeles en el sentido del eje X; la letra **B** es para decir que se trata de un archivo en formato de bloque; y el último número dice que la imagen en el eje Y es de 1024 pixeles.

La estructura de los bloques creada por el programa de captura de datos es mostrada en la siguiente tabla:

Tabla E.1.- Estructura que presenta un bloque de datos.

NOMBRE DEL BLOQUE	LARGO TOTAL DEL BLOQUE (BYTES)	LARGO DE LOS DATOS (BYTES)	DESCRIPCIÓN
HEADER	524	512	Información básica acerca de los archivos
TIP_DATA	Variable	Número de líneas x 1280	Información TIP sin procesar
CHDATA10	Variable	Número de líneas x número de columnas x 2	Datos sin procesar de los cinco canales AVHRR
VALDLINE	Variable	Número de líneas	Indicador de validez de los datos
HIST10BT	1038	1024	Histograma de los valores de los cinco canales, uno para cada uno
TLE_DATA	172	160	Datos orbitales TLE

Posteriormente, en el post-procesamiento de la estructura de bloque, se activan los programas CAL\_IMG.EXE, NAV\_IMG.EXE y MAP\_IMG.EXE explicados en detalle en el punto “2.6 Sistema LARST” del capítulo 2, agregándose nuevos segmentos al bloque de datos, quedando su estructura interna como se muestra en la tabla E.2.

Tabla E.2. - Estructura que presenta un bloque de datos procesado.

NOMBRE DEL BLOQUE	LARGO TOTAL DEL BLOQUE (BYTES)	LARGO DE LOS DATOS (BYTES)	DESCRIPCIÓN
HEADER	524	512	Información básica acerca de los archivos
TIP_DATA	Variable	Número de líneas x 1280	Información TIP sin procesar
CHDATA10	Variable	Número de líneas x número de columnas x 2	Datos sin procesar de los cinco canales AVHRR
VALDLINE	Variable	Número de líneas	Indicador de validez de los datos
HIST10BT	1038	1024	Histograma de los valores de los cinco canales, uno para cada uno
TLE_DATA	172	160	Datos orbitales TLE
OVERLAY	Variable	Variable	Datos de mapa digital
TIEPOINT	Variable	$((\text{Número de líneas} + 256) / 32) \times (\text{número de columnas} + 256) / 32 \times 8$	Referencias de latitud / longitud de los canales AVHRR
CALPOINT	Variable	$(\text{Número de líneas} / 32) \times 16 \times 3$	Pendiente y corte para los canales AVHRR 3, 4 y 5
SATPOINT	Variable	$((\text{Número de líneas} + 256) / 16) \times (\text{número de columnas} + 256) / 32 \times 8$	Valores de ángulo cenital satelital de los canales AVHRR
SUNPOINT	Variable	$((\text{Número de líneas} + 256) / 32) \times (\text{número de columnas} + 256) / 32 \times 8$	Valores de ángulo cenital solar de los canales AVHRR

## APÉNDICE F

## NÚMERO CENTRAL DE ONDA PARA LOS SATÉLITES NOAA-9/10/11/12/14

Las siguientes tablas muestran los números centrales de onda, según gama de temperaturas, para los canales 3, 4 y 5 de los datos HRPT AVHRR.

Tabla F.1.- Números centrales de onda para los canales infrarrojos del satélite NOAA-9.

RANGO DE TEMPERATURAS (°K)	CANAL 3 (cm <sup>-1</sup> )	CANAL 4 (cm <sup>-1</sup> )	CANAL 5 (cm <sup>-1</sup> )
180 - 225	2670.93	928.50	844.41
225 - 275	2674.81	929.02	844.80
275 - 320	2678.11	929.46	845.19

Tabla F.2.- Números centrales de onda para los canales infrarrojos del satélite NOAA-10.

RANGO DE TEMPERATURAS (°K)	CANAL 3 (cm <sup>-1</sup> )	CANAL 4 (cm <sup>-1</sup> )
180 - 225	2658.53	908.73
225 - 275	2657.60	909.18
275 - 320	2660.76	909.58
270 - 310	2660.35	909.52

Nota: El rango 270 - 310°K es aplicable para temperaturas superficiales de mar.

Tabla F.3.- Números centrales de onda para los canales infrarrojos del satélite NOAA-11.

RANGO DE TEMPERATURAS (°K)	CANAL 3 (cm <sup>-1</sup> )	CANAL 4 (cm <sup>-1</sup> )	CANAL 5 (cm <sup>-1</sup> )
180 - 225	2663.50	926.81	841.40
225 - 275	2668.15	927.36	841.81
275 - 320	2671.40	927.83	842.20
270 - 310	2670.96	927.75	842.14

Nota: El rango 270 - 310°K es aplicable para temperaturas superficiales de mar.

Tabla F.4.- Números centrales de onda para los canales infrarrojos del satélite NOAA-12.

RANGO DE TEMPERATURAS (°K)	CANAL 3 (cm <sup>-1</sup> )	CANAL 4 (cm <sup>-1</sup> )	CANAL 5 (cm <sup>-1</sup> )
190 - 230	2632.713	920.0158	836.6847
230 - 270	2636.669	920.5504	837.0251
270 - 310	2639.61	921.0291	837.3641
290 - 330	2640.817	921.2741	837.5612

Nota: El rango 270 - 310°K es aplicable para temperaturas superficiales de mar.

Tabla F.5.- Números centrales de onda para los canales infrarrojos del satélite NOAA-14.

RANGO DE TEMPERATURAS (°K)	CANAL 3 (cm <sup>-1</sup> )	CANAL 4 (cm <sup>-1</sup> )	CANAL 5 (cm <sup>-1</sup> )
190 - 230	2638.652	928.2603	834.4496
230 - 270	2642.807	928.8284	834.8066
270 - 310	2645.899	929.3323	835.1647
290 - 330	2647.169	929.5878	835.374

Nota: El rango 270 - 310°K es aplicable para temperaturas superficiales de mar.

APÉNDICE G  
ALGORITMO DE LA  
TEMPERATURA SUPERFICIAL DEL MAR

Sea  $N(T)$  la radiancia de un cuerpo negro a una temperatura determinada  $T$ , a una longitud de onda específica. La radiación medida por un satélite es la suma de la radiancia desde el océano, más la radiancia emitida por la atmósfera, más la radiancia reflejada por el cielo desde su superficie. Esto puede ser representado como:

$$N_m(T_m) = \tau_a \epsilon_w N(T_s) + \epsilon_a N(T_a) + \tau_a r_w N_{\text{cielo}} \quad (\text{G.1})$$

donde  $N_m$ : radiancia medida en el satélite.

$\tau_a$ : transmitancia de la atmósfera.

$\epsilon_w$ : emisividad del agua.

$N(T_s)$ : radiancia de un cuerpo negro a la temperatura superficial del mar  $T_s$ .

$r_w$ : reflectividad del agua.

$N_{\text{cielo}}$ : radiancia desde el cielo.

Se sabe que la emisividad atmosférica se representa por:

$$\epsilon_a = 1 - \tau_a \quad (\text{G.2})$$

y que la emisividad del agua se describe como:

$$\epsilon_w = 1 - r_w \quad (\text{G.3})$$

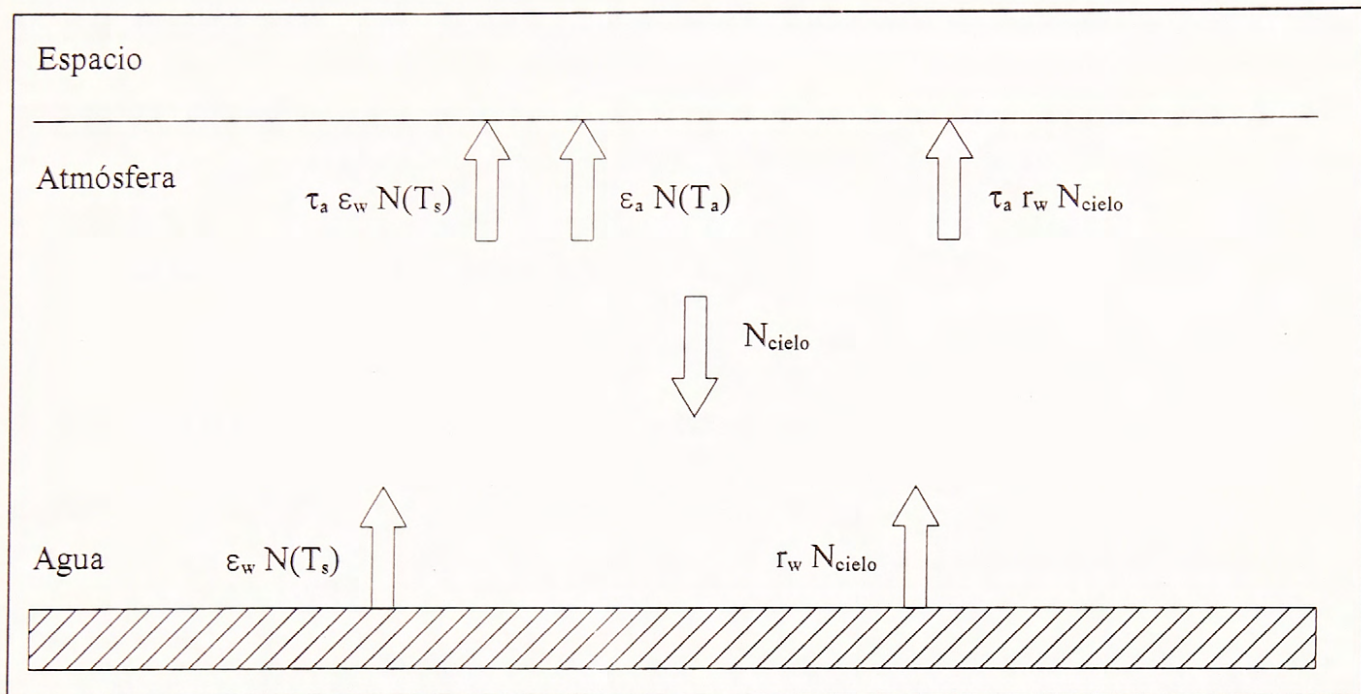


Figura G.1.- Radiancias medidas.

Substituyendo las ecuaciones (G.2) y (G.3) en la relación (G.1), se tiene:

$$N_m(T_m) = \tau_a (1 - \Gamma_w) N(T_s) + (1 - \tau_a) N(T_a) + \tau_a \Gamma_w N_{\text{cielo}} \quad (\text{G.4})$$

Reordenando los términos:

$$N_m(T_m) = \tau_a N(T_s) - \tau_a \Gamma_w N(T_s) + N(T_a) - \tau_a N(T_a) + \tau_a \Gamma_w N_{\text{cielo}} \quad (\text{G.5})$$

o también:

$$N_m(T_m) = \tau_a N(T_s) - \tau_a \Gamma_w N(T_s) \left[ 1 - \frac{N_{\text{cielo}}}{N(T_s)} \right] + (1 - \tau_a) N(T_a) \quad (\text{G.6})$$

Ya que el coeficiente de reflexión del agua es pequeño, lo podemos eliminar de la ecuación (G.6), quedando lo siguiente:

$$N_m(T_m) = \tau_a N(T_s) + (1 - \tau_a) N(T_2) \quad (G.7)$$

Si obtenemos la serie de Taylor de la ecuación anterior, manteniendo los dos primeros términos, se logra:

$$N_m(T_m) = N(T_s) + \frac{\partial N(T_s)}{\partial T} (T_m - T_s) \quad (G.8)$$

Sustituyendo (G.8) en el lado izquierdo de la ecuación (G.7):

$$N(T_s) + \frac{\partial N(T_s)}{\partial T} (T_m - T_s) = \tau_a N(T_s) + (1 - \tau_a) N(T_2) \quad (G.9)$$

Por otra parte la serie de Taylor para  $N(T_2)$  es:

$$N(T_2) = N(T_s) + \frac{\partial N(T_s)}{\partial T} (T_2 - T_s) \quad (G.10)$$

Sustituyendo lo anterior en la ecuación (G.9):

$$N(T_s) + \frac{\partial N(T_s)}{\partial T} (T_m - T_s) = \tau_a N(T_s) + (1 - \tau_a) \left[ N(T_s) + \frac{\partial N(T_s)}{\partial T} (T_2 - T_s) \right] \quad (G.11)$$

Al eliminar términos iguales en la ecuación anterior, y al dividir por  $\partial N(T_s)/\partial T$  tenemos:

$$T_m = \tau_a T_s + (1 - \tau_a) T_a \quad (\text{G.12})$$

La ecuación (G.12) es válida para dos canales (i y j) y puede ser reescrita para dos longitudes de onda como:

$$T_i = \tau_{ai} T_s + (1 - \tau_{ai}) T_{ai} \quad (\text{G.13})$$

y

$$T_j = \tau_{aj} T_s + (1 - \tau_{aj}) T_{aj} \quad (\text{G.14})$$

La diferencia  $T_i - T_j$  está dada por:

$$T_i - T_j = (\tau_{ai} - \tau_{aj})T_s + (1 - \tau_{ai}) T_{ai} - (1 - \tau_{aj}) T_{aj} \quad (\text{G.15})$$

Al multiplicar la ecuación (G.13) por  $\tau_{aj}$  y la ecuación (G.14) por  $\tau_{ai}$ , se generan las siguientes dos ecuaciones:

$$\tau_{aj} T_i = \tau_{ai} \tau_{aj} T_s + (1 - \tau_{ai}) T_{ai} \quad (\text{G.16})$$

$$\tau_{ai} T_j = \tau_{ai} \tau_{aj} T_s + (1 - \tau_{aj}) T_{aj} \quad (\text{G.17})$$

Ahora restamos la ecuación (G.17) de la ecuación (G.16), y así:

$$\tau_{aj} T_i - \tau_{ai} T_j = \tau_{aj} (1 - \tau_{ai}) T_{ai} - (1 - \tau_{aj}) T_{aj} \quad (G.18)$$

Sustrayendo la ecuación (G.18) de la ecuación (G.15), escribimos:

$$\begin{aligned} T_i (1 - \tau_{aj}) - T_j (1 - \tau_{ai}) = \\ T_s (\tau_{ai} - \tau_{aj}) + [(1 - \tau_{ai}) - \tau_{aj}(1 - \tau_{ai})] T_{ai} - [(1 - \tau_{aj}) - \tau_{ai}(1 - \tau_{aj})] T_{aj} = \\ T_s (\tau_{ai} - \tau_{aj}) + (1 - \tau_{ai})(1 - \tau_{aj}) T_{ai} - (1 - \tau_{aj})(1 - \tau_{ai}) T_{aj} \end{aligned} \quad (G.19)$$

Resolviendo para  $T_s$  se tiene:

$$T_s = T_i + \frac{1 - \tau_{ai}}{\tau_{ai} - \tau_{aj}} (T_i - T_j) - \frac{(1 - \tau_{ai})(1 - \tau_{aj})}{\tau_{ai} - \tau_{aj}} (T_{ai} - T_{aj}) \quad (G.20)$$

Entonces, en ausencia de nubes y realizando las observaciones en el nadir, la temperatura superficial del mar puede ser escrita como:

$$T_s = a_0 T_i + a_1 (T_i - T_j) + a_2 \quad (G.21)$$

Para las aproximaciones usadas aquí,  $a_0 \sim 1$ , debido a que en la temperatura superficial del mar, en la ausencia de nubes y con observaciones en el punto nadir, es aproximadamente igual a la temperatura brillante medida. El parámetro  $a_1 (T_i - T_j)$  corresponde a la transmitancia atmosférica; y el último término es una pequeña corrección asociada con las diferencias en las temperaturas brillantes de la atmósfera medidas a dos longitudes de onda diferentes.

## APÉNDICE H

### REFERENCIAS

- Bradford University Research Limited, 1993. NOAA AVHRR Receiving and Processing System. Bradford University Research Limited, 156 paginas.
- D'Souza, Giles, Alan S. Belward and Jean-Paul Malingreau, 1996. Advances in the Use of NOAA AVHRR Data for Land Applications. Kluwer Academic Publishers for the Commission of the European Communities, 479 páginas.
- Fajardo, Sergio y Manuel Quintero, 1994. Recepción y Demodulación de Señal Satelital en Formato HRPT. Universidad Técnica Federico Santa María, Facultad de Ingeniería, Departamento de electrónica, 162 páginas.
- Fischer, Alberte, 1991. Cuaderno B1, Bases Físicas de la Teledetección. Ediciones Universidad Católica de Chile, 85 paginas.
- Justice, C. O., 1986. Monitoring the Grasslands of Semi-Arid Africa Using NOAA-AVHRR Data. International Journal of Remote Sensing, Vol.7 No. 11 November 1986, 1383-1621.
- Kidwell, Katherine B., 1995. NOAA Polar Orbiter Data User's Guide. National Oceanographic and Atmospheric Administration, 456 paginas.
- Lira, Jorge, 1987. La Percepción Remota: Nuestros Ojos Desde el Espacio. Fondo de Cultura Económica S.A., 150 páginas.
- Lillesand, Thomas and Ralph Kiefer, 1979. Remote Sensing and Image Interpretation. John Wiley & Sons, second edition, 719 paginas.
- Llewellyn-Jones, D. T., P. J. Minnett, R. W. Saunders and A. M. Zavody, 1984. Satellite Multichannel Infrared Measurements of Sea Surface Temperature of the N.E. Atlantic Ocean Using AVHRR/2. Quart. J. R. Met. Soc. 110, pp. 613-631.

- Rao, C. R. N., and Chen, J., 1994. Post launch calibration of the visible and near-infrared channels of the Advanced Very High Resolution Radiometer on NOAA-7, -9 and -11 spacecraft, NOAA Technical report NESDIS 78, USDOC, Washington, D.C.
- Rees, W. G., 1990. Topics in Remote Sensing 1, Physical Principles of Remote Sensing. Press Syndicate of the University of Cambridge, 247 paginas.
- Research Systems, Inc., 1995. IDL User's Guide, Interactive Data Language Version 4. Research Systems, Inc. 632 paginas.
- Steffen, K., R. Bindshadler, G. Casassa y otros, 1993. Snow and Ice Applications of AVHRR in Polar Regions: Report of a Workshop Held in Boulder, Colorado, 20 May 1992. *Annals of Glaciology* 17 1993, pp. 1-17.
- Taggart, Ralph E., 1994. Weather Satellite Handbook. American Radio League, Inc. Quinta edición, 201 paginas.
- Zibordi, Giuseppe and Paolo Meloni, 1991. Classification of Antarctic Surfaces Using AVHRR Data: a Multispectral Approach. *Antartic Science* 3, pp. 333-338.

# Universidad de Magallanes

BIBLIOTECA

UNIVERSIDAD DE MAGALLANES

FACULTAD DE INGENIERIA

Demuestre que sabe cumplir con sus compromisos devolviendo con puntualidad este libro

GALLARDO;



M 1.979

