

SEGUIMIENTO MULTIESPECTRAL DE LA CLOROFILA_A SUPERFICIAL EN EL
CARIBE COLOMBIANO Y PARTE DEL CARIBE VENEZOLANO

VILMA VIVIANA OJEDA CAICEDO
COD. 092504

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE CIENCIAS
ESCUELA DE FÍSICA
BUCARAMANGA
2004

SEGUIMIENTO MULTIESPECTRAL DE LA CLOROFILA_A SUPERFICIAL EN EL
CARIBE COLOMBIANO Y PARTE DEL CARIBE VENEZOLANO

VILMA VIVIANA OJEDA CAICEDO
Trabajo De Investigación Presentado Como Requisito
Para Optar El Título De MAGÍSTER EN FÍSICA

Director
Dr. ARTURO PLATA GÓMEZ

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE CIENCIAS
ESCUELA DE FÍSICA
BUCARAMANGA
2004

A Dios, a mi Hija Sara Lucía, a mis Padres y Hermanos

AGRADECIMIENTOS

A La Universidad Tecnológica de Bolívar

A la NASA

Al Grupo de Óptica y Tratamiento de Señales de la UIS

Al Director: Dr. Arturo Plata Gómez

A mi Hija

A mi Familia

A mi Jefe: Luis Eduardo Rueda Rincón

A mi Mejor Amigo

Y a todos los que hicieron posible este trabajo de Investigación

CONTENIDO

	PAGINA
INTRODUCCIÓN	6
CAPITULO I	8
1 GENERALIDADES	8
1.1 ANTECEDENTES	8
1.2 EL PROBLEMA DE LA INVESTIGACIÓN	10
1.3 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN	11
1.3.1 Objetivo General	11
1.3.2 Objetivos Específicos	11
1.4 METODOLOGÍA	11
1.4.1 Selección de la zona de estudio y adquisición de imágenes del sensor	11
1.4.2 Procesado de imágenes	11
1.4.3 Análisis de imágenes	13
1.4.4 Resultados	13
CAPITULO II	14
2. MARCO TEÓRICO	14
2.1 Clorofila _a	14
2.2 Aspectos ópticos relevantes al sensoramiento remoto del fitoplancton desde plataformas satelitales.	15
2.2.1 Fundamentos del sensoramiento remoto	15
2.2.2 Interacciones Atmosféricas	16
2.2.3 Interacciones de la REM con la superficie del mar	17
2.2.4 Correcciones radiométricas	23
2.2.5 Correcciones geométricas	23
2.2.6 Mediciones hechas por el sensor	24
CAPITULO III	25
3. ZONA DE ESTUDIO E IMÁGENES A PROCESAR	25
3.1 Descripción De La Zona De Estudio	25
3.2 Imágenes a Procesar	27
3.3 Sensor SeaWiFS	27
CAPITULO IV	31
4. PROCESAMIENTO DE LAS IMÁGENES	31
4.1 Algoritmo de cálculo de la Clorofila _a	31
4.2 Etapas del Procesamiento de las imágenes	31
4.2.1 Procesamiento de <i>Level-1 (I1)</i> a <i>Level-2 (I2)</i>	32
4.2.2 Procesamiento de <i>Level-2 (I2)</i> a <i>Level-2 Map (I2map)</i>	33
4.2.3 Clorofila <i>HDF</i> en Matlab	33
4.2.4 Visualización y Cambio de formato de la imagen	34

CAPITULO V	35
5. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE IMÁGENES	35
5.1 Imágenes de concentración de clorofila_a desde el SeaDas y el Matlab	35
5.1.1 Distribución Espacial de la Clorofila_a	41
5.2 Análisis comparativo de la magnitud de los valores promedio de clorofila_a en la zona de estudio.	43
CAPITULO VI	46
6. CONCLUSIONES	46
7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	47
ANEXO I	51

TÍTULO:

SEGUIMIENTO MULTIESPECTRAL DE LA CLOROFILA_A SUPERFICIAL EN EL CARIBE COLOMBIANO Y PARTE DEL CARIBE VENEZOLANO.

AUTORES:

Vilma Viviana Ojeda Caicedo**

PALABRAS CLAVE:

SeaWiFS, Clorofila_a, SeaDas, Procesamiento digital, imágenes satelitales.

RESUMEN

Uno de los problemas básicos de la oceanografía es el examen sinóptico y continuo de las propiedades de una región oceánica. En el mar se pueden estudiar intensamente una área pequeña alrededor de un barco, pero no se puede al mismo tiempo comparar, con condiciones críticas que están ocurriendo simultáneamente a 5 ó 100 Km. de distancia. Los sensores volando en satélites han extendido el área de estudio y han proporcionado la habilidad de observar repetidamente grandes regiones del océano.

En el presente trabajo de investigación se encontró la concentración de clorofila_a en el caribe colombiano y parte del venezolano, a través de imágenes de color del océano, para este caso, imágenes del satélite SeaStar. El procedimiento consistió en realizar una selección de imágenes de color del océano en nivel 1A del sensor SeaWifs, que cubriera el área de estudio y que correspondiera a la misma época del año. El criterio de selección fue primar la ausencia de nubes en la zona, luego se preprocesaron para efectuar mosaicos en periodos de tiempo conveniente para visualizar el cambio periódico de la clorofila_a y así se identificaron cuatro zonas con mayor concentración de clorofila_a: Zona 1 entre Punta Piedra y Punta Gigantón, zona 2 entre Punta Canoas y Punta Faro, zona 3 en Punta Espada y zona 4 en el golfo de Maracaibo.

Para el procesamiento de las imágenes se utilizaron los algoritmos analíticos implementados para el sensor y la corrección atmosférica de las imágenes SeaWifs se realizó con el procesador SeaDas, para obtener el nivel 2 y 3 de las misma con el fin de poder realizar los cálculos de concentración superficial de clorofila_a. Como alternativa para comparar resultados se utilizo el Matlab para hacer procesamiento digital de imágenes después de tener las imágenes en el nivel 3.

* Proyecto de grado en la modalidad trabajo de investigación.

** Facultad Ciencias Básicas, Escuela de Física, Posgrado en Física, Director: Dr. Arturo Plata Gómez.

TITLE:

MULTIESPECTRAL TRACKING OF CHLOROPHYLL_A SURFACE IN THE COLOMBIAN CARIBBEAN AND PART OF THE VENEZUELA CARIBBEAN.*

AUTHOR:

Vilma Viviana Ojeda Caicedo**

WORDS KEYS:

SeaWiFS, Chlorophyll_a, SeaDas, Digital processing of images, Satellite images.

Abstract

One of the basic problems of oceanography has to do with the synoptic and continuous examination of the properties of an oceanic region. In the sea these properties can be studied in detail in a small area around a boat. But, at the same time, it is not possible to compare the properties of the region with critical conditions that are happening simultaneously at a distance of 5 or 100 km of distance. The sensors flying in satellites have extended the study area and have provided the ability to repeatedly observe great regions of the ocean.

In a quantitative research study, the concentration of chlorophyll_a have been found through the images of the ocean colour in the Colombian Caribbean Sea and part of the Venezuela Caribbean Sea. These images have been observed through the SeaStar satellite. The methodological procedure was to collect a number of ocean images at the 1A level of the sensor SeaWiFS. This only covered the geographical area of study and the seasons of the year. The selection criterion was to give priority to the absence of clouds in the area. Afterwards, the images were analyzed to create mosaics in convenient periods of the to, in turn visualize the periodical changes of the chlorophyll_a . Thus place with higher concentration of phytoplankton in the study site were identified (four representative zones, were identified 1 between Punta Piedra and Punta Gigantón, zone 2 between Punta Canoas and Punta Faro, zone 3 in Punta Espada, and zone 4 in Lago de Maracaibo). This led to quantitative analyses of the concentration level of the subject of study. To analyze the images analytic algorithms were used to fit the sensor. The atmospheric correction of the SeaWiFS images was made with the SeaDas software and Matlab software to obtain levels two and three of the images.

* Proyecto de grado en la modalidad trabajo de investigación.

** Facultad Ciencias Básicas, Escuela de Física, Posgrado en Física, Director: Dr. Arturo Plata Gómez.

INTRODUCCIÓN

Uno de los problemas básicos de la oceanografía es el examen sinóptico y continuo de las propiedades de una región oceánica. En el mar se pueden estudiar intensamente una área pequeña alrededor de un barco, pero no se puede al mismo tiempo comparar, con condiciones críticas que están ocurriendo simultáneamente a 5 ó 100 Km. de distancia. Los sensores volando en satélites han extendido el área de estudio y han proporcionado la habilidad de observar repetidamente grandes regiones del océano.

Sin embargo, debido a que la colección de datos está limitada necesariamente a la radiación electromagnética, la información oceanográfica obtenible directamente está restringida a las capas superficiales del océano (*La Violette, 1974*). Independientemente de los sensores que se desarrollen en el futuro, una limitación que nunca dejarán de tener es que el 90% de la luz visible ascendente que emerge de la columna de agua hacia la atmósfera se origina en la primera profundidad óptica. Esta corresponde a la profundidad en la que la irradiancia descendente se atenúa al 37% con respecto a la que incide inmediatamente por debajo de la superficie. Si consideramos que el fondo de la zona eufótica es la profundidad donde la luz se atenúa hasta el 1% del valor superficial, la zona eufótica tiene 4.6 profundidades ópticas. Por lo tanto, los datos de sensores remotos proveen información de "promedios" de los componentes ópticos y de las propiedades ópticas del agua de mar aproximadamente del primer 22% de la zona eufótica (*Kirk, 1994*).

A partir de las imágenes de pigmentos y utilizando diferentes modelos es posible calcular la producción nueva de los océanos, la cual representa el componente crítico que limita el transporte de CO₂ de la superficie a las aguas profundas por la biota, y también representa el límite máximo de biomasa extraíble de un ecosistema sin colapsarlo. Esta herramienta abre una nueva posibilidad para el estudio de los flujos de carbono en las escalas regional y global, y de días a años. El producir información sobre la productividad orgánica a partir de las imágenes de espectroradiómetros remotos es también útil para un mejor manejo de las pesquerías oceánicas y para entender mejor el impacto de fenómenos naturales que pueden ser catastróficos como los eventos ENSO (El Niño-Oscilación del Sur).

Una oportunidad única obtenida a partir de sensores remotos es la aplicación a grandes escalas de modelos que estiman la producción de clorofila_a en el mar. El desarrollo de estos modelos ha estado hasta ahora restringido a aguas oceánicas, debido a la escasa información con la que se cuenta y a la complicación que tiene estudiar aguas costeras constituidas por una gran diversidad de componentes en suspensión.

En la actualidad existe al servicio de la investigación, todo un conjunto de herramientas especializadas que ayudan a realizar el procesamiento de imágenes. Estas herramientas pueden ser utilizadas para predecir y caracterizar los conjuntos de sistemas existentes en el mar y sus movimientos, utilizando imágenes satelitales, alternativa que en el ámbito de la región caribe y muchas otras regiones de Sur América, se ha desarrollado poco.

El procesamiento de imágenes satelitales, es una herramienta importante que ayuda a estudiar, analizar y caracterizar una imagen obteniendo de ella gran cantidad de información.

El soporte fundamental de esta investigación es el estudio de la concentración que presenta la clorofila_a en el mar caribe Colombiano y parte del venezolano, basándose en una gama de frecuencias que este puede irradiar, al ser afectado por los rayos del sol. Para muchas regiones del mundo el color del océano esta determinado primariamente, por la abundancia de clorofila_a y sus pigmentos de fotosíntesis asociados. Las imágenes satelitales muestran de forma estandarizada las concentraciones de clorofila_a en azul y verde, donde a medida que la concentración de los pigmentos de clorofila_a se incrementan se produce un cambio de azul a verde.

La clorofila_a juega un significativo papel en los procesos de intercambio océano-atmósfera de gases de vital importancia, desde el punto de vista climático, como el CO₂ (segundo contribuyente del efecto invernadero), y el dimetilsulfuro (principal fuente de núcleos de condensación de nubes en la atmósfera marina). Por esta razón los estudios climáticos regionales incluyen la distribución y riqueza de la clorofila_a a través de las imágenes de satélite de color del mar.

Las imágenes satelitales además de permitir adelantar investigaciones relacionadas con la oceanografía, permiten experimentar en otros campos, como el control de la polución y la meteorología. Por ejemplo se pueden observar gases y partículas suspendidas en la atmósfera existiendo la posibilidad de determinar la precedencia u origen, dispositivos y mecanismos de dispersión de la polución atmosférica. En cuanto a la oceanografía se pueden determinar, concentraciones de calor, cantidad de partículas muertas suspendidas en la superficie del océano, entre otras. También se puede determinar la onda de flujos exteriores de radiación al nivel de la atmósfera que determina la variación del clima de la tierra.

El uso de imágenes multiespectrales captadas por satélites se ha convertido en una gran herramienta para la extracción de datos destinados a diferentes aplicaciones de investigación de recursos naturales. La obtención de la información espectral registrada por los sistemas en las diferentes partes del espectro electromagnético, depende principalmente de la calidad de la representación de los datos contenidos en las imágenes producidas por sensores multiespectrales.

Las técnicas de procesamiento digital de imágenes, además de permitir analizar una escena en diferentes regiones del espectro electromagnético, también posibilitan la integración de varios tipos de datos, debidamente registrados.

Los pasos necesarios para poder calcular la producción de clorofila_a basándose en imágenes de concentración de pigmentos derivados de observaciones satelitales son: regionalizar el área de estudio, determinar la variación vertical de la clorofila, obtener los parámetros foto síntesis-irradiancia representativos para cada región y temporada, y aplicar modelos de producción primaria.

En el capítulo I de esta tesis se consigna antecedentes sobre el tema estudios de las aguas oceánicas en Colombia y en Venezuela, el problema de investigación, los objetivos del proyecto y la metodología a seguir en el desarrollo del trabajo. En el capítulo II se presenta el marco teórico dentro del cual se presentan de la clorofila_a, así como una introducción a las bases del sensoramiento remoto, involucrando en ello los aspectos ópticos relevantes al estudio de la clorofila_a, desde plataformas satelitales. En el Capítulo III se presenta una descripción de la zona de estudio y de las imágenes a procesar. En el capítulo IV se describe como se realizó el procesamiento de las imágenes satelitales para poder obtener los valores de la concentración de clorofila en la zona de estudio. En el Capítulo V se presentan los resultados y el análisis de las imágenes satelitales procesadas y finalmente las conclusiones y referencias bibliográficas son presentadas en los Capítulo VI y VII respectivamente.

CAPITULO I

1. GENERALIDADES

1.1 ANTECEDENTES

Hasta hace poco el seguimiento de los procesos físicos se hacía con la medición de salinidad, nivel del mar, temperatura superficial del mar y corrientes, como las variables claves, que se medían en estaciones costeras e insulares o en barcos de investigación. Basándose en los datos obtenidos de estas mediciones se ha logrado describir una gran diversidad de procesos físicos en las áreas marítimas de Colombia. A continuación se destacan algunos de los trabajos realizados.

El primer estudio del que se tiene conocimiento, se realizó ente 1965 y 1966 con el nombre de “ACENTO” (Del inglés: *The Augmented Colombian el NIÑO Tuna Oceanography*) obteniendo la variación estacional y espacial de las propiedades físicas y químicas del Pacífico Colombiano, además de encontrar la presencia de un frente salino en el litoral Pacífico colombiano (Forsbbergh, 1969).

(Muller, 1983), establece que la influencia del fenómeno del Niño-Oscilación del sur, entre 1982 y 1983 en el pacífico oriental tuvo manifestaciones a nivel de circulación superficial de aguas tropicales que eventualmente afectaban la circulación en el Pacífico colombiano, en cuanto a aumento de velocidad de la corriente ecuatorial del norte. En 1990 se realizaron los análisis de las series históricas de la temperatura superficial del mar y del nivel del mar registrados en Tumaco y Buenaventura (Pabón, 1991), identificando la variabilidad interanual de estas variables en el Pacífico colombiano, asociadas al fenómeno del niño. (Ñañez, 1993), analizó el comportamiento de la dinámica marina, la incidencia de los procesos atmosféricos sobre los procesos oceánicos y el conocimiento de la estructura de agua, obteniendo como resultado la incidencia de la interacción térmica entre el océano y la atmósfera en la determinación del campo dinámico del pacífico Colombiano y la influencia de la zona de convergencia intertropical.

En el caribe colombiano entre los primeros trabajos realizados se encuentra el de los cruceros Océano I a IX, en el periodo de 1969 a 1984. En 1978 se realizó el primer trabajo sobre surgencia costera en proximidades de la Guajira (Fajardo, 1978). En 1981 se presenta el análisis de la circulación costera en el caribe noroccidental colombiano (Corredor, 1981). En 1986 se estudia la influencia de la contracorriente Panamá – Colombia para la circulación de las aguas en la plataforma continental (Pujos et al, 1986). En 1990 se realizó el análisis de la circulación de las aguas en el Caribe Colombiano en donde se encontró que el proceso de surgencia elevaba aguas desde los 150 m a los 200 m de profundidad (Donoso, 1990).

(Corredor & Morell, 2001) describen la variabilidad temporal y vertical de la estructura de la masa de agua, de sus alimentos y materia orgánica disuelta y de la clorofila_a del fitoplancton, con énfasis en la variabilidad característica de las aguas del Caribe tropical.

Los proceso biológicos marinos observados en Colombia muestran una variedad de organismos, desde unicelulares (Tait, 1971; Borstad & Borstad, 1976; Balech, 1977; Lozano 1978), hasta los ecosistemas más complejos como los arrecifes de coral (Goreau, 1959, 1973; Prahl., 1983; Corredor, 1984), las praderas de fanerógamas (Laverde, 1994), los ecosistemas de manglares y lagunas (Sanchez et al, 1997), entre otros. Todos estos ecosistemas y organismos están relacionados con el fitoplancton, primera fase de la cadena trófica en el océano.

El fitoplancton marino es un conjunto de algas unicelulares microscópicas que flotan en la superficie del océano y son transportadas pasivamente por las corrientes (Tait, 1971; Purdie, 1996 en : Rojas & Pabón, 2000); en su mayoría se constituyen con microorganismos, los cuales sistemáticamente están

constituidos por grupos de diatomeas, heterocontas, cianofíceas, clorofíceas, flagelados (Balench, 1977; Escobar, Castillo & Barbosa, 1993). Es así como en Colombia se han encontrado, cerca de 1314 especies de algas (Duque, 1996 en: Melo, 2002).

En el fitoplancton se encuentran pigmentos asimiladores como clorofilas, los carotenoides y las ficobilinas, los cuales absorben la energía lumínica necesaria para fotosintetizar los compuestos orgánicos a partir de los inorgánicos, proceso denominado fotosíntesis (Balech, 1977, Weyl, 1970 en: Rojas & Pabón, 2000). Un pigmento es cualquier sustancia que absorbe luz y su color resulta de la longitud de onda de la luz no absorbida. Los pigmentos tienen su característico y propio espectro de absorción. Se considera que la clorofila_a es el más importante debido a que es el pigmento fotosintético fundamental que no falta en ninguna alga ni planta superior. La cantidad de clorofila_a puede representar la actividad biológica y a través de la misma se puede inferir sobre procesos más complejos que ocurren en el ambiente marino.

La dinámica del fitoplancton está ligada a la circulación marina, atmosférica y su productividad en aguas tropicales puede estar controlada por el suministro de nitrógeno en la zona eufótica (Corredor, 1976). (Corredor, 1979), evidencia que el enriquecimiento de nutrientes inorgánicos a través de surgimiento de aguas al este de Caribe colombiano, estimula el crecimiento del fitoplancton.

Estudios en el archipiélago de San Andrés y Providencia, en donde la corriente del Caribe, al chocar con las variaciones geomorfológicas, provoca la formación de movimientos ciclónicos que favorecen la surgencia de aguas profundas y aumentan la productividad en ciertas áreas (Arias, 1994; Giraldo, 1994).

La actividad biológica también se ha descrito mediante el análisis de clorofila_a (Andrade, 1995), usando sensores remotos (CZCS) estudio la variabilidad anual del contenido de clorofila y de carbono orgánico en la superficie del mar Caribe.

(IDEAM, 2002), En general, en la región Caribe se observa la concentración de pigmentos sobre la costa de La Guajira, en los Cabos de la Vela y la Aguja durante la época de surgencia activa, en el Golfo de Urabá y en la desembocadura del río Magdalena, lugares que se ven influenciados por la dirección de los vientos, los influjos de aguas y sedimentos continentales y los afloramientos de masa de agua subtropical.

Los procesos que ocurren en el mar y que se presentan en la capa de mezcla, están afectados por los procesos atmosféricos. La relación océano-atmósfera esta influenciada por las corrientes y las surgencias marinas, las cuales son controladas por el viento. Según (Corredor 1976, 1979, 1993), la surgencia que se observa en La Guajira, está asociada a los vientos Alisios estacionales que soplan con regularidad en sentido paralelo a la costa a lo largo del margen sur del Caribe, siendo los vientos de Este a Noreste durante el 81% del tiempo.

Según (Melo, 2002), los procesos de surgencia durante el año son mas intensos, para el Caribe colombiano en el mes de enero, abril y julio cuando los vientos Alisios en la región asumen su mayor velocidad.

A partir de 1997 el IDEAM inicia el uso en Colombia de sensores remotos para el seguimiento de los procesos marinos, especialmente de medidas de temperatura superficial del mar con la ayuda del AVHRR de la NOAA (Rojas & Pabon, 1998).

En IDEAM, 2002 realizó el análisis de la variables temperatura del mar y clorofila_a en las áreas marítimas colombianas (Melo, 2002).

Diferentes estudios alrededor del mundo han permitido comprobar la utilidad de las imágenes satelitales, principalmente para detectar cambios y cartografiar zonas litorales, vegetación en pantanos, frentes de plumas o de turbidez, masas de diferente calidad de aguas (Klemas & Gross, 1987).

También se han hallado distribución de pigmentos en el mar Caribe desde observaciones espaciales (Muller, McClain, Fisher, Esaias, Varela, 1989). Así como la variabilidad de pigmentos en el mar Caribe por medio del Costal Zone Color Scanner (Muller, Karger, 1988)

(Mueller, 1991), utilizando las imágenes satelitales (Balech, 1977), caracterizan y determinan factores de crecimiento producción y movimiento del Fitoplancton (Bauer, 1993).

Investigadores en sensores remotos y zonas costeras han implementado algoritmos necesarios para el estudio de las variables hidrológicas en aguas estuarinas y oceánicas, analizando la respuesta espectral de la interacción entre aguas fluviales y marinas (Gagliardini et al, 1984; Mayo et al, 1993). Concentraciones de pigmentos fotosintéticos como indicador del carácter e intensidad de los procesos oceanográficos en el occidente del gran caribe (Melo et al, 1998).

La región oriental del Caribe ha sido objeto de múltiples estudios que demuestran que la alta variabilidad de sus condiciones oceanográficas, surgencias en su margen sur y la descarga de los ríos Orinoco y Amazonas produce fluctuaciones en la riqueza planctónica (Smayda, 1965; Jromov, 1967; Margalef, 1969; Muller-Karger, 1989). La región occidental por otro lado, ha sido poco estudiada, y los trabajos realizados no han tenido un carácter sistemático.

Melo (Melo et al, 1995) describe la estacionalidad de la densidad de pigmentos superficiales en el Caribe a partir del análisis de una serie de imágenes promedio mensuales de color del mar durante tres años (1979-1981), usando el sensor CZCS.

En el Caribe venezolano la clorofila_a, ha sido estudiada con regularidad a partir de la década de 1950. Investigadores como Hustedt (Hustedt, 1956), Margalet (Margalet, 1965) y Halim (Halim, 1967) han realizado valiosos aportes sobre el conocimiento de este grupo en el país. A partir de los años setenta, los investigadores Ferraz-Reyes y Reyes-Vásquez inician sus labores en el Instituto Oceanográfico de Venezuela dando origen a la mayoría de los trabajos sobre el fitoplancton y formando a casi todos fitoplanctonólogos marinos de Venezuela. A pesar de los trabajos taxonómicos realizados por este equipo, hasta el momento no existe un catálogo de los organismos encontrados y la mayoría de los trabajos no han sido publicados. Un esfuerzo inicial ha sido realizado por Spiniello (Spiniello, 1996) quien presenta una lista de las diatomeas marino-costeras de Venezuela. Sin embargo, Spiniello no diferencia entre aquellas especies de diatomeas que han sido identificadas y aquellas de las que existe una diagnosis formal; la autora no incluye los trabajos de Reyes-Vásquez (Reye, 1971), Velásquez F. (Velásquez, 1987), y Argotti Córcega (Córcega, 1993); aparte de que algunas de las localidades citadas son incorrectas.

Los trabajos de investigación anteriormente descritos, y muchos otros no mencionados tienen como punto de partida las imágenes satelitales.

1.2 EL PROBLEMA DE LA INVESTIGACIÓN

En la actualidad se ha incorporado muy poco el procesamiento de imágenes satelitales en el seguimiento y análisis de procesos marinos sobre grandes escalas en Colombia, a pesar de las ventajas que ofrece la disponibilidad de sensores remotos situados en los satélites artificiales orbitando sobre la Tierra.

El análisis digital de datos, más específicamente, imágenes digitales de percepción remota orbital ha posibilitado, en los últimos años, un gran desarrollo de las técnicas orientadas a la exploración de datos multidimensionales, adquiridos por diversos tipos de sensores.

El uso de imágenes multiespectrales captadas por satélites tales como, Landsat, SPOT, ERS1, NOAA, CZCS, SeaWiFS y muchos mas, se ha mostrado como una valiosa herramienta para la extracción de los datos destinados a diferentes aplicaciones de investigación. La obtención de las informaciones

espectrales registradas por los sistemas en las diferentes partes del espectro electromagnético, depende principalmente de la calidad de la representación de los datos contenidos en las imágenes producidas por sensores multiespectrales.

Las técnicas de procesamiento digital de imágenes, además de permitir analizar una escena en diferentes regiones del espectro electromagnético, también posibilitan la integración de varios tipos de datos, debidamente registrados.

Dadas las ventajas que ofrecen estos sistemas se hace necesario utilizar esta herramienta en la caracterización de la concentración de clorofila_a en el mar Caribe Colombiano y parte del Caribe venezolano, ya que ésta, puede representar la actividad biológica y a través de la misma se puede inferir sobre procesos más complejos que ocurren en el ambiente marino.

Viendo la importancia que representa el conocimiento de la clorofila_a del mar Caribe Colombiano y parte del Caribe Venezolano, se procesaron imágenes del satélite SeaStar de los años 1997 a 2003, cuyo formato es leído en el software libre de la NASA, SeaDas, con el fin de hacer una aproximación a la caracterización de la clorofila_a.

¿Qué hacer para conocer y predecir la concentración de clorofila_a que describe, en el mar Caribe colombiano parte del Caribe venezolano?

1.3 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

1.3.1 Objetivo General

Encontrar la concentración y de la clorofila_a en el mar Caribe Colombiano y parte del mar Caribe Venezolano, basándose en imágenes del satélite SeaStar.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Adquirir y preprocesar un conjunto de imágenes obtenidas por el satélite SeaStar para encontrar fitoplancton.
- Efectuar mosaicos en periodos de tiempo conveniente para visualizar el cambio periódico del conjunto de microorganismos fitoplancton.
- Identificar puntos de la zona de estudio con mayor concentración de fitoplancton.
- Realizar un reporte estadístico del nivel de concentración del conjunto de microorganismos fitoplancton, que sirva para la toma de decisiones.

1.4 METODOLOGÍA

1.4.1 Selección de la zona de estudio y adquisición de imágenes del sensor

La zona de estudio escogida fue el Caribe colombiano y parte del venezolano por la importancia que tiene esta zona para nuestro país. Ya teniendo la zona de estudio se procede a la adquisición de imágenes y por ende del sensor receptor de la misma. El sensor escogido fue el SeaWiFS, situado a bordo del satélite OrbView-2. Se dispuso de un total de 1630 imágenes, las cuales fueron obtenidas por intermedio de la NASA en la franja correspondiente a la zona de estudio. Una vez obtenidas las imágenes se seleccionan las que no contengan nubes ya que el principal problema que tiene una imagen de este tipo es la presencia de nubes; para que éstas no repercutan en los resultados, se eliminan del análisis.

1.4.2 Procesado de imágenes

El primer paso consiste en obtener el producto de concentración de clorofila. Las imágenes de SeaWiFS (sensor) que se obtuvieron de diferentes estaciones terrenas vía ftp desde la NASA son de tipo *level-1*, que contienen las radiancias de los ocho canales propios de este sensor más una serie de datos auxiliares. Para obtener el producto deseado se hace uso del programa SeaDAS (*Sea-WiFS Data Analysis System*, NASA/GSFC) que incorpora el algoritmo para el cálculo de la clorofila (Aiken et al, 1995). Una vez obtenido el fichero de *level-2* con el producto de clorofila, se procede a realizar la proyección al área de estudio, que para este caso ha sido el Caribe colombiano y parte del venezolano.

El procesado empieza (Figura 1) leyendo un fichero mediante una ventana gráfica, en el que se colocan todos los parámetros necesarios para realizar el procesamiento completo: directorios de entrada y salida, parámetros de la proyección final, tamaño de la imagen resultante y parámetros usados en el algoritmo de cálculo de la clorofila. Las tres etapas de que consta el proceso son:

- 1 La imagen de *level-1* se recorta por el norte y sur. Aunque esto no es estrictamente necesario, es conveniente hacerlo pues el procesado de *level-1* a *level-2* requiere mucho tiempo (más de 40 minutos en la mayoría de los casos) que se reduce si la imagen a procesar es más pequeña.
- 2 La imagen recortada se procesa para obtener de ella una imagen de *level-2* con la Clorofila_a Como producto resultante. Esta es la etapa que más tiempo de computación requiere. En este nivel de procesamiento ya se tiene correcciones atmosféricas, para las cuales son necesarias las características de la atmósfera en el día particular en la cual se tomo la medición. En la base de datos de la DAAC (*Data Access*) se seleccionan los datos meteorológicos que se necesiten, los cuales son colocados en un ftp para su acceso.
- 3 A la imagen de clorofila se le aplica una proyección geométrica. Se eligió una proyección de tipo cilíndrica equidistante de la costa del Caribe colombiano y parte del venezolano. Para procesar un área particular de la imagen, se deben introducir las coordenadas correspondientes a la zona, y el tamaño correspondiente de la imagen a ser generada.

Dado que las imágenes de clorofila se almacenan en formato HDF (NCSA, 1993), se ha tomado como el formato común para trabajar las imágenes alternativamente en el MATLAB.

Fuera del SeaDAS también se utilizo el MATLAB para hacer promedios entre las imágenes que ya están georeferenciadas y en formato HDF, Esto con el fin de tener otra herramienta de procesamiento de imágenes y poder comparar con los resultados del SeaDAS.

Para manipular las imágenes desde MATLAB hay que importarlas desde el *HDF Import tool* de MATLAB. Las imágenes HDF tienen la siguiente información: *data chlor_a* y *metadata chlor_a_info* que son los datos utilizados para poder realizar los respectivos promedios.

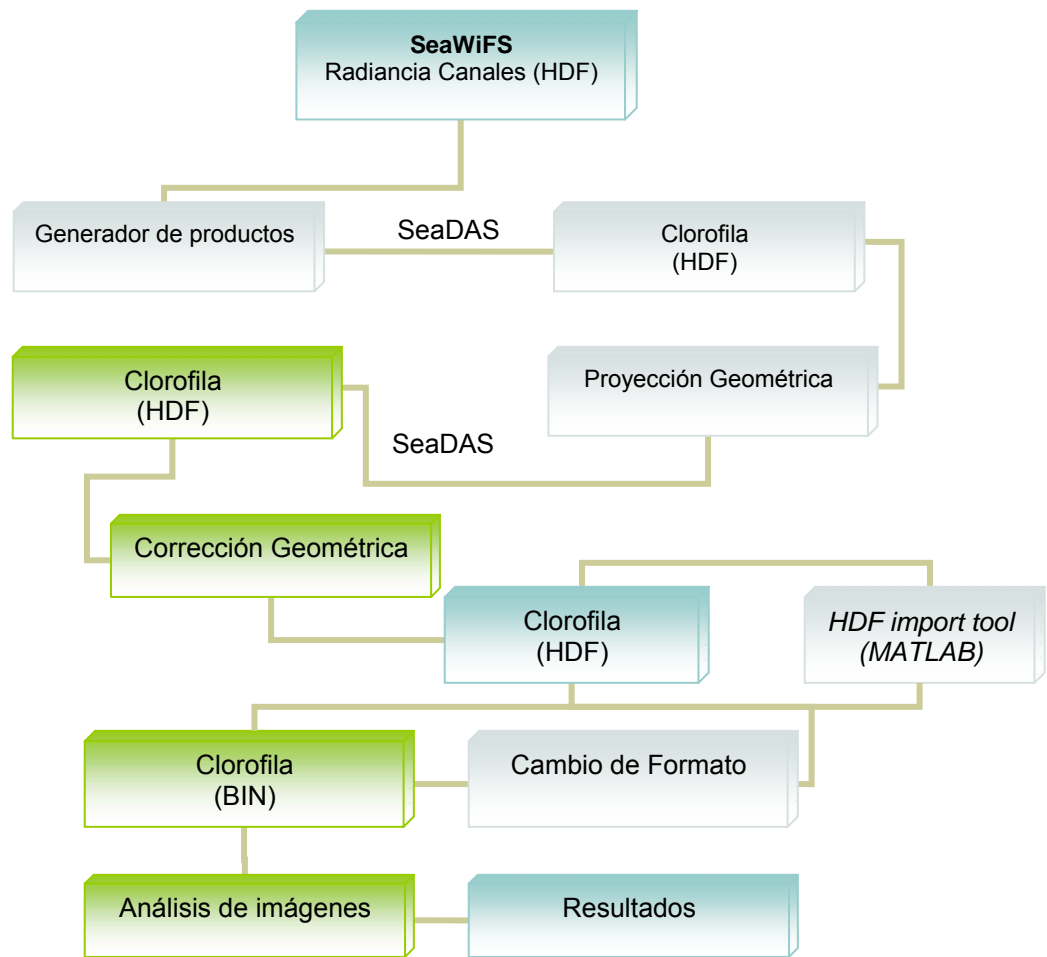


Figura 1. Esquema de la metodología seguida en el procesamiento de las imágenes

1.4.3 Análisis de imágenes

En el análisis de las imágenes se realizó:

- 2 Por fechas con el fin de poder obtener los valores de concentración de clorofila_a a lo largo del año.
- 3 Por regiones para identificar zonas con mayor valor de concentración de clorofila_a.

1.4.4 Resultados

Una vez realizado el análisis de las imágenes se pasa a la discusión de resultados.

CAPITULO II

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Clorofila_a

Las clorofilas son sustancias de color verde encontradas en las fanerógamas marinas y en todas las algas (Fajardo, 1978), estas sustancias se producen tanto en la oscuridad como en la luz (con mayor intensidad) y pueden ser distribuidas mediante un proceso de foto-oxidación, cuando la intensidad es muy alta.

Las moléculas de clorofila absorben fundamentalmente luz en dos longitudes onda, a 440 nm y 660 nm aproximadamente (Figura 2). De acuerdo a la ecuación de Plank $\left(E = \frac{hc}{\lambda}\right)$, cabría esperar que un fotón de longitud de onda cercana al azul proporcionase mayor energía que uno rojo pero, debido a la multiplicidad y solapamiento de los niveles electrónicos de la molécula de de clorofila, el resultado práctico es que ambos fotones inducen un estado de excitación similar. En consecuencia, la energía o fotosíntesis provocada por los fotones es muy similar, independiente de la longitud de onda que se considera.

La absorción de la luz por los diferentes pigmentos presentes en los organismos fotosintetizadores (Clorofila, ficobilinas, carotenoides, etc.) contribuyen en forma variable a la atenuación de la luz en profundidad, dependiendo de la productividad de las aguas. Esta es sin duda el componente al cual se le ha prestado más atención en oceanografía, y para el que existe en consecuencia una mayor cantidad de información.

La clorofila_a constituye aproximadamente del 1 al 2% del peso seco de la materia orgánica en todo el fitoplancton; convirtiéndose en un buen indicador para estimaciones de biomasa algal. Esta clorofila varía con la especie siendo afectada por la edad, rango de crecimiento, condiciones de nutrientes y luminosidad.

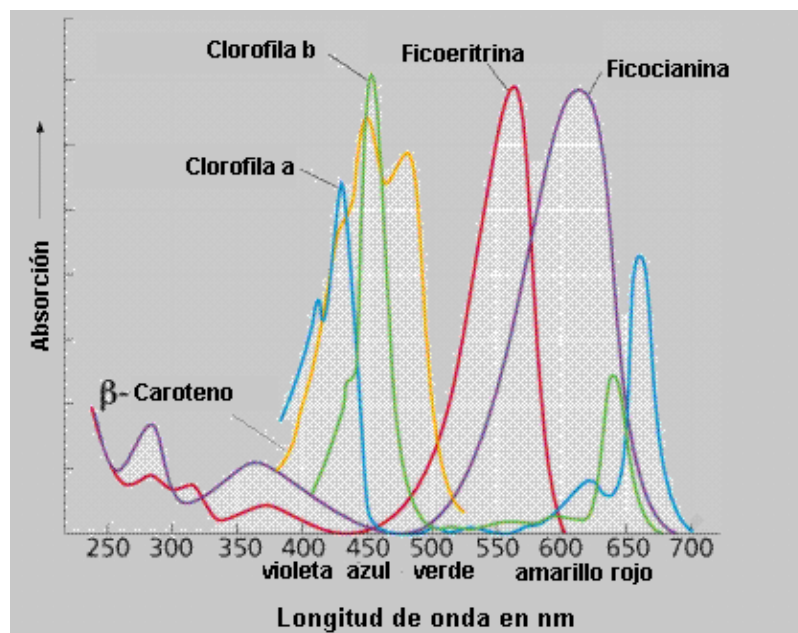


Figura 2. Espectro de absorción de la clorofila_a, y otros pigmentos

La clorofila_a es el principal pigmento fotosintético del fitoplancton. Su presencia afecta fuertemente las propiedades ópticas del agua oceánica.

2.1. Aspectos ópticos relevantes al sensoramiento remoto del fitoplancton desde plataformas satelitales.

2.1.1. Fundamentos del sensoramiento remoto

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

Los elementos involucrados para obtener una señal remotamente percibida son: la fuente de energía, la atmósfera, el objetivo y el sensor.

A pesar de la gran cantidad de sensores y plataformas que han sido lanzadas en estas dos últimas décadas, básicamente la observación remota del océano sólo es capaz de medir cuatro propiedades del mar:

- Temperatura en la superficie
- Color de las aguas cercanas a la superficie
- Rugosidad del océano (en pequeñas escalas de longitud)
- Pendiente del océano promediada sobre decenas de kilómetros

Es a partir de estas cuatro medidas primarias de donde se pueden derivar otras propiedades del océano. Por ejemplo, usando las bandas apropiadas en el visible, se puede estimar el contenido de clorofila y de ahí la producción primaria. Mediante la altimetría se pueden medir pendientes y deducir la dirección de las corrientes y su velocidad. La rugosidad puede ser convertida en velocidad del viento.

Los sistemas de sensoramiento remoto operan en diferentes partes del espectro: *visible (VIS)*, *infrarrojo (IR)* y *microonda (MW)*.

La radiación electromagnética (REM) es una forma de energía que puede ser únicamente observada por su interacción con la materia. La REM es una onda electromagnética y es afectada por las propiedades eléctricas y magnéticas de la materia con la cual entra en contacto.

Cuando un fotón emitido por un objeto alcanza un sensor causa una reacción física que puede ser amplificada y medida. Esta puede ser una señal de voltaje en un sistema electrónico. La teoría cuántica de Planck, establece que la energía, E , de un fotón puede ser descrita por:

$$E = h \nu \quad (1)$$

Siendo $h = 6.63 \times 10^{-34}$ [J.s], la constante de Planck y ν la frecuencia de la REM. Adicionalmente la relación entre velocidad, c , longitud de onda, λ y frecuencia ($c = \lambda \nu$) indica que mientras más corta es la longitud de onda, mayor será la cantidad de energía disponible; dado que hay menos energía en las bandas de longitudes de onda más grande.

Todo cuerpo que está a una temperatura mayor que el cero absoluto, constantemente emite radiación electromagnética. La cantidad de REM que es emitida por un objeto y su distribución espectral a una temperatura determinada, puede ser gráficamente descrita por una curva de emitancia espectral como se muestra en la figura (2). Esta figura es para un objeto hipotético e idealizado llamado **cuerpo negro** capaz de absorber y reemitir toda la energía que recibe independientemente de la longitud de onda.

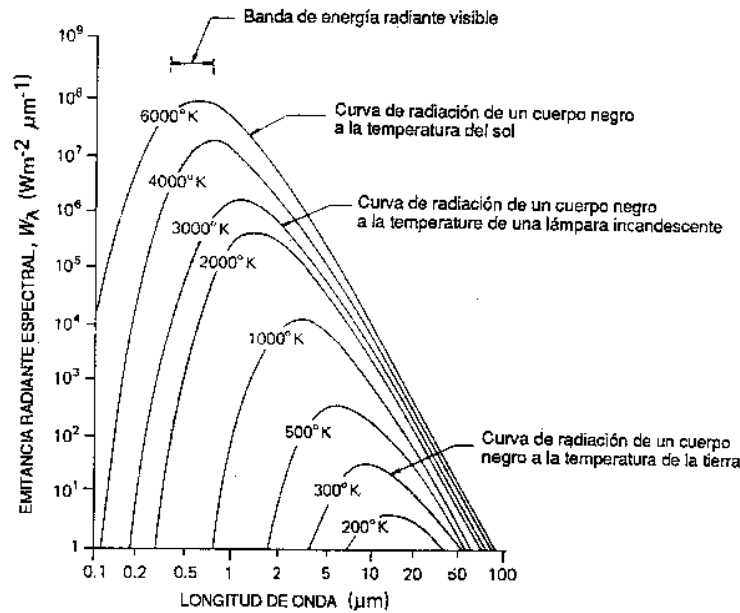


Figura 2. Emisancia Radiante Espectral para un Cuerpo Negro

Hay dos relaciones que describen la cantidad y las características espectrales de REM emitida por un cuerpo negro como una función de la temperatura, a saber: La Ley de Stefan Boltzman que indica la cantidad de energía por unidad de área y unidad de tiempo, R , emitida por un cuerpo negro, independientemente de la dirección:

$$R = \sigma T^4 \quad (2)$$

Donde σ es la constante de Stefan-Boltzman ($5.67 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$). La otra relación es la Ley del desplazamiento de Wien dada por:

$$\lambda_m T = \text{Constante} \quad (3)$$

El valor de la constante se determina experimentalmente y es igual a $2,89 \times 10^{-3} \text{ [m}^\circ\text{K]}$

Pese a que los cuerpos negros son hipotéticos, los materiales reales generalmente presentan un comportamiento similar de emisión, cuando menos dentro de ciertos rangos de longitud de onda. Sin embargo, emiten menos REM de la que podría ser emitida por un cuerpo negro a la misma temperatura. El cociente de emisión teórica y real es referido como la emisividad del material. Dadas las diferencias en emisividad, es algunas veces posible distinguir entre dos materiales que tienen la misma temperatura superficial, debido a la diferencia en la cantidad de radiación que emiten.

Finalmente la densidad de energía de la radiación del cuerpo negro, $\rho(\nu)$, en función de la frecuencia a una temperatura T , viene dada por la expresión:

$$\rho(\nu) = \frac{8\pi\nu^2}{c^3} \frac{h\nu}{\exp\left(\frac{h\nu}{k_B T}\right) - 1} \quad (4)$$

En la ecuación anterior k_B , es la constante de Boltzmann cuyo valor es $1,38 \times 10^{-23} \text{ J}^\circ\text{K}^{-1}$.

2.1.2. Interacciones Atmosféricas

La energía que recibe un sensor desde el objeto de interés debe pasar a través de la atmósfera. Los componentes gaseosos y las partículas de materia dentro de la atmósfera, pueden afectar la intensidad y la distribución espectral de la energía y pueden impedir la observación de características de la superficie. La magnitud de los efectos atmosféricos depende de factores tales como la longitud de la ruta, la longitud de onda siendo observada y las variaciones diarias de las condiciones atmosféricas. En el caso de la energía reflejada, la atmósfera interviene entre la fuente de iluminación y el objeto, así como también entre el objeto y el sensor (Barret & Curtis, 1992).

El efecto atmosférico más fácilmente discernible en longitudes de onda visible, es el de difusión. La dispersión es simplemente la reflexión de la energía por partículas en la atmósfera; mientras que las partículas individuales son pequeñas, su efecto neto puede ser bastante significativo si están presentes en cantidades apreciables. La dispersión de Rayleigh es causada por moléculas atmosféricas y partículas diminutas que son considerablemente más pequeñas que las longitudes de onda de la radiación a la que afectan. Este tipo de dispersión ocurre primariamente en las porciones ultravioleta y azul del espectro y de hecho, es responsable por la apariencia azul del cielo durante el día. Es también una de las principales causas de neblina en las imágenes. Cuando la REM se encuentra con partículas que son varias veces más grandes que las longitudes de onda afectadas, ocurre una reflexión múltiple no selectiva. El término no selectivo significa que todo lo reflejado de las longitudes de onda solar son afectadas mas o menos igual. Las gotas de agua en nubes o los bancos de niebla son dispersiones no selectivas; ellas aparentan ser blancas porque todas las longitudes de visible son reflejadas. Debido a sus longitudes de onda larga, los sensores de microondas no son afectados por las reflexiones múltiples atmosféricas y son por lo tanto capaces de “ver” a través de las nubes.

Debido a las reflexiones múltiples, la energía que es recibida por el sensor incluye reflexiones tanto de la atmósfera como el objeto. El componente de reflexión atmosférica es referido como la ruta de radiancia y se requieren algoritmos complejos para corregir este efecto.

A diferencia de las reflexiones múltiples que redirigen la REM y causan una pérdida de detalle, la absorción atmosférica realmente reduce el monto de energía en ciertas bandas de longitud de onda. A pesar que la atmósfera es esencialmente transparente en la porción visible del espectro, hay varias regiones en las cuales es parcial o totalmente opaco. Varios componentes de la atmósfera absorben energía en estas longitudes de onda que son llamadas bandas de absorción.

Cuando moléculas de gas absorben la REM, su nivel de energía es incrementado; esta energía es subsecuentemente reemitida como calor la cual es radiación térmica infrarroja. Las emisiones atmosféricas pueden degradar la señal que alcanza a un sensor desde un objeto de manera muy parecida en la que las reflexiones múltiples afectan a la energía reflejada. De nuevo, es posible corregir este efecto a través de comparar mediciones realizadas simultáneamente en diferentes bandas.

2.1.3. Interacciones de la REM con la superficie del mar

Cuando la REM interacciona con la materia puede ser reflejada, absorbida o transmitida. La percepción remota, sin embargo, se ocupa primariamente de cómo la REM es modificada por los medios terrestre y marino. En algunos aspectos las interacciones terrestres son más fáciles de describir, ya que, en la mayoría de los casos, éstas se llevan a cabo en la superficie de la tierra donde la transmisión no es un factor significativo. En el medio ambiente marino, por otra parte, ciertas longitudes de onda son transmitidas; la energía que alcanza al sensor puede provenir de la superficie del agua, de substancias en la columna de agua, o bien de materiales del fondo marino.

La reflexión de energía desde una superficie, es generalmente descrita como especular o difusa. La reflexión especular ocurre cuando la energía que es reflejada por la superficie, continúa viajando en una dirección y el ángulo de reflexión es igual al ángulo de incidencia. Este es el tipo de reflexión que es observada en espejos o desde superficies tranquilas del mar, en longitudes de onda visibles. En la

reflexión difusa, la energía reflejada, en contraste, es esparcida en todas direcciones. En realidad, la mayoría de las superficies no son reflectores ni perfectamente especulares ni perfectamente difusos sino que caen en algún punto entre estos dos extremos. Con fines de percepción remota, es el contenido espectral de la reflexión difusa el que generalmente provee la mayor parte de la información, cuando menos con respecto a la composición de los materiales de la superficie. La reflexión especular, sin embargo, puede ser útil en la caracterización de la superficie y de la geometría de diferentes áreas. El destello brillante de la luz del sol reflejado en aguas calmadas es un ejemplo de reflectancia especular; en la medida que la superficie del agua se hace menos tranquila, la reflectancia se hace más difusa a menos que el sol esté bajo en el horizonte (Barret & Curtis, 1992).

Cuando la REM alcanza un objeto, algunas de las longitudes de onda son reflejadas mientras que otras son absorbidas o transmitidas. En el espectro visible esta reflectancia selectiva de ciertas longitudes de onda es percibida como color. La cantidad de energía que es reflejada por un objeto en diferentes longitudes de onda (relativa a la energía que recibe) es denominada la reflectancia espectral que es una propiedad intrínseca de cada material.

Cuando es necesario distinguir dos o más características con curvas similares de reflectancia espectral, tales como especies de plantas diferentes, es posible adquirir datos desde una banda muy estrecha donde las diferencias en reflectancia son maximizadas. Alternativamente, puede ser posible utilizar sistemas de sensores que sean sensitivos a pequeños cambios en los valores de la reflectancia, es decir que tengan una resolución radiométrica fina. Estas técnicas pueden ser utilizadas para detectar variaciones o cambios dentro de un tipo dado de material. La utilización de imágenes provenientes de más de un canal permite identificar de manera más sencilla algunos fenómenos atmosféricos o características de la superficie.

Para materiales que no transmiten la REM, la energía incidente que no es reflejada es absorbida. Al igual que en la atmósfera, la energía absorbida, es subsecuentemente reemitida usualmente como calor. Cómo se describió previamente, la cantidad de energía emitida es una función de la temperatura y de la emisividad del material. Dado que la tierra emite más fuertemente en la región infrarroja térmica y que la emisividad del agua es esencialmente constante en este rango, se pueden utilizar medidores infrarrojos para determinar la temperatura del agua superficial con un grado razonable de precisión si las mediciones son calibradas. Aunque estas mediciones pueden también realizarse para materiales terrestres, las variaciones en emisividad de un material a otro hacen que la determinación de la temperatura absoluta, más que relativa, sea mucho más difícil de realizarse. Debe hacerse notar que la energía es únicamente emitida desde la superficie y que las condiciones superficiales pueden ser muy diferentes. Por ejemplo, una película de aceite en la superficie del agua parecerá ser más fría que el agua libre de aceite a la misma temperatura, ya que el aceite tiene más baja emisividad. Esta característica puede ser utilizada para detectar descargas no autorizadas o para operaciones de limpieza directa.

Hay otro tipo de emisión, llamado fluorescencia, en la cual la radiación absorbida es reemitida a longitudes de onda más larga sin que sea primeramente convertida en energía térmica. Muchos minerales fluorescen en el espectro visible cuando son expuestos a radiación ultravioleta. Las longitudes de onda emitidas por materiales fluorescentes son generalmente un número bien estrecho y bien definido de bandas que son características de materiales específicos. Para aplicaciones marinas, la fluorescencia puede ser utilizada para identificar clorofila, algas y varios tipos de contaminantes. La fluorescencia ocurre naturalmente debida a la radiación solar, o bien esta puede ser inducida por sensores activos equipados con láser. Para poder detectar fluorescencia, sin embargo, es necesario tener un sensor con resolución espectral lo suficientemente fina.

La transmisión de la REM a través del agua es importante cuando se necesita información sobre las condiciones o fenómenos debajo de la superficie. La transmisión, sin embargo, es esencialmente limitada al espectro visible y es mayor en las longitudes de onda azul y verde (Figura 3.a). Hay mayor transmitancia a través de agua clara que a través de agua turbia (Figura 3.b). Es quizá menos obvio que los picos de transmitancia cambien a longitudes de onda ligeramente más largas en la medida que el agua se hace más turbia. La transmitancia puede ser alterada por ciertos materiales orgánicos tanto naturales como elaborados por el hombre.

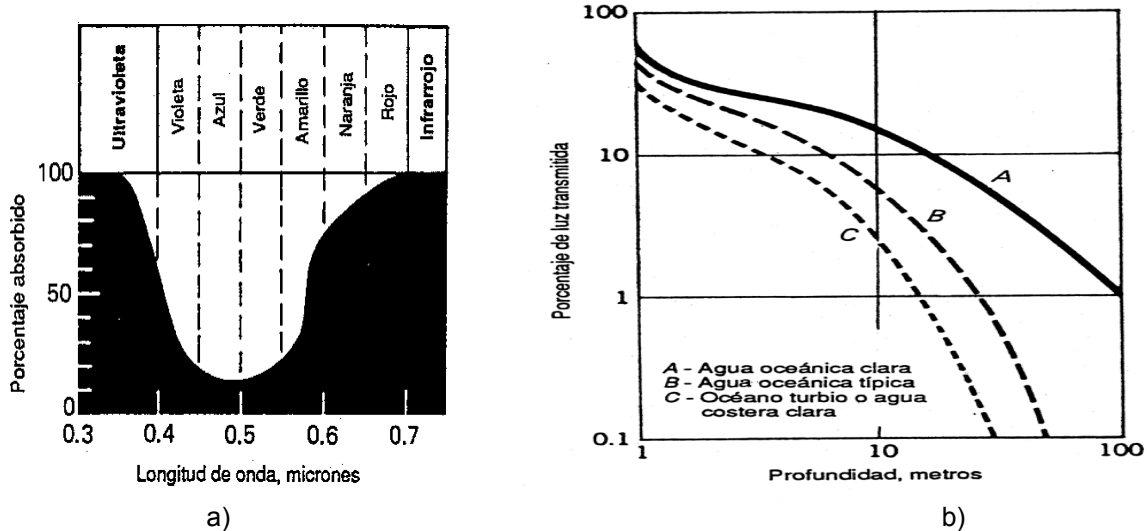


Figura 3. a) Porcentaje de absorción de agua pura a 10m de profundidad Vs. Longitud de Onda
 b) Variación de transmisión como una función de la profundidad para aguas marinas.

La energía que es detectada por un sensor puede ser reflejada por la superficie del agua, por partículas suspendidas en la superficie del agua o por materiales del fondo. En la medida que el porcentaje de luz que es transmitido decrece, la habilidad de “ver” en el agua es también deteriorada ya que la energía es atenuada al acercarse y al retirarse del reflector. Partículas suspendidas producen un efecto de dispersión de volumen que es análogo al causado por aerosoles atmosféricos; si la concentración es relativamente baja, su reflectancia es sobrepuesta a la reflectancia proveniente de materiales del fondo. A altas concentraciones, partículas suspendidas pueden efectivamente bloquear transmisiones hacia o desde bajas profundidades. En la ausencia de reflexiones de fondo, la reflectancia del agua puede ser utilizada para medir la concentración de materiales suspendidos. La presencia de clorofila es de particular interés para el manejo de pesquerías así como lo es también el índice de productividad primaria. En la medida que el nivel de clorofila se incrementa, existe un decremento en reflectancia entre 0.4 y 0.5 μm y a mayores concentraciones hay un incremento de reflectancia en el rango de 0.5 a 0.6 μm . Los sedimentos suspendidos descargados por ríos son particularmente grandes reflectores. El mapeo de estas plumas de sedimentos es un medio para estudiar los patrones de mezcla y circulación de aguas. Mediciones en las bandas de 0.6 y 0.7 μm muestran un alto grado de correlación con concentraciones de sedimentos suspendidos. Sin embargo, dado que se reflejan fuertemente en un amplio rango de longitudes de onda, altas concentraciones de sedimento pueden interferir o impedir mediciones de clorofila.

La energía que eventualmente llega a un sensor es reflejada o emitida por una variedad de componentes ambientales.

Al conocer los patrones de respuesta espectral de estos componentes, es posible determinar las regiones espectrales óptimas para su observación. El medio ambiente marino presenta oportunidades particulares y retos dadas sus características espectrales y su naturaleza dinámica.

El “color” del mar esta determinado por la dispersión, la absorción y reflectancia de la luz visible debido a la presencia de:

- agua
- material orgánico (particulado y disuelto)
- material inorgánico (particulado y disuelto)

A medida que la longitud de onda aumenta, la absorción aumenta también y la dispersión disminuye, lo que explica el típico color azul del agua pura.

La presencia de fitoplancton afecta altamente las propiedades ópticas del agua pura, ya que la clorofila absorbe fuertemente en algunas zonas del espectro. Además el fitoplancton tiene una estructura óptica que lo hace similar al material particulado, actuando como un difusor de la luz. El fitoplancton también está rodeado de material orgánico disuelto, el que contiene feofitina a, la que tiene otras características de absorción en el espectro. Dentro de la población de fitoplancton, el detritus de organismos muertos puede contener tanto esqueletos que contribuyan a la difusión de la luz, como material orgánico que contribuye a la absorción, aunque ya no exista clorofila en las células muertas. En consecuencia las aguas que contienen fitoplancton tienen diferentes proporciones de material absorbiendo y difundiendo la luz, dependiendo de las especies y edad de la población (Esaias, 1981). En la Figura 4 se puede apreciar ciertas características generales. Hay un máximo de absorción en los 440 nm y uno menor alrededor de los 675 nm; mientras que en el resto del espectro, en general la absorción disminuye con la longitud de onda. La retrodispersión es mayormente uniforme, excepto en mínimos que están ubicados en las longitudes de onda que corresponden a los máximos de absorción.

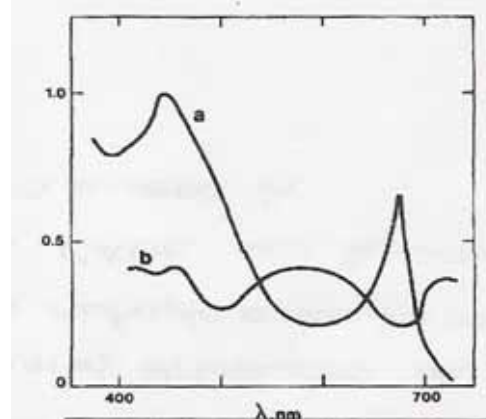


Figura 5. Variación espectral típica de a) absorción debida a la clorofila y b) coeficiente de retrodispersión específico

El material orgánico asociado con vegetación en proceso de putrefacción se conoce como “sustancia amarilla”. Esta influye sobre el color del agua a través de sus propiedades de absorción (Figura 5). Tiene un marcado máximo de absorción en el azul y muestra una disminución monotonía con la longitud de onda y una menor absorción en la zona amarilla del espectro. La sustancia amarilla no está relacionada con la productividad local del fitoplancton y se cree que es derivada del drenaje continental, encontrándose altas concentraciones en mares encerrados, como el Báltico. Esta sustancia puede servir como indicadora, desde el espacio, de la localización de plumas de ríos y de la dispersión de agua dulce en mares someros.

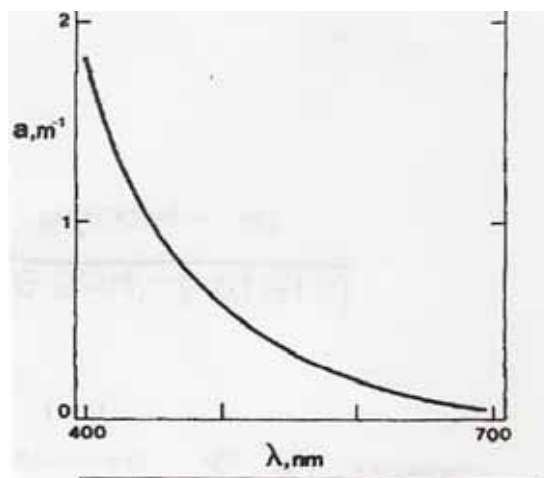


Figura 5. Espectro de absorción aproximado para las sustancias amarillas.

La otra contribución (y la más diversa) es el material particulado suspendido, no relacionado con el fitoplancton. Éste puede ser sedimentos de fondo resuspendidos, sedimentos arrastrados por ríos, material costero erosionado o sedimentos arrojados por proceso de dragado. Sus propiedades espectrales son muy diversas.

Debido a la complejidad óptica de las aguas donde existe fitoplancton, sustancia amarilla y sedimentos en suspensión, o perfiles espectrales a partir observaciones de color desde el espacio. Sin embargo, para interpretar el color del océano se deben usar observaciones empíricas de los espectros de reflectancia para diferentes tipos de agua. Para esto se dividen las aguas en dos categorías. Las aguas CASO I (Morel, 1997), que son aquellas cuyas propiedades ópticas dependen únicamente del fitoplancton y sus productos de degradación. Las aguas CASO II, tienen sedimentos que no están relacionados con la clorofila o sustancia amarilla en vez de fitoplancton. La Figura (6) muestra un perfil de reflectancia típico para aguas CASO I, la flecha muestra la forma en que cambia el perfil al aumentar la clorofila y la línea punteada es el espectro base para el agua pura. La combinación de retrodispersión y absorción del fitoplancton tiende a disminuir la reflectancia bajo el espectro del agua pura en las longitudes de onda bajas y alrededor de 540 nm, e incrementarlo levemente a λ mayores. Al incrementar la concentración de clorofila este efecto se ve aumentado, apareciendo un mínimo en los 440 nm, causado por la absorción de la clorofila. Otro mínimo aparece en los 660 nm, aunque el máximo de absorción en el rojo es enmascarado por un máximo aparente de reflectancia en los 685 nm debido a la fluorescencia. Aunque los valores de reflectancia absoluto varían de acuerdo a la especie de fitoplancton involucradas, la forma del perfil permanece similar. Esto sugiere que un algoritmo de clorofila para interpretar mediciones de radiancia en longitudes de onda visible desde el espacio entre bandas, más que en valores absolutos de reflectancia no varía mayormente con el contenido de clorofila en el intervalo 550 a 600 nm, más aún hay una tendencia de rotar el espectro en sentido antihorario sobre un punto de gozne en esta región, a medida que el contenido de clorofila aumenta. Esto sugiere que una relación espectral para calibración debería ser entre bandas cerca del mínimo de absorción y una banda en esta región de gozne.

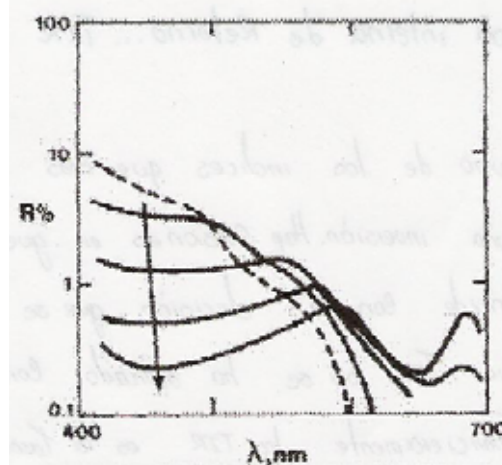


Figura 6. Espectro de reflectancia típico para aguas CASO I

La Figura (7) muestra el perfil de reflectancia típico para aguas CASO II. La retrodispersión por sedimentos en suspensión produce mayor reflectancia en todas las longitudes de onda, aunque el incremento es menor en longitudes de onda menores debido a pequeñas cantidades de absorción por clorofila. Debido a que la forma del perfil no cambia con el aumento de sedimentos en suspensión, el color del agua tampoco cambia y un algoritmo basado en relaciones espectrales parece ser menos apropiado. En vez de lo anterior, un algoritmo basado en la reflectancia absoluta en una longitud de onda dada es más apropiado. Una excepción es cuando el sedimento es altamente coloreado, y la intensidad de la señal del color puede ser correlacionada con la carga de sedimentos. En este caso la forma del perfil espectral es diferente de la de la Figura 7, con un máximo en color del sedimento en cuestión.

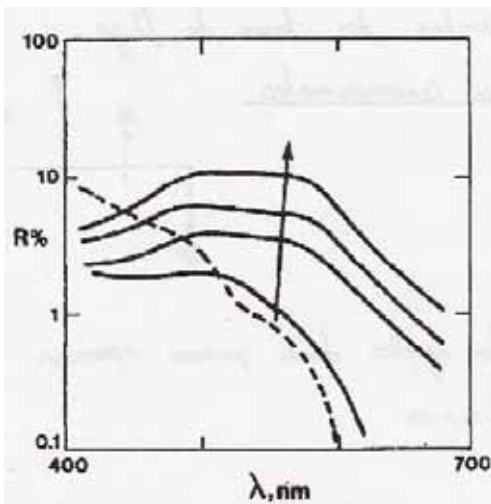


Figura 7. Espectro de reflectancia típico para aguas CASO II, dominadas por sedimentos. La flecha indica el aumento en la carga de sedimentos. La línea punteada es para agua pura

La Figura (8) muestra el perfil de reflectancia para aguas CASO II en las que domina la sustancia amarilla. Como en el caso de la clorofila un aumento en la concentración lleva a un aumento en la absorción y una disminución de la reflectancia en el azul. En consecuencia un algoritmo de calibración basado en relaciones espectrales es el más apropiado, aunque aquí no hay un punto de gozne tan notorio para normalizar las relaciones espectrales.

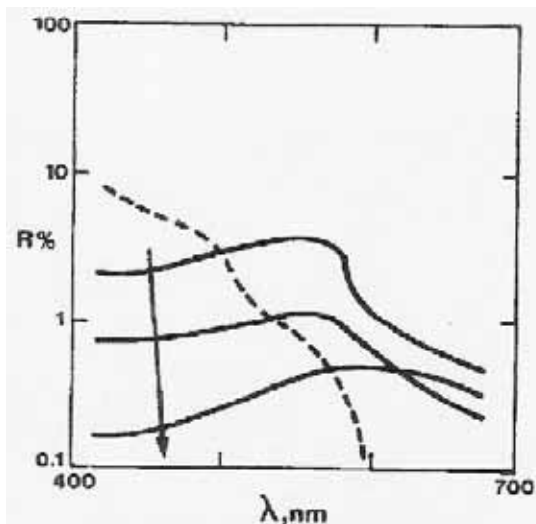


Figura 8. Espectro de reflectancia típico para aguas CASO II, dominadas por sustancia amarilla. La flecha indica el aumento en concentración.

A partir de estos espectros generalizados, parece haber suficiente evidencia para correlacionar el color del agua con la concentración de clorofila, sedimentos o sustancia amarilla; pero, si existe un solo constituyente presente en el agua. No existe justificación para que un algoritmo desarrollado a partir de datos tomados en terreno en un lugar y tiempo determinados sean válidos en otro lugar o tiempo, sin necesidad de observaciones adicionales en terreno. En el caso que los datos de satélite sean de archivo o no se pueda acceder a la zona, por lo que los datos de terreno no existan, las conclusiones obtenidas deben ser tratadas con extremo cuidado.

En el océano abierto las condiciones de agua CASO I se cumplen en casi globalmente, por lo que algoritmos globales podrían utilizarse. Sin embargo, en las zonas costeras la experiencia obtenida de datos de terreno es imprescindible para la correcta calibración de los datos. Este es uno de los desafíos

de la percepción remota del color de océano, obtener cuanta información sea posible de los set de datos de imagen, pero al mismo tiempo conocer las limitaciones del método y no extender la interpretación a los dominios de la especulación sin fundamentos.

2.1.4. Correcciones radiométricas

La radiancia del objeto es alterada (atenuada) por la atmósfera a través de la cual pasa la radiancia en su ruta hacia el sensor. El sensor en sí mismo, distorsiona también esta radiancia que ha llegado a él.

Las correcciones por la atenuación atmosférica, son especialmente importante para objetos oscuros tales como cuerpos de agua. Para objetos relativamente claros, hondos y por lo tanto de agua oscura, con condiciones atmosféricas brumosas, la radiancia total que llega al sensor puede estar compuesta de únicamente 20% de radiancia procedente del agua y de 80% de radiancia de la ruta atmosférica. A pesar de que éste es un caso extremo, las señales útiles sobre objetos de agua, tienden a ser abrumadas por ruido generado por la atmósfera (Barret & Curtis, 1992).

Una evaluación subjetiva de una sola imagen no requiere corrección atmosférica. Cuando, sin embargo, el objeto es extraer información cuantitativa (por ejemplo, concentración de clorofila, profundidad batimétrica, etc.) o para comparar dos imágenes en valores tonales, deben de ser removidos los efectos atmosféricos.

Existe una variedad de técnicas utilizadas para la corrección atmosférica: la técnica más simple incluye “la sustracción de píxeles oscuros” y el “apareamiento de histogramas” los cuales son más propensos al error. Las técnicas más complejas involucran la modelación matemática de las condiciones atmosféricas en el tiempo y el lugar de la imagen, las cuales frecuentemente requieren información tomada en el sitio de la imagen y en el momento en que esta imagen fue tomada.

La corrección del ruido del sensor es de dos tipos, relativa y absoluta. Una vez más, la calibración absoluta es únicamente necesitada si se va a realizar análisis cuantitativo o análisis de imágenes múltiples. Información auxiliar enviada desde el satélite es utilizada para realizar la calibración absoluta. Esto es comúnmente llevado a cabo en la etapa de procesamiento cuando es creada la cinta compatible con la computadora (CCT).

La corrección relativa para el “bando” del sensor es generalmente realizada cuando el CCT es producido por el usuario. El fenómeno de “bando” ocurre cuando un sólo canal en un sensor realmente contiene varios detectores. En un sistema de barrido por espejo, como el LANDSAT MSS, hay seis detectores por canal mientras que en un sistema de opresión de barrido como el SPOT HRV, hay miles. Durante la construcción del sensor, los detectores son apareados en términos de sensibilidad tanto como sea posible. La sensibilidad del detector va a cambiar lentamente con el tiempo, haciendo un detector más (o menos) sensible a la radiancia, que su vecino. El resultado aparente es que el mismo objeto será captado con diferente brillantez por detectores con diferente sensibilidad. De nuevo, los datos auxiliares del sensor son utilizados en la etapa de pre- procesamiento (en tierra) para corregir este defecto de la imagen.

2.1.5. Correcciones geométricas

La distorsión geométrica es producida por la curvatura de la tierra, el movimiento no uniforme del barredor, la no-linealidad de despejo del barredor y el movimiento rotacional de satélite. La corrección de estas distorsiones geométricas puede ser lograda en dos formas:

- Las posiciones reales de los elementos de la fotografía son cambiadas pero los elementos mantienen sus valores de intensidad. Dada su limitada precisión, este método es utilizado únicamente para correcciones geométricas simples tales como distorsiones.
- La imagen es remuestreada, esto es, una imagen digital, geoméricamente distorsionada, es transformada a una fotografía sobre una cuadrícula no distorsionada igualmente espaciada. Los

valores de intensidad de los píxeles de la cuadrícula derivada, deben de ser determinados por interpolación utilizando píxeles vecinos de la imagen distorsionada.

2.2. Mediciones hechas por el sensor

El satélite está diseñado para medir el flujo radiante, φ , en un rango restringido de longitudes de onda $[\lambda_1, \lambda_2]$, el cual pasa a través de la apertura del sensor desde un delgado cono de direcciones. Dadas las λ_1 y λ_2 el objeto es medir:

$$\varphi(\lambda_1, \lambda_2) = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \varphi_{\lambda} d\lambda \quad (5)$$

En la práctica la señal de salida, S , es la suma del flujo radiante sentido ponderado por la respuesta espectral del sensor $R(\lambda)$.

$$S = \int_0^{\infty} \varphi_{\lambda} R(\lambda) d\lambda \quad (6)$$

El sensor tiene una apertura A_s y una distancia a la superficie (superficie del mar) d . Si éste observa a un ángulo θ respecto a la normal de la superficie. El flujo radiante emitido por un área A viene dado por:

$$\varphi = L(\theta) * A * \cos \theta \frac{A_s}{d^2} \quad (7)$$

Donde, $L(\theta)$ es la radiancia de A en el intervalo $[\lambda_1, \lambda_2]$ y su registro se afecta por la presencia de la atmósfera y el estado de la superficie del mar (ver Figura 9).

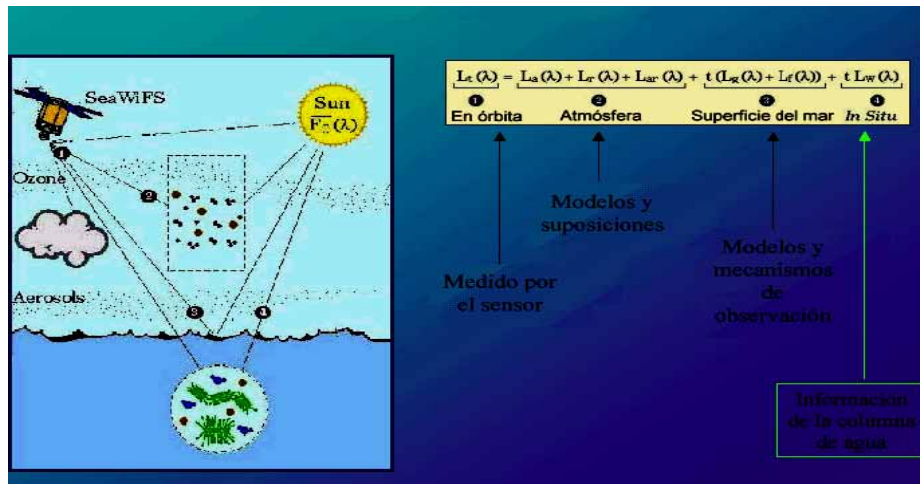


Figura 9. Radiancia Medida por el Sensor

CAPITULO III

3. ZONA DE ESTUDIO E IMÁGENES A PROCESAR

3.1. Descripción De La Zona De Estudio

A continuación se hace una breve descripción de la zona escogida para hallar la concentración de clorofila_a, que es lo primero que se debe hacer cuando se quiere caracterizar un producto oceánico como el escogido para esta investigación.

El énfasis de la descripción de la zona se hace en el Caribe colombiano, que es la que mas interesa en este trabajo:

La soberanía que ejerce Colombia en las áreas marinas alcanza los 988.000 km²; esta vasta extensión aumenta el territorio colombiano en un 87% y constituye para los colombianos un patrimonio poco conocido, conformado por un hermoso complejo de ecosistemas y recursos naturales. El Caribe, del cual nos corresponden 658.000 km² es por antonomasia un mar tropical; desde el punto de vista ecológico esto significa que es un mar cálido, con arrecifes coralinos y manglares como ecosistemas.

Además, el Caribe Colombiano es una amplia zona con una longitud de 1600 Km. (Figura 10 y mapa oficial de la República de Colombia (2004) en el anexo 1). En la parte continental limita al oeste con Panamá y al occidente con Venezuela. Comprende las zonas costeras de los departamentos de Chocó, Antioquia, Bolívar, Córdoba, Magdalena, Sucre y la Guajira y una pequeña región insular constituida por el Archipiélago de San Andrés, Providencia, Santa Catalina y los Cayos de Roncador, Quitasueño, Serrana, Serranilla, Alburquerque, Rosalinda y Bajo Nuevo (IDEAM, 2000, DIMAR, 2003).

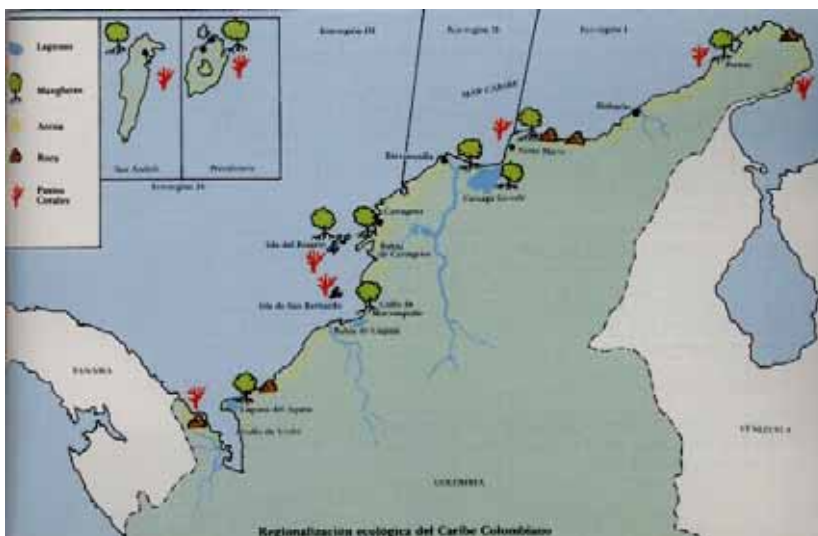


Figura 10. Caribe Colombiano y Parcial del Caribe Venezolano

Las aguas del Caribe Colombiano se caracterizan por tener temperaturas que oscilan entre 28 y 30 °C, en superficie y alcanzan valores de 17.8 °C a 100m de profundidad y con una salinidad que varía entre 34.500 y 37.500 ppm.

El Caribe Colombiano presenta una hidrodinámica de sus aguas que es de carácter estacional (Giraldo, 1994). Hay una época (diciembre – mayo) seca durante la cual predominan los vientos del noroeste, registrándose también la presencia de la corriente del Caribe que en su desplazamiento hacia el noroeste forma una área de influencia que llega hasta el Golfo de Morrosquillo y restringe la corriente de Panamá-

Colombia, ubicada en esta época a los alrededores del Golfo de Urabá. Y una época húmeda (junio – noviembre), en la cuál los vientos Alisios se debilitan dando paso al predominio de la contracorriente de Panamá-Colombia, cuya influencia se percibe a mayores latitudes alcanzando, la desembocadura del Río Magdalena. La corriente ascensional que afecta la costa colombiana y que es llamada también surgencia o afloramiento, coincide con la presencia de la corriente Caribe; es de carácter significativo sólo entre Punta Gallinas y Puerto Colombia. La contracorriente, en cambio, solamente se siente cerca de la costa durante las estaciones húmedas o de invierno menor (mayo-junio) y mayor (septiembre-noviembre). Se percibe ocasionalmente en los períodos secos. Parece que la contracorriente llega exclusivamente hasta el Cabo de la Vela en La Guajira (Fajardo, 1979).

Según el IDEAM (1998), la ocurrencia de una fuerte divergencia en el campo de los vientos, crea las condiciones para el desarrollo de procesos de surgencia que se caracterizan por una marcada estacionalidad con un transporte vertical máximo en la época seca y mínima en la época de lluvias.

En el Caribe Colombiano, la productividad del fitoplancton varía de acuerdo con las condiciones físicas, oceanográficas y químicas que predominan en cada época del año. La mayor productividad ocurre durante el proceso de surgencia. (Bermúdez & Herrera, 1989 y COLCIENCIAS-INDERENA-MINAGRICULTURA, 1989 – IDEAM 1998).

Otra de las vías de fertilización marina en el Caribe colombiano es la de las "corrientes salobres mar adentro" que proceden de ríos como el Magdalena, el Sinú y el Atrato y de lagunas costeras como la Ciénaga Grande de Santa Marta. Estas corrientes son ricas en elementos nutritivos que sólo son aprovechables cuando penetran en aguas claras; se produce, entonces, una proliferación o florecimiento de microalgas planctónicas. El efecto es neurálgico en lugares en donde las aguas son azules frecuentemente y por tanto claras como las del parque nacional natural Tayrona. Durante las estaciones húmedas, la contracorriente de Colombia arrastra las aguas del río Magdalena que desembocan al mar hacia las costas del parque y al resto de las de los departamentos de Magdalena y La Guajira (Corredor, 1979). La corriente transporta grandes concentraciones de nutrientes, en especial compuestos nitrogenados, que provienen probablemente, en buena parte, de albañales de la ciudad de Barranquilla. Como resultado de la fertilización sobreviene una enorme producción de microalgas planctónicas de forma que las aguas del parque, azules y claras, se tornan de un color verde turbio. Esta capa de agua superficial, rica en microalgas, puede tener a veces hasta 30 m de espesor. Este fenómeno dura varios días y ocurre con alguna frecuencia durante los períodos húmedos.

Dentro del área de surgencia, la topografía de la plataforma continental parece desempeñar un papel importante en la producción costera de microalgas planctónicas en el Caribe colombiano. Mientras el agua sobre la plataforma, al norte y al oeste de la península de La Guajira, es con frecuencia de un color verde turbio como resultado de la producción de microalgas planctónicas, en el Cabo, por su más baja producción, tiende a ser azulosa. La plataforma frente al Cabo es muy angosta (aproximadamente 2 Km. de ancho) y profunda y por tanto durante el afloramiento los nutrientes emergen de manera abrupta a las capas iluminadas. Y luego son retirados rápidamente de la costa por la gran velocidad del viento. Como consecuencia, la producción de microalgas ocurre varios kilómetros mar adentro o fuera de la plataforma continental. En cambio la extensa y somera plataforma del norte y oeste de la península de La Guajira permite que los nutrientes afloren de manera gradual, permaneciendo, por su mayor recorrido, mucho más tiempo en las capas iluminadas, de tal modo que las microalgas pueden proliferar sobre la plataforma (Fajardo, 1979).

Con base en las diferencias climáticas y oceanográficas se delimitan cuatro grandes ecorregiones marinas en el Caribe colombiano:

Región I. Desde La Guajira hasta Santa Marta (Punta Gloria); es afectada directamente por la corriente Caribe y por surgencia estacional fertilizante de aguas profundas.

Región II. Desde Punta Gloria hasta Punta Galeras (Atlántico) aproximadamente; está influida por las descargas fértiles y sedimentos del río Magdalena y de la Ciénaga Grande de Santa Marta.

Región III. Desde Punta Galeras hasta los límites con Panamá; sus características están determinadas por la contracorriente de Colombia. Las aguas oceánicas superficiales, infértiles, influyen sobre la costa.

Región IV. Comprende el área insular y oceánica del Caribe incluyendo el mar abierto alrededor del archipiélago de San Andrés y Providencia. Esta región no tiene influencias terrestres, ni de surgencias importantes; son aguas característicamente cálidas, estratificadas, pobres en nutrientes con poca variación estacional, sólo puntual y levemente fertilizadas por remolinos (Kjerfve, 1981).

En cada región se pueden establecer diferencias entre la franja costera y las aguas abiertas, debido a que las influencias terrestres alcanzan a fertilizar a la primera e introducen otros cambios ecológicos a través de los aportes de aguas dulces y sedimentos.

En lo que concierne al Caribe venezolano se puede decir que, posee una extensión aproximada de 2.100 Km. de costas en el mar Caribe y en el océano Atlántico. En el lago de Maracaibo el país posee cerca de 400 Km. de costas. Lo que suma un total de 2.500 km.

2.1. Imágenes a Procesar

Ya con la zona de estudio determinada, se procede a la consecución de las imágenes. Debido a que no se tenía acceso a una estación receptora, fue necesario hacer contactos con el grupo Ocean Color de la NASA, quienes después de estudiar el proyecto accedieron a entregar un password y un login para poder acceder a la base de datos de la DAAC (Data Acces) y así vía ftp descargar las imágenes y los parámetros adicionales para poder realizar el procesamiento de las imágenes. Estas imágenes vienen comprimidas y se descomprimen bajo Linux.

La solicitud de imágenes se hizo en formato (*HRPT: High Resolution Picture Transmisión*) 1A (*level 1*), que es el nivel en que se necesitan para poder realizar el respectivo procesamiento, del periodo de 1997 a 2004 con el fin de poder tener una buena base de datos que permitiera realizar una buena aproximación a la determinación de concentraciones de clorofila_a, en el Caribe colombiano y parte del venezolano,

Además también se solicitaron datos meteorológicos y de ozono que son necesarios para procesar las imágenes.

Las imágenes que fueron obsequiadas por la NASA son del sensor SeaWiFS. Este sensor se escogió por las características especiales con las cuales fue puesto en órbita, que es proporcionar a la comunidad científica datos cuantitativos sobre las propiedades bio-ópticas del océano.

A continuación se muestran las características más importantes del SeaWiFS.

2.2. Sensor SeaWiFS

Actualmente es posible contar con datos de radiancia ascendente provenientes de tres sensores de color del océano como el CZCS (Mitchell, 1994), el *Ocean Color Temperature Sensor* (OCTS) y el *Sea-viewing Wide Field-of-view Sensor* (SeaWiFS) (Firestone, 1993; Hooker, 1992) (Figura 10). Sin embargo, y a pesar que la idea básica para transformar los datos de pigmentos derivados de satélite a datos de producción primaria fue dada por Platt (*Platt et al, 1988*), hasta hoy todavía se presentan algunas dificultades para lograrlo.

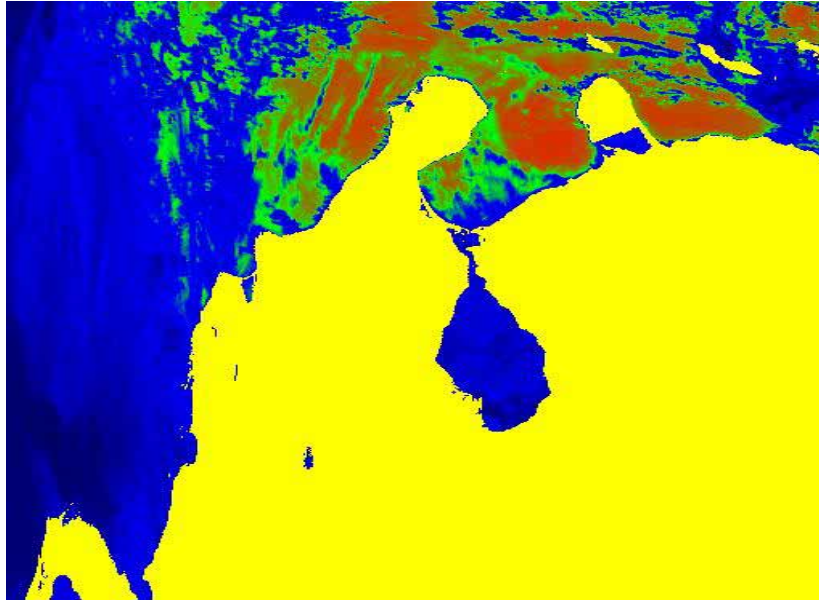


Figura 10. Imagen Procesada del Sensor SeaWiFS correspondiente a la zona de estudio (Caribe colombiano y parcialmente el Caribe venezolano)

El SeaWiFS (NASA, 2000) es uno de los componentes principales del programa *Misión to Planet Earth* de la NASA cuyo objetivo es “mirar” hacia nuestro planeta desde el espacio para comprenderlo mejor. Este programa está centrado en el estudio global de los cambios en el medio ambiente. Dentro de este programa, la misión del SeaWiFS (Hooker, *et al*, 1992) es el estudio de la coloración de los océanos. Entre los objetivos de dicha misión, se encuentra determinar las distribuciones espaciales y temporales de los afloramientos de fitoplancton y cuantificar el papel de los océanos en el ciclo global del carbono, así como en otros ciclos bioquímicos.

El satélite SeaStar, es el satélite portador del SeaWiFS, anteriormente OrbView-2, fue construido y controlado por la compañía Orbital Sciences Corporation. Se puso en órbita en agosto de 1997. La órbita del SeaStar tiene una altura de 705 Km., con una inclinación de 98,2°. El periodo orbital es de 99 minutos, con lo que se tiene 14,5 órbitas diarias. Aproximadamente el 90% de la superficie marina es cubierta cada dos días. Además de circular y polar, la órbita es heliosíncrona, lo que permite observar una determinada zona de la tierra repetidamente con las mismas condiciones lumínicas. El cruce por el Ecuador, en sentido descendente, se produce a las 12:00 hora local, con un margen de 20 minutos.

El SeaWiFS proporciona datos sobre el color de la superficie de los océanos, de los que puede derivarse información sobre la concentración de diversos pigmentos como la clorofila, que está directamente relacionada con el contenido en fitoplancton. Este tipo de información es útil no sólo para actividades como la pesca, sino que tiene un papel fundamental a la hora de estudiar el ciclo global del carbono.

El SeaWiFS es un instrumento basado en el Coastal Zone Color Scanner (CZCS) que operó en el satélite Nimbus-7 entre 1978 y 1986.

La selección de sus bandas se ha basado en las características espectrales de algunos constituyentes ópticos del agua y la transmitancia espectral del oxígeno y el vapor de agua atmosféricos.

De los ocho canales que tiene el sensor, seis de ellos operan en la banda visible: 3 en el azul (B), 2 en el verde (G) y uno en el rojo (R). Los dos canales restantes operan en la zona del infrarrojo cercano. El interés científico en la coloración de los océanos se debe a que en la mayoría de ellos el color (en la región visible del espectro) varía con la concentración de clorofila y otros pigmentos presentes en el agua (por ejemplo, cuanto más fitoplancton contenga el agua, más verde estará).

La mayor parte de los productos que se pueden obtener a partir de los datos del sensor SeaWiFS son de carácter oceánico pues, como ya se ha mencionado, la elección de bandas espectrales se ha hecho teniendo en cuenta el estudio de los océanos. Entre los productos de nivel 2 se encuentran:

- Radiancias emergentes del agua
- Radiancias del aerosol
- Concentración de pigmentos
- Concentración de clorofila-a
- Coeficiente de atenuación difusa
- Valor épsilon para corrección de aerosoles
- Espesor óptico del aerosol

Los datos del sensor se pueden almacenar en los formatos siguientes:

- **Nivel 0** - Datos en bruto recibidos en formato HRPT.
- **Nivel L1B ESA-Sharp** - Contiene datos auxiliares y parámetros radiométricos.
- **Nivel L2** - Imágenes procesadas con el programa SeaDAS, contiene calibración radiométrica y corrección geométrica. Productos nivel L2:
 - Clorofila, K_490, Turbidez y nwL.
- **Nivel L3** - Imágenes procesadas con el software IDL para la obtención de valores promedios de los datos, contiene calibración radiométrica y corrección geométrica. Productos nivel L3:
 - Medias temporales Clorofila.
- **nwL (Normalized Water Leaving)** - Radiancias Emergentes del Agua.
- **K_490** - Coeficiente de Atenuación Difusa.

A continuación se muestra un listado de las longitudes de ondas (ver tabla 1) centrales con sus anchos de banda respectivos y algunas características generales del SeaWiFS:

Banda	Longitud de Onda (λ) nm
1	402-422 nm (Materia orgánica disuelta)
2	433-453 nm (Absorción de Clorofila)
3	480-500 nm (Absorción de Pigmentos)
4	500-520 nm (Absorción de Clorofila)

5	545-565 nm (Pigmentos, propiedades ópticas y sedimentos)
6	660-680 nm (corrección atmosférica)
7	745-785 nm (corrección atmosférica, radianza aerosoles)
8	845-885 nm (corrección atmosférica, radianza aerosoles)
Características Generales	
Tipo de Orbita	Altura 705 km
Cruce Equatorial	12 M ± 20 min, descendiendo
Periodo Orbital	99 min
Swath Width	2,801 km LAC/HRPT (58.3°)
Swath Width	1,502 km GAC (45°)
Resolución Espacial	1.1 km LAC, 4.5 km GAC
Real-Time Data Rate	665 kbps
Revisit Time	1 día
Digitization	10 bits

Tabla 1. Parámetros del SeaWiFS

CAPITULO IV

4. PROCESAMIENTO DE LAS IMÁGENES

Para poder obtener clorofila_a, que es el producto escogido en este trabajo se debe hacer uso de algoritmos que permitan el cálculo de la misma (Aiken et al, 1995) y estos sirvan de base para poder realizar el procesamiento de las imágenes satelitales obtenidas.

El algoritmo escogido se describe a continuación que es la base para poder caracterizar la zona de estudio escogida en cuanto a concentración de clorofila_a.

4.1 Algoritmo de cálculo de la Clorofila_a

Los sensores tipo espectroradiómetros, generan datos de color del océano que pueden ser utilizados para estimar la concentración de pigmentos en la primera profundidad óptica (una profundidad óptica es igual el inverso del coeficiente de atenuación vertical de luz difusa). Hoy se tienen las suficientes bases para asegurar que existe un algoritmo confiable por lo menos en aguas Caso I (Morel y Prieur, 1977) y para latitudes menores a 31° (Muller-Karger *et al.* 1989; Muller-Karger *et al.*, 1991; Banse, 1994).

Este algoritmo es el OC4 (*Ocean chlorophyll two- and four-band algorithms*). Estos algoritmos son proporcionados por el grupo de trabajo *SeaBam*, que apoya el trabajo *in situ* del macro grupo *Ocean Color* de la NASA.

El proceso de calibración del sensor SeaWiFS (Guenter, *et al.*, 1992), implica la confrontación de datos *in situ* de la concentración de clorofila_a, C_a versus radiancia R , *in situ* y registrada por el sensor. Esta calibración permite establecer la siguiente relación empírica para la concentración de clorofila_a en función de la radiancia sensada en el SeaWiFS, R_s .

$$C_a = 10 \left(0.366 - 3.067 R_s + 1.930 R_s^2 + 0.649 R_s^3 - 1.532 R_s^4 \right) \quad (8)$$

Donde R_s , tiene en cuenta las radiancias en las diferentes bandas, a saber:

$$R_s = \log_{10} \left(R_{555}^{443} > R_{555}^{490} > R_{555}^{510} \right) \quad (9)$$

En aguas oligotróficas, la relación $\left(R_{555}^{443} \right)$ permite una alta correlación con C_a y un bajo error cuadrático medio, mientras que en aguas con concentración de clorofila que exceden aproximadamente los 3 [mg m⁻³], la relación $\left(R_{555}^{510} \right)$ es el mejor índice de correlación.

En aguas eutróficas, la absorción es fuerte en la región azul del espectro, lo cual resulta en una baja relación señal a ruido para las bandas 490 nm y 510 nm.

El algoritmo de corrección atmosférica del SeaWiFS (Gordon-Wang 1994, Wang 2000) usa la banda del infrarrojo cercano (765 and 865 nm) para caracterizar las propiedades ópticas de aerosol y estimar la contribución de aerosol para la radiancia total en el espectro visible por extrapolación. La banda 510 nm, cercana a la banda infrarroja, es menos propensa a errores de extrapolación que las bandas 490 y 443 nm.

4.2 Etapas del Procesamiento de las imágenes

Inicialmente las imágenes se procesan con el software *SeaDAS*, que es un paquete de análisis y visualización de imágenes registradas por el SeaWiFS. Este software es propiedad de la NASA y maneja dos formatos: datos LAC (*Local Area Coverage*) y datos GAC (*Global Area Coverage*). Los datos LAC se

transmiten en forma continua, y tienen una resolución de 1,2 Km en una franja de 2800 Km de ancho. Los datos GAC se almacenan a bordo se envían a la estación terrena de *Wallops Fligth Facility* cada 12 horas. Los GAC se obtienen submuestreando los LAC, presentando una resolución de 4 Km en una franja de 1500 Km

4.2.1 Procesamiento de *Level-1 (I1)* a *Level-2 (I2)*

Las imágenes en nivel 1 (Figura 11), se procesan con el programa *msl2* que se encarga de generar productos geofísicos por medio de la aplicación de correcciones atmosféricas y el algoritmo bio-ópticos *OC4*,

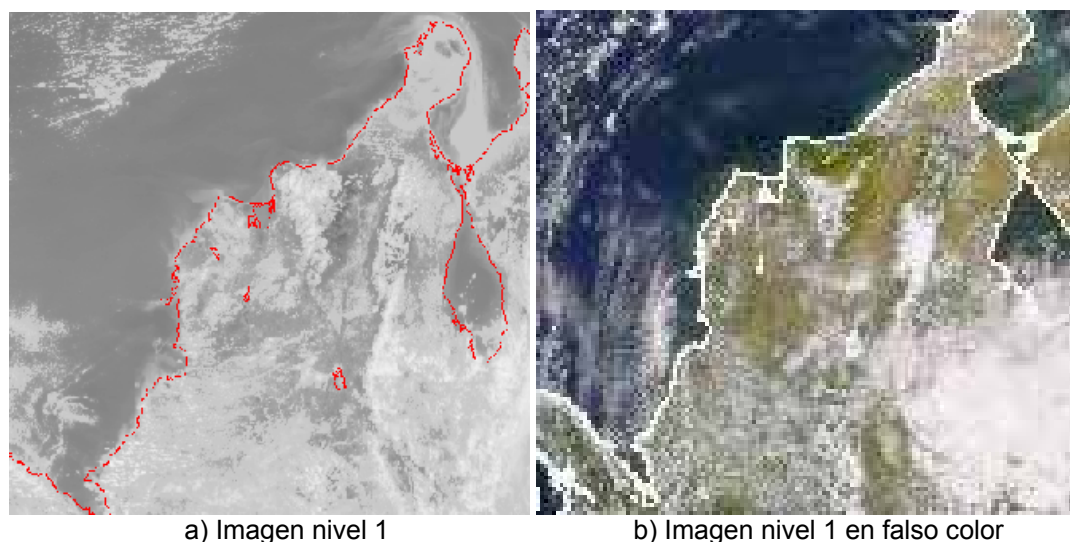


Figura 11. Imágenes en nivel 1

Las imágenes en nivel 1 se pueden visualizar (Figura 11. a), colocarles falso color (Figura 11 b) y convertir en otros formatos desde el SeaDAS. Esto es necesario para poder determinar cuanta nubosidad hay en las imágenes, y así poder determinar cuales serán las que se utilicen para hallar la concentración de clorofila_a.

Para el procesamiento de las imágenes, el programa *msl2* requiere tres archivos meteorológicos y tres de ozono. Los datos meteorológicos tienen la terminación *.MET*, y son 4 por día. Los de ozono (*EPTOMS*) tienen la terminación *.OZONE* y deben ser del mismo día en que el sensor tomo la imagen.

Ejemplo: Si se esta procesando el día 13 de septiembre, los archivos que se necesitaría son:

Imagen a procesar:	S20002572160546.L1A_HVEN
<i>First MET file</i>	S200025006_NCEP.MET
<i>Second MET file</i>	S200025012_NCEP.MET
<i>Third MET File</i>	S200025018_NCEP.MET
<i>First OZONE file</i>	S200024912_EPTOMS.OZONE
<i>Second OZONE file</i>	S200025012_EPTOMS.OZONE
<i>Third OZONE file</i>	S200025112_EPTOMS.OZONE

La idea es que el segundo archivo de los dos parámetros atmosféricos sea el más cercano al momento del pase del sensor (fecha y hora).

4.2.2 Procesamiento de *Level-2 (l2)* a *Level-2 Map (l2map)*

Las imágenes ahora están en el nivel 2, en este nivel las imágenes se encuentran corregidas atmosféricamente pero no se encuentran en proyección de mapa, lo cual es necesario para el estudio de la clorofila_a y otras dinámicas marinas, por tanto es necesario aplicar el proceso *bl2map* que se encarga del mapeo de las imágenes y de convertirlas en formato HDF (*Hierarchical Data Format*). Ya en este formato se pueden convertir a otros formatos manejables desde sistemas operativos comerciales, por ejemplo el formato de imagen .GIF.

En el nivel 3, o *L2map* (Figura 12), se limita la imagen a las coordenadas a estudiar, que para nuestro caso es 6 – 19°N con 80 – 68 °W y el tamaño correspondiente de la imagen.

Por cada grado hay 111 píxeles y 111 km. De distancia: en la figura 12 esta seleccionada el área correspondiente al Caribe colombiano y parte del venezolano.

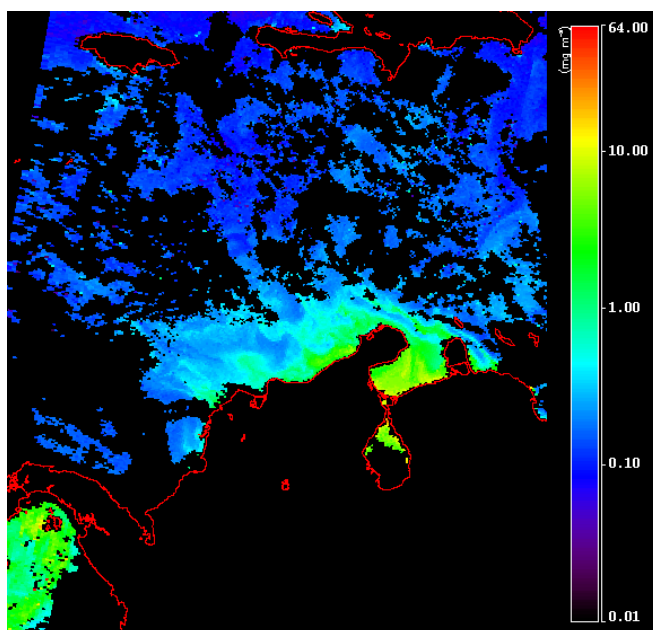


Figura 12. Imagen Procesada en nivel *L2map* del 16 de marzo de 2003

4.2.3 Clorofila HDF en Matlab

El formato HDF es desarrollado y soportado por el *National Center for Supercomputing Applications*. El formato describe cada proceso o componente de la imagen como un objeto, incluyendo algoritmos de calibración, bandas, información de georeferenciación y otros. Todos los objetos están interconectados entre si y la ubicación de cada objeto es conocida.

En este formato las imágenes pueden ser leídas y numéricamente procesadas en otro software, en nuestro caso el *Matlab™* de *Mathwork Inc.*,

Para poder trabajar las imágenes desde Matlab es necesario importarlas con una función específica para ello. Luego se procede a realizar la respectiva rutina para ir promediando las imágenes por meses y luego por año (Figura 13). Dentro de la rutina se puede elegir un *colormap*, en este el caso el elegido fue el jet pues era el que arrojaba la mejor visualización de los datos.

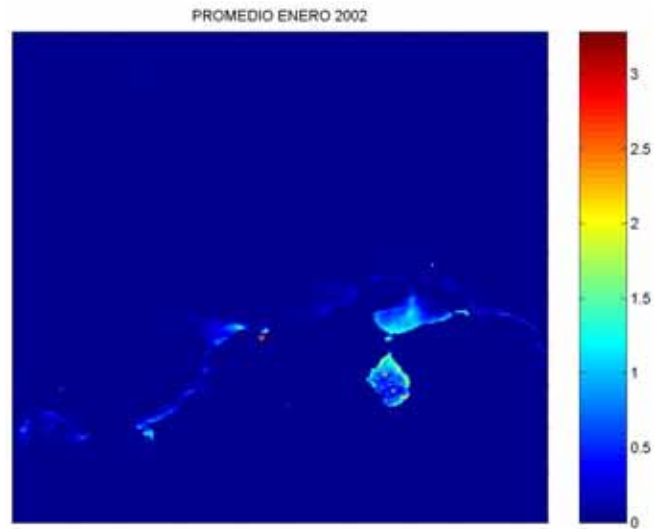


Figura 13. Imagen procesada en Matlab de enero 2002

4.2.4 Visualización y Cambio de formato de la imagen

Para ver las imágenes procesadas (*L2map*) con SeaDas, se selecciona la imagen que se desea y el producto (En este caso *chl_a*), y se carga el archivo. La imagen aparecerá en la pantalla en blanco y negro, pero se tienen varias opciones para el análisis cualitativo de la misma en la ventana de visualización. Se tiene entonces la opción de cargar una paleta de colores. La más utilizada es la *Rainbow* tal como se muestra en la figura 12. También si se quiere se puede poner la línea de costa a la imagen, para su mejor visualización.

Para guardar la imagen en otro formato manejable desde Windows, se tiene la opción de seleccionar desde el SeaDAS el formato que se desea (los mas utilizados son le *JPG* y *GIF*).

En nivel *L2map*, con *SeaDAS*, también existe la posibilidad de realizar histogramas como el de la figura 14, los cuales brindan información sobre algunas variables estadísticas del producto (*clorofila_a*).

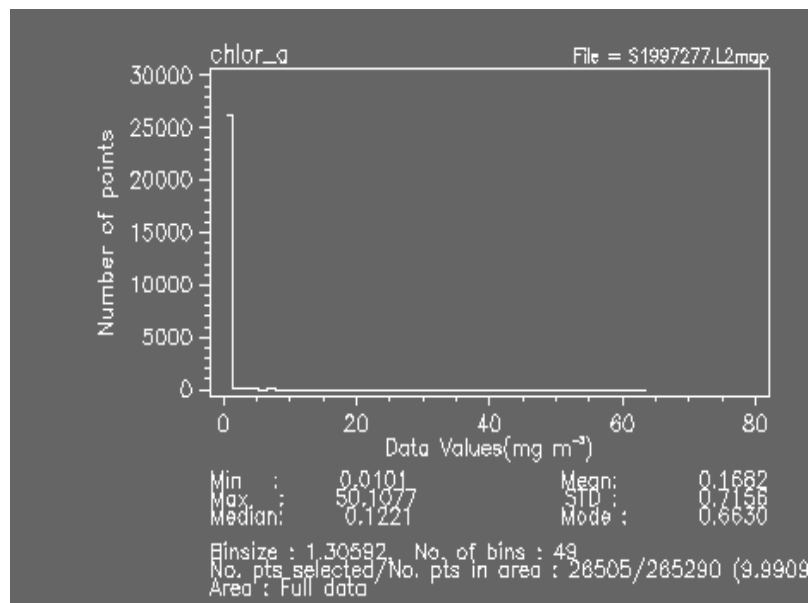


Figura 14. Histograma de concentración de clorofila_a del 26 de noviembre de 1997

CAPITULO V

5. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE IMÁGENES

En el presente trabajo se estudió un conjunto de imágenes SeaWiFS correspondientes a los años 1997, meses, de octubre a diciembre, para 1998, meses de enero a agosto y para 2000 a 2003, meses de enero a diciembre.

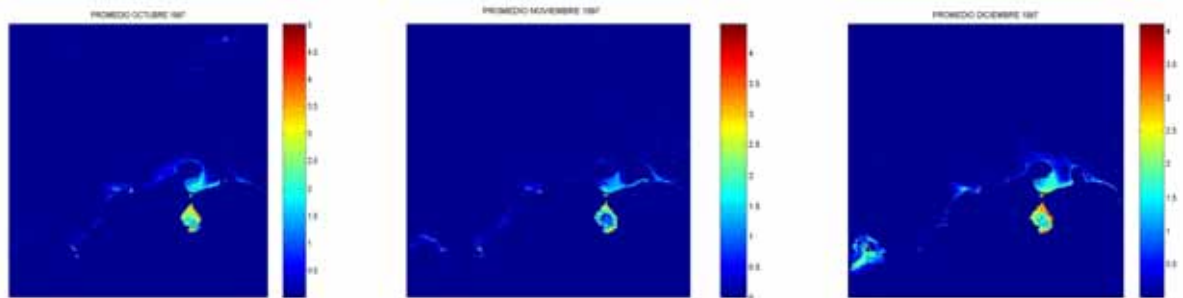
De las 1630 imágenes disponibles el conjunto final analizado se redujo a 1380 por los problemas de nubosidad. Aunque este número es representativo para lograr una buena aproximación de las concentraciones de clorofila_a en la zona de estudio.

El estudio realizado se divide en dos etapas. En la primera parte ha consistido en generar imágenes de concentración de clorofila_a a partir de imágenes procesadas desde el SeaDas y el Matlab para realizar promedios mensuales y anuales de la concentración de clorofila_a. Y la segunda etapa consistió en la realización de un análisis comparativo de la magnitud de los valores promedio de clorofila_a en la zona de estudio.

5.1 Imágenes de concentración de clorofila_a desde el SeaDas y el Matlab

Las imágenes generadas de clorofila_a después del procesamiento se almacenaron por meses y por año de tal forma que luego se pudieran realizar promedios mensuales y anuales.

Para el año de 1997 los promedios mensuales de clorofila_a de octubre, noviembre y diciembre obtenidos desde Matlab se pueden apreciar en las Figuras 15a, 15b y 15c.



a) Promedio octubre 1997

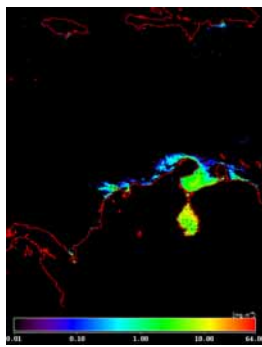
b) Promedio noviembre 1997

c) Promedio diciembre 1997

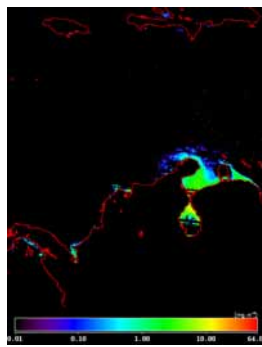
Figura 15. Imágenes procesadas en Matlab de los promedios mensuales de clorofila_a de 1997

En estas imágenes se puede apreciar que en el mes de diciembre se presenta mayor concentración de clorofila_a y que como se esperaba los mayores valores se obtienen en toda la costa tanto del Caribe colombiano como del venezolano, siendo bastante representativo el Golfo de Maracaibo.

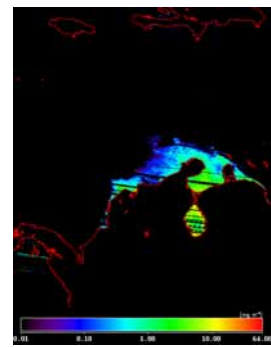
También para el año de 1997 a continuación (Ver Figura 16a, 16b y 16c) se pueden observar las imágenes promedios mensuales de clorofila_a de octubre, noviembre y diciembre obtenidos desde SeaDAS.



a) Promedio octubre 1997



b) Promedio noviembre 1997

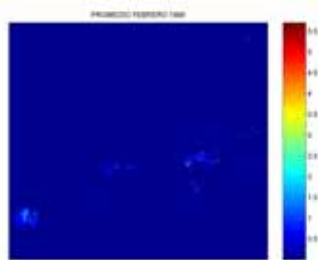


c) Promedio diciembre 1997

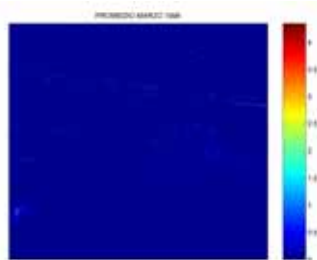
Figura 16. Imágenes procesadas en SeaDas de los promedio mensuales de clorofila_a para 1997

En estas imágenes se puede ratificar lo dicho anteriormente sobre los promedios de clorofila_a para 1997, apreciándose mejor una especie pluma que se forma desde el Cabo de la Vela hasta mar abierto. Esto puede deberse al afloramiento de nutrientes que se presenta en esta zona (Fajardo 1979).

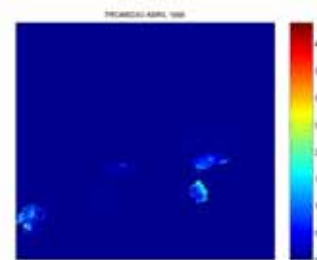
Para el año de 1998 los promedios mensuales clorofila_a de febrero a agosto obtenidos desde Matlab se pueden apreciar en la Figura 17a hasta la figura 17g.



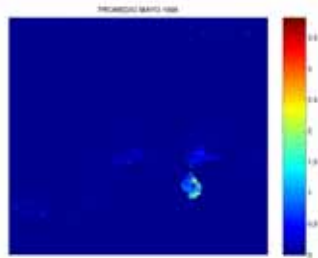
a) Promedio febrero 1998



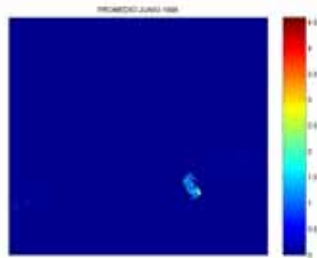
b) Promedio marzo 1998



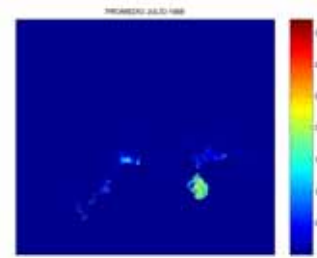
c) Promedio abril 1998



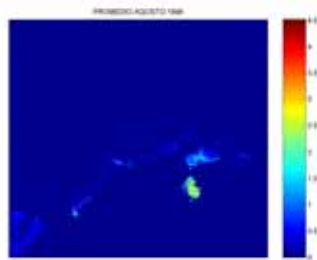
d) Promedio mayo 1998



e) Promedio junio 1998



f) Promedio julio 1998



g) Promedio agosto 1998

Figura 17. Imágenes procesadas en Matlab de los promedios mensuales de clorofila_a para 1998

En las imágenes de la figura 17 se puede apreciar que los meses más representativos en cuanto a concentración de clorofila_a son los meses de mayo, julio y agosto.

A continuación se muestran en las figuras 18a a 18g los promedios mensuales de clorofila_a para los meses de febrero a agosto de 1998.

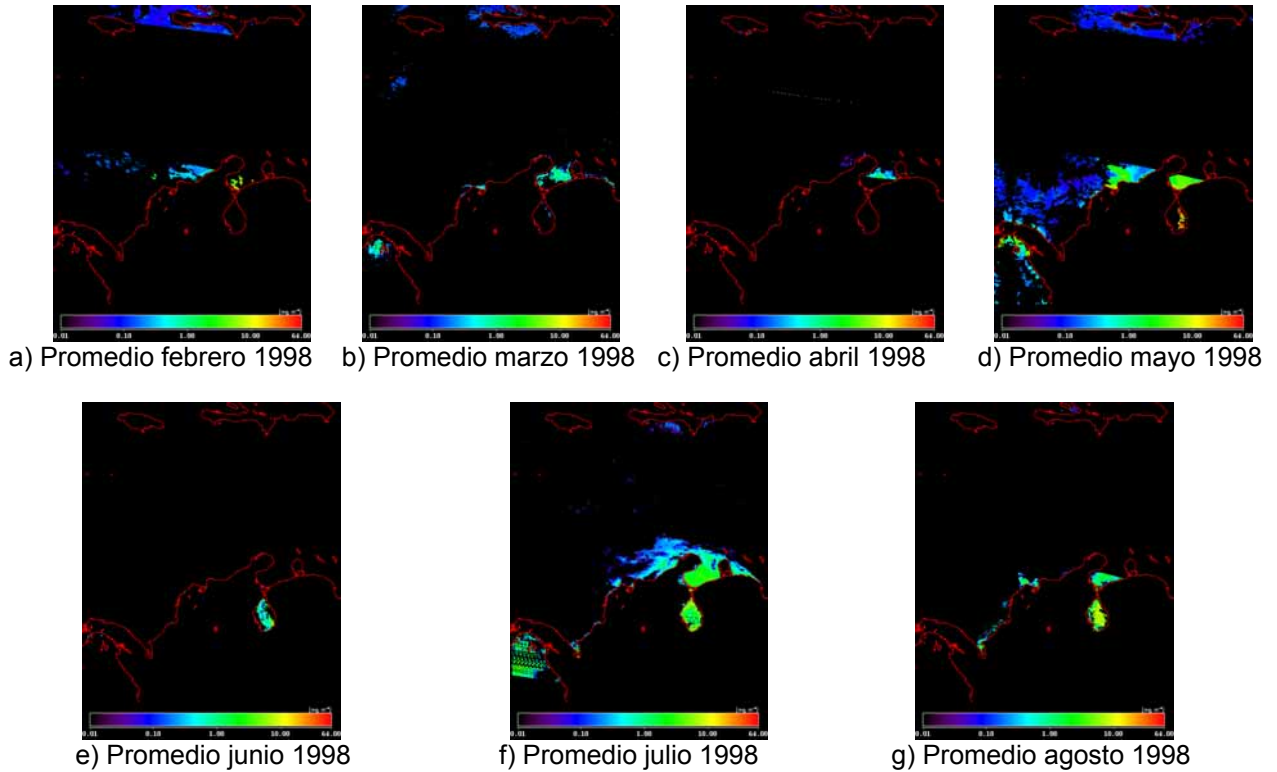
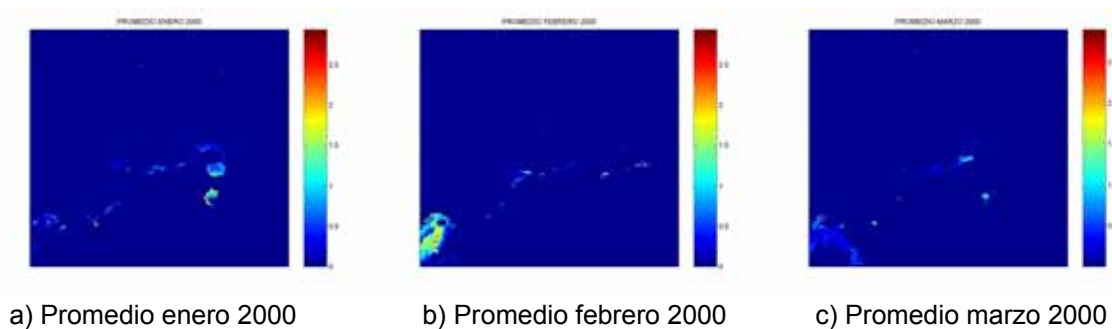


Figura 18. Imágenes procesadas en SeaDAS de los promedios mensuales de clorofila_a de 1998

En las imágenes anteriores se puede apreciar que el mes más representativo en cuanto a clorofila_a es el mes de mayo, lo cual ratifica lo obtenido por el procesamiento desde el Matlab, siendo los meses de julio y de agosto los que le siguen. Lo cual se puede deber a que en estos meses la contracorriente Colombia transporta grandes concentraciones de nutrientes lo cual puede originar la productividad de clorofila_a.

Para el año de 2000 los promedios mensuales de clorofila_a de enero a diciembre obtenidos desde Matlab se pueden apreciar en la Figura 19.



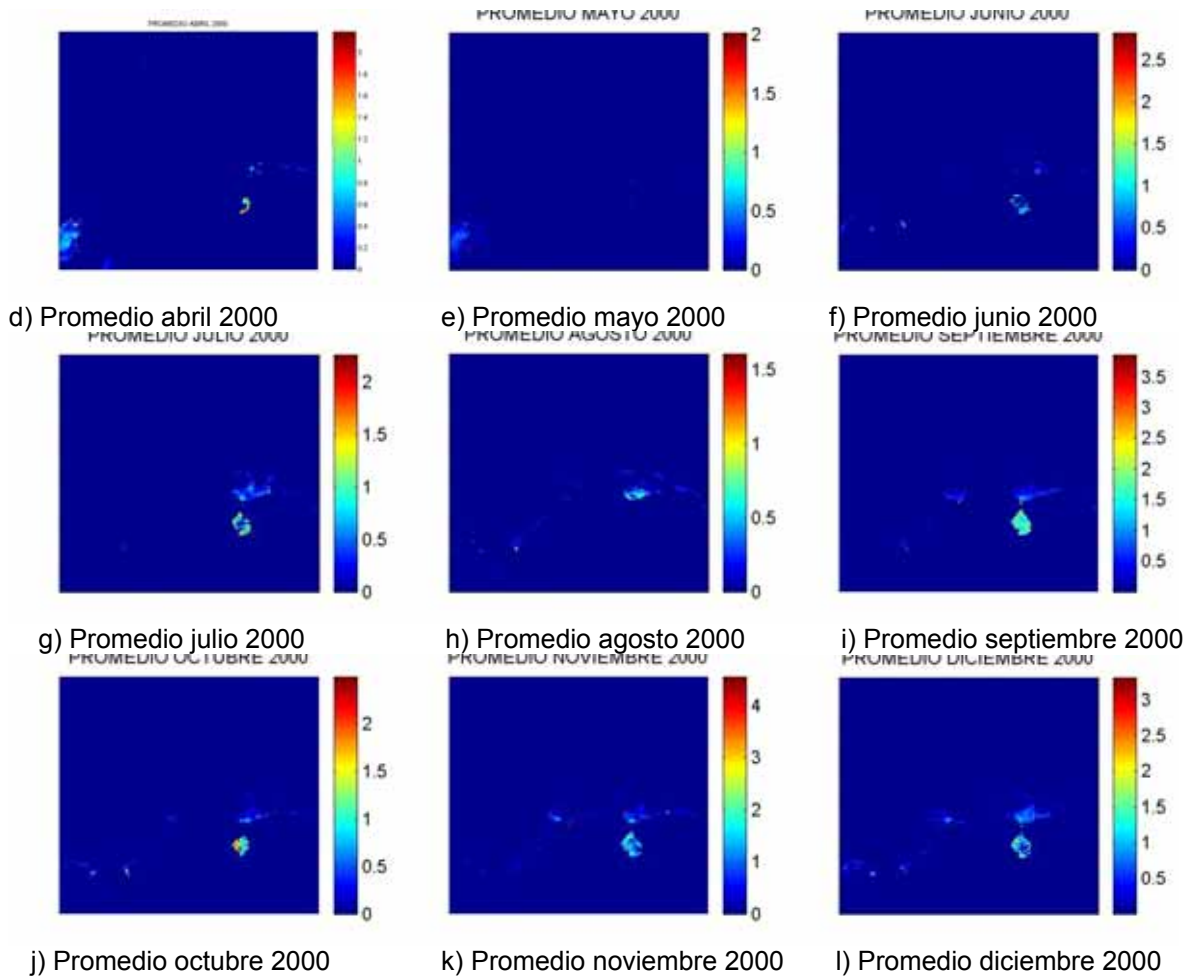
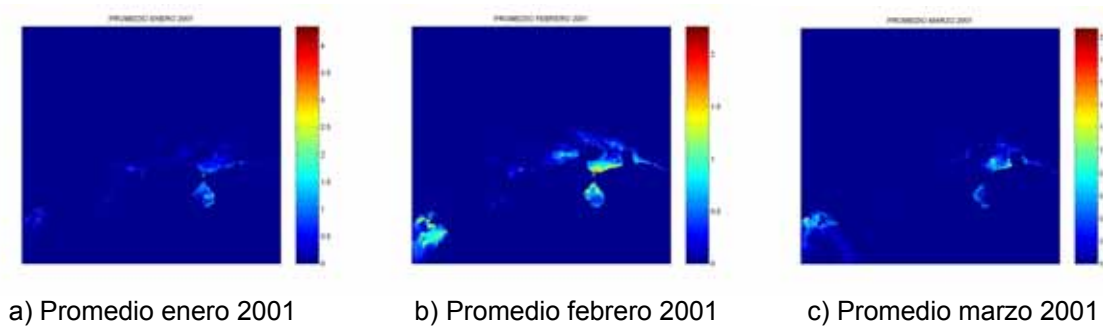


Figura 19. Imágenes procesadas en Matlab: Promedio mensuales de clorofila_a para el año 2000

En las imágenes obtenidas para el año de 2000 muestran valores más altos de clorofila_a en los meses de enero, noviembre y diciembre.

Para el año de 2001 los promedios mensuales de clorofila_a de enero a diciembre obtenidos desde Matlab se pueden apreciar en las Figuras 20a a 20l.



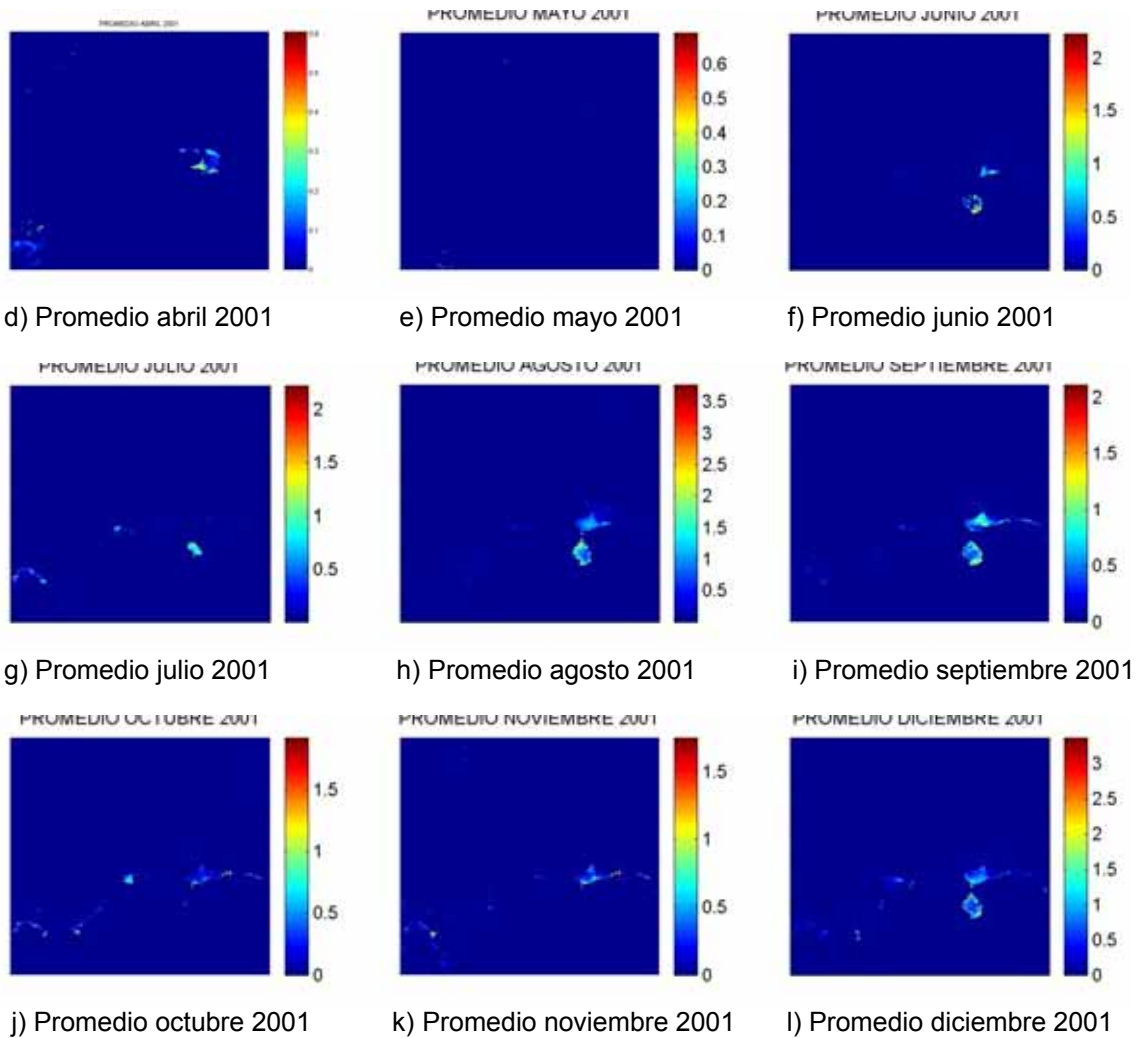
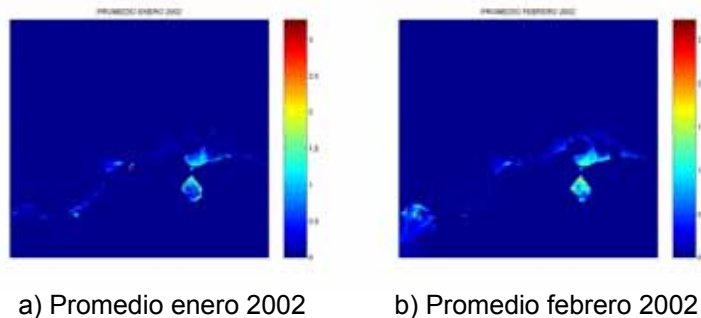
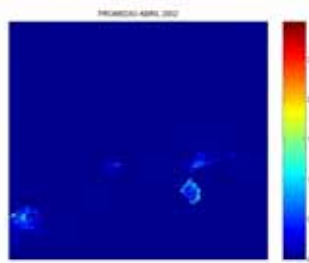


Figura 20. Imágenes procesadas en Matlab de los promedio mensuales de 2001

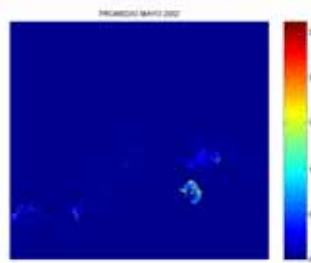
En las imágenes anteriores se puede observar que los meses más representativos en cuanto a concentración de clorofila_a son los de enero, febrero y diciembre.

Para el año de 2002 los promedios mensuales de clorofila_a de enero a diciembre obtenidos desde Matlab se pueden apreciar en las Figuras 21a) a 21l).

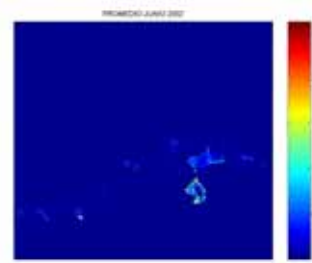




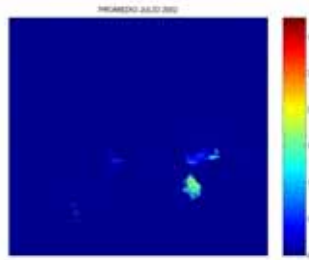
d) Promedio abril 2002



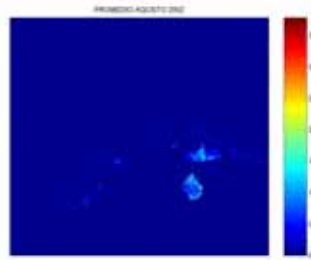
e) Promedio mayo 2002



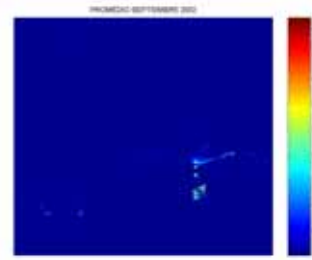
f) Promedio junio 2002



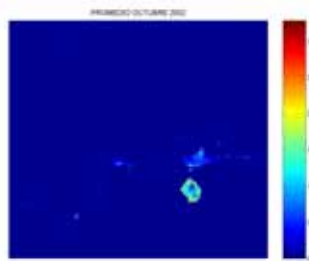
g) Promedio julio 2002



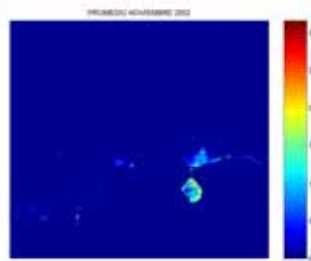
h) Promedio agosto 2002



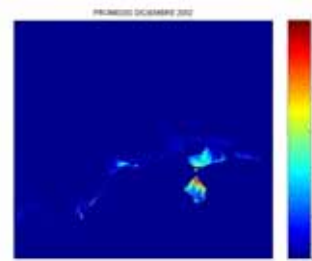
i) Promedio septiembre 2002



j) Promedio octubre 2002



k) Promedio noviembre 2002

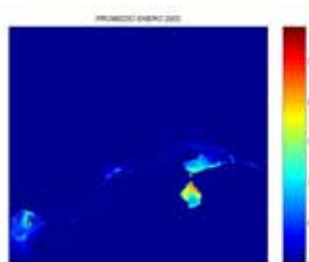


l) Promedio diciembre 2002

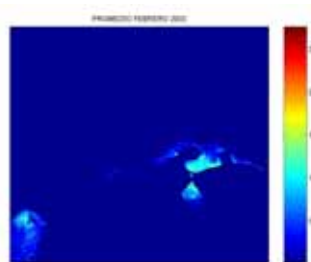
Figura 21. Imágenes procesadas en Matlab: Promedio mensuales de clorofila_a para el 2002

En las imágenes anteriores se puede apreciar que aunque en prácticamente todo el año hubo un promedio un poco similar de concentración de clorofila en la zona de estudio, los meses mas representativos son los de enero, febrero, noviembre y diciembre.

Para el año de 2003 los promedios mensuales de clorofila_a de enero a diciembre obtenidos desde Matlab se pueden apreciar en las Figuras 22a) a 22i).



a) Promedio enero 2003



b) Promedio febrero 2003



c) Promedio marzo 2003

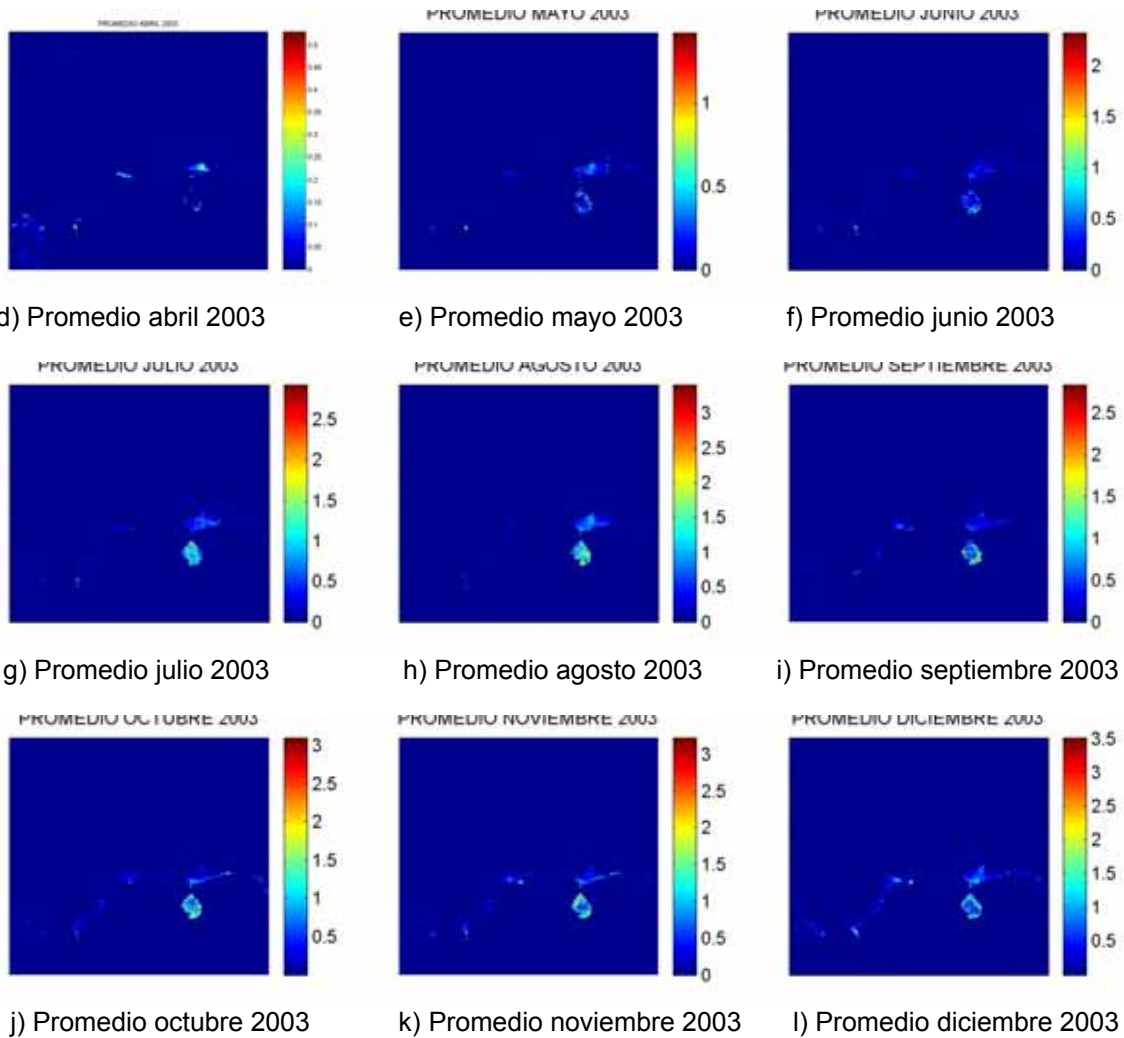


Figura 22. Imágenes procesadas en Matlab: Promedio mensuales de clorofila_a en el 2003

En estas imágenes se puede apreciar que en los meses de enero, febrero octubre, noviembre y diciembre se presentan los mayores promedios de concentración de clorofila_a.

Cabe anotar, que en las imágenes de las figuras 19 a 22 hay algunas que se ven con escalas diferentes esto es debido a la forma como se capturo la imagen par ser colocada en el texto. Todas las imágenes se procesaron de la misma forma.

También, es importante recordar que las imágenes que se utilizaron para realizar el procesamiento en Matlab ya tiene corrección geométrica y proyección geométrica, lo cual hace que se pueda utilizar el promedios píxel a píxel.

En general, en todas las graficas anteriores se puede observar que las zonas donde hay mayor productividad de clorofila_a son zonas donde se encuentran desembocaduras de ríos y al estar influenciadas por determinadas corrientes que son ricas en elementos nutritivos se pueden producir estos valores mas representativos que en otras regiones.

5.1.1 Distribución Espacial de la Clorofila_a

Después que se obtuvieron todos los promedios mensuales de concentración de clorofila_a mostrados, en las figuras anteriores, se procedió hacer un promedio total para poder obtener los sitios mas representativos en el periodo de 1997 a 2003 de la zona de estudio en cuanto a concentración de clorofila_a (Ver figura 23).

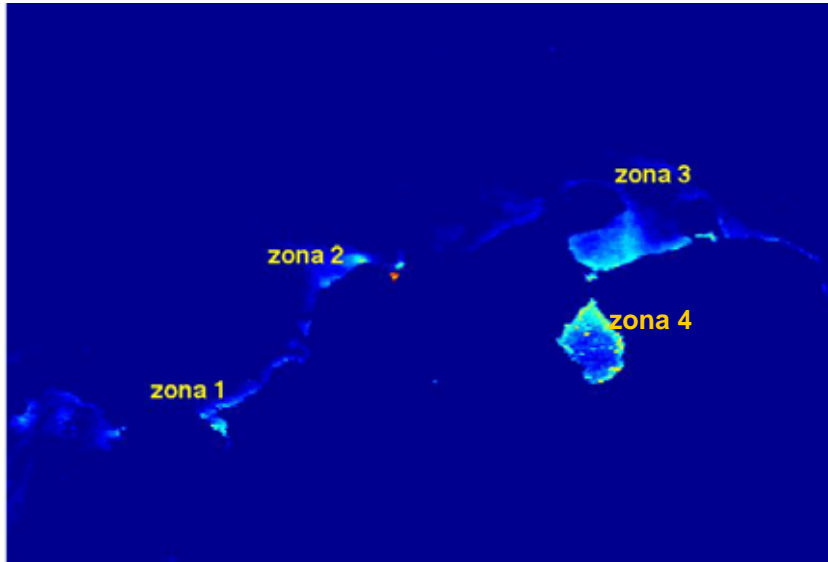


Figura 23. Puntos Representativos, Caribe Colombiano y parte del venezolano

En la figura 23, se puede apreciar que la concentración de clorofila_a en la zona de estudio, es relativamente homogénea, desde Punta Faro en Atlántico hasta el Golfo de Urabá, con disminuciones en la Costa Guajira.

En la Costa sur del Caribe se puede apreciar bastante actividad biológica, entre el Golfo de Urabá y Punta Arboletes, en Islas del Rosario y la desembocadura del Río Magdalena (Bocas de Cenizas); lo cual puede deberse a influencia de procesos de surgencia y al aporte de nutrientes de las desembocaduras de los ríos en el océano.

En el Caribe Venezolano se puede apreciar que la concentración de clorofila_a es bastante alta en el Golfo de Maracaibo, lo cual era de esperarse ya que allí hay también gran aporte de nutrientes de las desembocaduras de varios ríos.

Después del procesamiento de las imágenes tanto en Matlab (Figura 23) como en el SeaDAS (Figura 24) se identificaron cuatro zonas representativas: zona 1 entre Punta Piedra y Punta Gigantón, zona 2 entre Punta Canoas y Punta Faro, zona 3 en Punta Espada y zona 4 en el golfo de Maracaibo.

En la mayoría de las imágenes procesadas tanto con el SeaDAS como por el Matlab, se puede apreciar que la zona cercana a la costa a lo largo de toda la región de estudio presenta una gran productividad de clorofila_a que a mar abierto, ya que en esta zona como se sabe existe una mayor actividad de las aguas por la acción del oleaje, las mareas y las corrientes.

En la figura 24, se puede apreciar mejor las zonas descritas debido a la paleta de color que se utiliza en el SeaDAS, además se pueden observar otras zonas mar adentro sobre la península de la Guajira, donde se pueden observar altos valores de concentración de clorofila_a, esto seguramente es debido a que la plataforma frente al Cabo es muy angosta y profunda y esto convalidado con los vientos dependiendo la época del año origina que la producción de clorofila_a se incremente mar adentro.

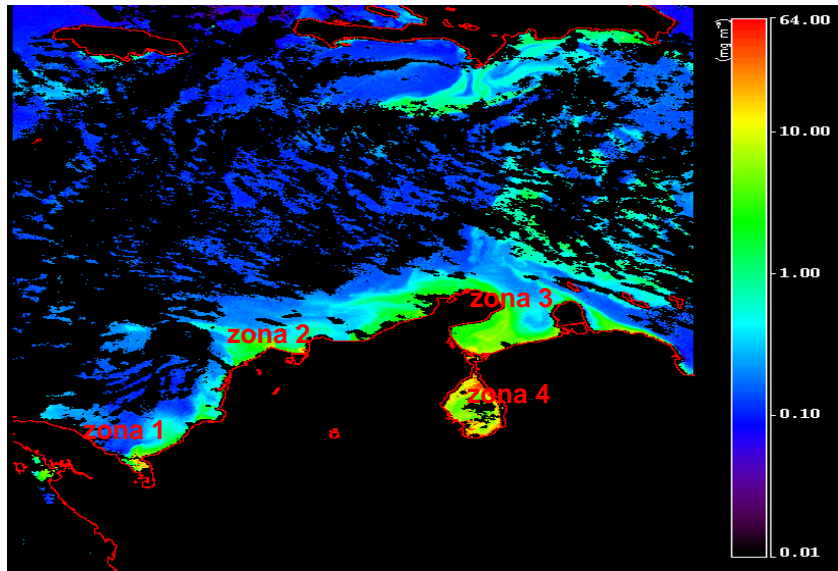


Figura 24. Puntos Representativos, Caribe Colombiano y parte del venezolano

En Matlab, también se realizó una rutina para determinar en qué puntos de la imagen los valores de *clorofila_a* eran más altos, pudiéndose así verificar que las zonas 1, 2, 3 y 4 eran las zonas donde producían mayores valores de *clorofila_a*.

5.2 Análisis comparativo de la magnitud de los valores promedio de *clorofila_a* en la zona de estudio.

Con los promedios mensuales de *clorofila_a* se realizó un análisis comparativo de la magnitud de los valores promedios mes a mes en cada año. Estos valores se obtuvieron de los diferentes histogramas que se realizaron desde el SeaDas. Como se había mostrado anteriormente en la figura 14, los histogramas arrojan información sobre mínimos y máximos, mediana, moda, media, y *STD* de *clorofila_a*.

El dato escogido de los histograma para realizar la comparación mes a mes de *clorofila_a* fue la media y la mediana con el fin de poder encontrar alguna periodicidad en los datos (Ver Tabla 2).

	1997		1998		2000		2001		2002		2003	
	Mediana	Media	Mediana	Media	Mediana	Media	Mediana	Media	Mediana	Media	Mediana	Media
Enero			0,4287	1,0886	0,1424	0,2126	0,3157	0,9141	0,2271	0,5449	0,9197	1,5730
Febrero			0,1556	0,4357	0,1385	0,5028	0,3997	0,3632	0,1844	0,2870	0,4858	0,5932
Marzo			0,5308	1,9999	0,3036	0,4857	0,4036	0,6174	0,0893	0,1319	0,0769	0,0689
Abril			0,2759	0,6019	0,0932	0,1156	0,0925	0,1006	0,0776	0,1135	0,1568	0,1538
Mayo			0,1188	0,9989	0,1413	0,1414	0,0784	0,0882	0,3980	0,9159	0,1034	0,4963
Junio			0,6807	1,4462	0,0932	0,1156	0,0786	0,0815	0,0849	0,0897	0,0993	0,1123
Julio			0,1025	0,3984	0,1219	0,1242	0,2530	0,5313	0,1877	0,2907	0,4092	0,4868
Agosto			1,3189	2,9774	0,0775	0,0934	0,4585	0,7748	0,2663	0,3767	0,0780	0,0746
Sept.					0,0635	0,0647	0,0962	0,0903	0,0930	0,0972	0,1330	0,1392
Octubre	0,5831	1,5626			0,2048	0,0647	0,4254	0,7406	0,1216	0,3635	0,0986	0,1041
Nov.	0,5583	1,5155			0,5317	1,9669	0,3120	0,3722	0,0914	0,1625	0,3526	0,5825
Dic.	0,3989	1,3763			1,1661	1,6546	0,1274	0,6480	0,1405	0,3341	0,5626	1,0639

Tabla 2. Valores de mediana y media del periodo 1997 a 2003 de concentraciones mensuales de *clorofila_a*

De estos valores promedios se llega a que la concentración de clorofila_a, es mayor en los meses de enero, mayo, noviembre y diciembre con valores promedios totales de 0,86, 0,78, 0,74 y 0,61 mg/m³ respectivamente (Ver Figura 25).

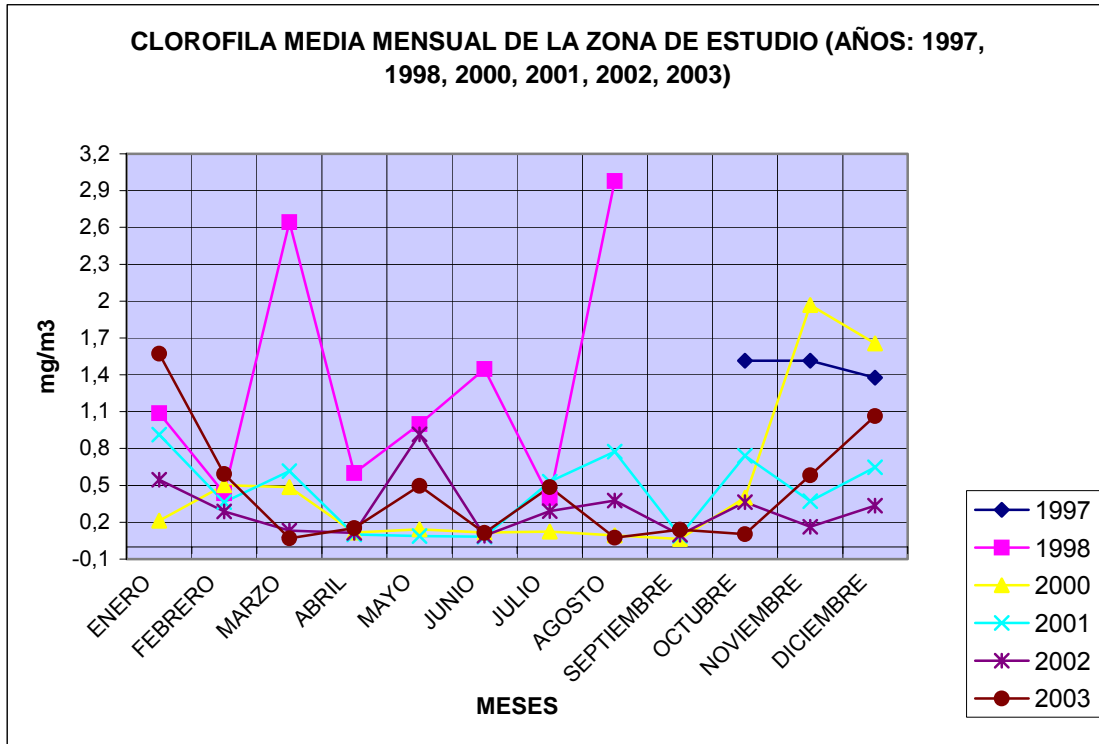


Figura 25. Valores medios mensuales de la clorofila_a entre 1997 a 2003

De la Figura 25 también se podría inferir que la clorofila_a presenta estacionalidad.

También se realizaron gráficas de valores promedios mensuales para cada año (Ver figuras 26 a 30),

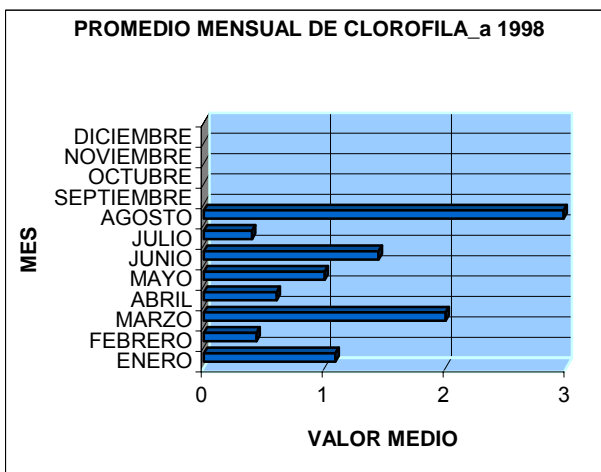


Figura 26. Promedio Mensual clorofila_a 1998

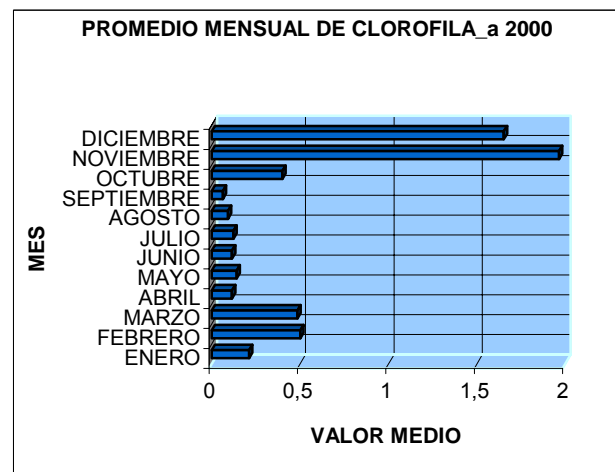


Figura 27. Promedio Mensual clorofila_a 2000

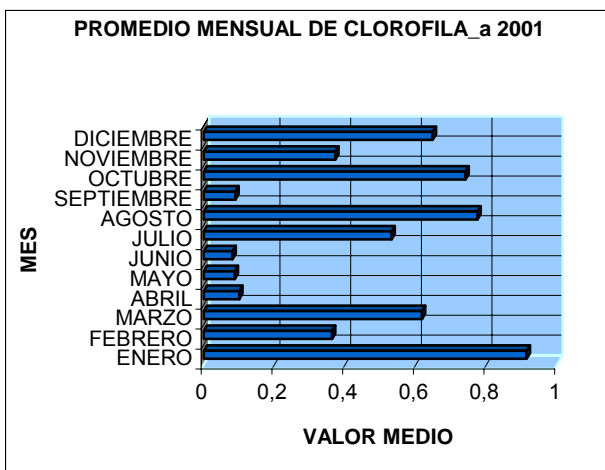


Figura 28. Promedio Mensual clorofila_a 2001

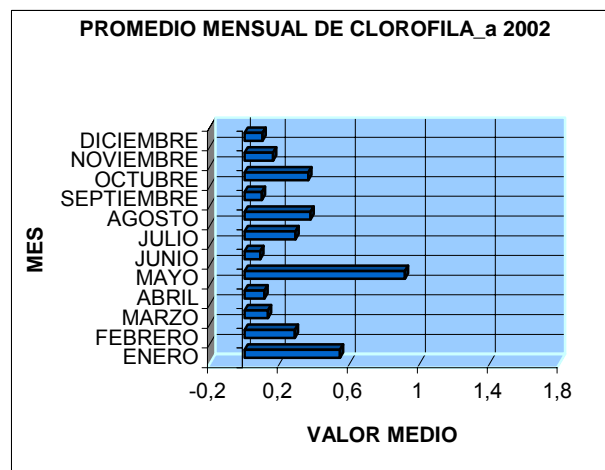


Figura 29. Promedio Mensual clorofila_a 2002

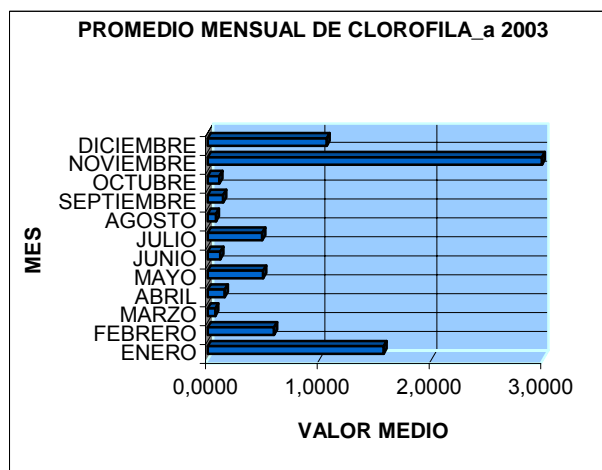


Figura 30. Promedio Mensual clorofila_a 2003

En las figuras anteriores se puede observar que en cada año existen variabilidad en los valores de clorofila_a presentándose así diferentes valores de concentración en cada mes. Con esto se evidencia una marcada influencia de las dinámicas oceánicas en la producción de clorofila_a.

CAPITULO VI

6. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos en este trabajo se concluyen a continuación:

1. En las imágenes procesadas se pueden observar como muy cerca de la costa del Caribe colombiano del venezolano, se puede apreciar gran productividad de clorofila_a, lo cual es debido muy seguramente a la actividad de intercambio que se presenta en esta zona tanto por la desembocadura de ríos como de las dinámicas oceánicas que se presentan en las cercanías de las Costa (Dirección de los vientos, los aflujos de aguas y sedimentos continentales y los afloramientos de masa de agua subtropical).
2. Se pudieron identificar en el área de estudio, cuatro zonas en las cuales se presenta mayor productividad de clorofila_a, gracias al procesamiento que se hizo de las imágenes satelitales del sensor SeaWiFS.
3. Por medio de los valores medio mensuales de clorofila_a, para los años 1997 a 2003 se pudo determinar que la clorofila presentan variaciones estacionales en diciembre, enero y mayo, lo cual refleja una mayor actividad biológica en estos meses.
4. La productividad de clorofila_a, que se observa en la Guajira desde las imágenes procesadas, seguramente, esta asociada a los vientos Alisios estacionales que soplan con fuerza y regularidad en sentido paralelo a la costa a lo largo del margen sur del Caribe, siendo los vientos de este a noreste durante el 81% del tiempo (Corredor, 1976, 1979, 1993).
5. El utilizar dos herramientas de procesamiento de imágenes permitió comparar los resultados obtenidos.
6. De los valores medios mensuales se pudo verificar que a lo largo del año la clorofila_a presenta diferentes valores, lo cual implica que la productividad de esta depende de variables como: temperatura superficial del mar, corriente, vientos y mareas.
7. De los valores medios anuales se pudo concluir que dependiendo de la época del año la productividad de la clorofila_a, varia, esto debe ser por las condiciones físicas, químicas y oceanográficas que predominan en la zona.
8. La siguiente etapa de este trabajo debería ser establecer una relación entre la concentración *in situ* y las radiancias estimadas por el sensor para poder obtener parámetros de corrección propia de la zona de estudio.

CAPITULO VII

7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Andrade., 1995: Variabilidad anual del contenido del carbón orgánico en la superficie de la mar Caribe occidental observada desde CZCS. Armada Nacional. CIOH. Cartagena, Bolívar. Colombia.

_____, Arias, F & Thomas, F., 1988: Nota sobre turbidez, circulación y erosión en la región de Cartagena. Boletín Científico CIOH. No. 8 Cartagena, Bolívar. Colombia. Pag. 72-81.

Arias F., 1994: Contribución para definir el estado de conocimiento de los Sistemas Oceánicos Colombianos con énfasis en la parte biológica. En: "CCO, ENB y Colciencias. Memorias del Taller de Expertos sobre el estado del Conocimiento y lineamientos para una Estrategia Nacional de Biodiversidad en los sistemas Marinos y Costeros: Recopilación de los documentos básicos informativos sobre Biodiversidad Costera y Marina en Colombia. "Minca, Magdalena. Colombia. Pag. 261-268.

Argotti Córcega, E. M. 1993. Diatomeas (Bacillariophyta) del Parque Nacional Archipiélago Los Roques, Venezuela. Tesis de Licenciatura, Universidad de Oriente. Cumaná, Venezuela.

Bailey, J. W. 1851. Microscopical observations made in South Carolina, Georgia and Florida

Balech, E., 1977: Introducción al fitoplancton Marino. Ed. Eudeba. Buenos Aires, Argentina.

Bansen K. and D.C. English, 1994: Seasonality of coastal zone color scanner phytoplankton pigment in the offshore oceans. L. Gheophy. Res. 99 (C4): 7323-7345.

Barrett E. & Curtis L., 1992: Introduction to Environmental Remote Sensing, Ed, Chapman & Hall, Third Edition,

Bauer, P.; S.; McGlade, J & otros. 1993: Feasibility of using Satellites for detections of Kinetic of small Phytoplankton Bloom in Estuaries: Tidal and Migration Effects. En. Remote Sensing of Environment. Vol 27. Pag. 233-250.

Behrenfeld, M.J. & Falkowski P.G., 1997: Photosynthesis rates derived from satellite based chlorophyll concentration. Limnol. Oceanogr., 42: 1-20

Borstad, G. A. & Borastad, L. E., 1976: The Oscillatoria erythraea (Cyanophyta) community of associates. Report 200. Symposium on progress in marine in the Caribbean and adjacent regions. FAO Fisheries. Caracas, Venezuela.

Colciencias, CCO & DNP., 1990: Plan de desarrollo de las Ciencias y Tecnologías del Mar en Colombia (PDTM), Ed. Comisión Colombiana de Oceanografía (CCO).

Corredor, J., 1981: Aspects of phytoplankton dynamics in the Caribbean Sea. FAO Fisheries Report No. 200. Pag. 101-114.

CORREDOR, Jorge, 1979: Phytoplankton response to low level nutrient enrichment through upwelling in the Colombian Caribbean Basin. Deep-Sea Res., 26A: 731-741.

_____, 1979: Phytoplankton response to low-level nutrient enrichment through upwelling in the Colombian Caribbean Basin. Deep-Sea Res: 26A: 731 – 741.

_____, 1993: Dinámica espacio-temporal de la surgencia en la Guajira. In: Mem. VIII Seminario Nacional de las Ciencias y las Tecnologías del Mar. Santa Marta, Colombia. Pag. 202-221

_____. & Morell J., M., 2001: Seasonal Variation of physical and biogeochemical features in eastern Caribbean Surface Water. *Journal of Geophysical Research*. Vol 106. No. C3, Pag. 4517 – 4525.
DIMAR., 2000: Colombia y sus Espacios Marítimos. Bogotá, Colombia.

Donoso, M., 1990: Circulación de las Aguas en el mar Caribe. *Memorias VII Seminarios de Ciencias y Tecnologías del Mar*. Cali, Colombia.

Duque, S., 1996: Caracterización de ecosistemas acuáticos epicontinentales de Colombia con base en el Fitoplancton. En: *Caracterización y Evaluación Integral de los sistemas acuáticos epicontinentales de Colombia*. IDEAM – UNAL. Facultad de Ciencias. ICN. Bogotá D.C., Colombia.

Esaias W., 1981: Remote sensing in biological Oceanography *Oceanus* 24: 32 – 34.

Escobar, J. C., Castillo, F. & Barbosa, C., 1993: Estudio preliminar del fitoplancton y la estructura de la comunidad coralina de la isla de Malpelo en el Pacífico Colombiano durante el crucero Henry Von Pral.. *Boletín Científico CIOH*. No. 13. Pag 117-130.

Fajardo, G. E., 1978: Surgencia costera en las proximidades de la península Colombiana de la Guajira. *Boletín Científico CIOH*. No. 2 Cartagena, Bolívar. Colombia.

FAJARDO Gustavo, 1979: Surgencia costera en las proximidades de la península colombiana de La Guajira. *Bol. Cient. C.I.O.H.*, 2:7-19,

Firestone, E.R., and S.B. Hooker., 1993: *SeaWiFS technical report series cumulative index*. Vol 12,

Forsberg, E., 1969: Estudio sobre la climatología, oceanografía y pesquería del Panamá Bight. *IATTC*, 14 (2): Pag. 260 – 285.

Gagliardini, D.A.; Karszenbaum, H.; Legeckis, R. & Klemas, V., 1984: Applications of Landsat MSS, NOAA/TIROS AVHRR and Nimbus CZCS to study the Plata River and its Interaction with the Ocean. En: *Remote Sensing of Environment*. Vol 15. Pag. 21 – 36.

Goreau, T. F., 1959: The ecology of Jamaica reefs. I. Species, composition and zonation. Pag. 40 – 60.

Gordon, H, A Morel, 1983: *Remote Assessment of Ocean Color for interpretation of satellite visible imagery*. A Review, Springer-Verlag, New York, p 114.

Gordon, Arnold, 1967: Circulation of the Caribbean Sea. *J. Geophysical Res.*, 72: 6207-6223.

Guenter B. Enderen D., Hooker S. , G. Mitchell, and R. Barnes., 1992: *SeaWiFS Calibration and validation plan*. Vol 3.

_____, 1973: The ecology of Jamaica coral reefs. II. Geomorphology, zonation and sedimentary phases. *Bull Mar Sci.*, Pag. 23 – 399.

Gutiérrez, A. & Rondón, M., 2000: Aplicación de sensores remotos para identificar y delimitar ecosistemas marinos y costeros. *Proyectos Piloto Golfo de Morrosquillo*. Tesis de Grado. Universidad Jorge Tadeo Lozano. Bogotá D.C. Colombia.

Hidaka, Koji: Distribución horizontal de las corrientes superficiales y causas de las corrientes oceánicas. *Lagena*, 13: 45-55, 1967.

Hooker, S.B., W.E. Esaias, G.C. Feldman, W.W. Gregg, and C.R. McClain., 1992: An Overview of SeaWiFS and ocean Color. Vol 1.

Halim, Y. 1967. Dinoflagellates of the south-east Caribbean Sea (east Venezuela). *Int. Rev. ges. Hydrobiol.* 52: 701-755.

Hustedt, F. 1956. Diatom aus dem Lago de Maracaibo in Venezuela, 93-142 p. In *Ergebnisse der Deutschen Limnologischen Venezuela-expedition 1952*. F. Gessner & V. Vareschi (eds.). Vol. 1. Verlag Deutscher der Wissenschaften. Berlin.

IDEAM, 1998: El Medio Ambiente en Colombia. Bogotá D.C. Colombia. Pag. 144 – 169.

Kirk, J. T., 1994: Light and photosynthesis in aquatic ecosystems, 2nd ed., Cambridge University Press, Cambridge. Pag. 508 - 520

Kywalyanga, M.; Sathyendranath, S & Stuarde, V., 1998. Seasonal Variations in Physiological parameters of Phytoplankton across the North Atlantic. *J. Plankton.*

Kjerfve, Bjorn, 1981: Tides of the Caribbean Sea. *J. Geophysical Res.*, 86: 4243-4247.

Laverde, J., 1994. Estado del conocimiento de las Praderas de Fanerógamas en Colombia. En: CCO, ENB y COLCIENCIAS. Bogotá. Pag. 133 –141.

La Violette, P.E., 1974: Oceanographic implications of features in NOAA satellite visible imagery. In: Jerlov N. G. and E. Steeman Nielsen (Eds), *Optical aspects of oceanography*, Academic Press, London and New York, Pag. 289 – 316.

Lozano, F., 1978: Oceanografía, biología Marina Y pesca. Tomo I. Ed. Pananinfo S.A. Madrid, España. Pag. 445.

McClain, C.R., J. Comiso, R. Fraser, J.K. Firestone, B. Schieber.: Case studies for SeaWiFS calibration and validation. par 1, 1993.

Margalef, R. 1965. Composición y distribución del fitoplancton. *Mem. Soc. Cienc. Nat. La Salle XXV*: 141-206.

Melo, G. N., R. Pérez, S. Cerdeira 1995. Variación espacio-temporal de los pigmentos del fitoplancton en zonas del Gran Caribe, a partir de imágenes de satélite Nimbus 7 (CZCS). *Avicennia*, 3: 103-116.

_____; Pérez, R.; Victoria, I. & Otros., 1998. La densidad de pigmentos fotosintéticos: Un indicador del carácter y la intensidad de los procesos oceanográficos en el occidente del Caribe. *Boletín SOMETCUBA*. Vol 4 No. 2.

Melo, F. Jeimmy., 2002: Seguimiento y análisis de los procesos físicos y biológicos en las áreas marítimas Colombianas con uso de sensores remotos localizados en satélites. UNINACIONAL, Bogotá, D.C. Colombia.

Morel, A. and Prieur L, 1977: Analysis of variation in ocean color. *Limnol. Oceanogr.* 19: 591-600.

Mueller, J & Austing, R., 1991: Ocean Optics Protocols SeaWiFS validation. SeaWiFS Technical Report Series NASA. Vol 5.

Mueller-Karger F.E. C.R. McClain, T.R. Fisher, W.E. Evans and Varela, 1989: Pigment distribution in the Caribbean Sea: Observations from space. *Prog. Oceanog.* 23: 23-64.

Mueller-Karger F.E., J.J. Walsh, R H. Evans and M.B. Meyer, 1991: On the phytoplankton concentration and seas surface temperature cycles of th Gulf Mexico as determined by satellite. J. Geophy. Res 96 (C7):12645-12655.

Najar, R. G., 1995: Marine Biogeochemistry. In: Climate System Modeling. Cambridge University Press. Ed. Trenberth. Pag. 241-280.

NASA, 2000: <http://SeaWiFS.gsfc.nasa.gov>.; SeaWiFS Project.

Pabon, J.D., 1990: Efecto Climático del Fenomeno del Niño en el Suroccidente colombiano. Artículo en Memorias del IV Congreso Interamericano y II Colombiano de Meteorología. Bogotá.

Platt, T. & Herman, A. W., 1983: Remote sensing of phytoplankton in the sea: surface-layer chlorophyll as an estimate of water column chlorophyll and primary production. Inc. J. remote sensing 4: 343-351.

Pujos, M., Plagiarini, J., Steer., Vernet, G & Weber, O., 1986: Influencias de la contracorriente norte colombiana para la circulación de las aguas en la Plataforma Continental. Boletín Científico CIOH. No. 6 Cartagena Colombia. P 3-15.

Ñañez, E, 1992: Condiciones oceanográficas en el acifico colombiano durante marzo-abril 1992. Dirección General Marítima colombiana. Boletín Científico CIOH. No. 12 Cartagena, Bolívar. Colombia. P. 39-54.

Ramírez, M, 2000: Concentración de pigmentos de Clorofila a en Imágenes de Satelite.

Reyes-Vásquez, G. R. 1971. Contribución al conocimiento de las diatomeas bentónicas de la Bahía de Mochima, Edo Sucre, Venezuela. Trabajo de Ascenso, Universidad Central de Venezuela. Caracas.

Rojas, P. J., & Pabón, J. D., 1997: Cuantificación de flujos de dióxido de carbono entre el océano y la atmosfera en Areas Marítimas colombianas utilizando modelos de estimación. Nota Técnica IDEAM-METEO/007-97. Bogotá D.C. Colombia.

Sánchez P. H.; Álvarez L. R.; Pinto N. F.; Sánchez A. A. S. & Otros., 1997: Diagnóstico y zonificación de manglares en el Caribe de Colombia. Ministerios del Medio Ambiente. Bogotá, D.C. Colombia.

Spiniello, P. 1996. Las diatomeas marino-costeras de Venezuela. Carib. J. Sci. 32: 331-347.

Tait, R. V., 1977: Elementos de Ecología Marina. Traducido por F. Garcia. Ed. Zaragoza, España. P 320.

Velásquez F., Aida J. 1987. Diatomeas bentónicas de la Laguna de Chacopata, Estado Sucre, Venezuela. Tesis de Licenciatura, Universidad de Oriente, Cumaná, Venezuela.

http://daac.gsfc.nasa.gov/CAMPAINGN_DOCS/OCDST/SeaWiFS_TM_abstracts

http://SeaWiFS.gsfc.nasa.gov/SEAWIFS/SEASTAR/SeaWiFS_bench.gif, SeaWiFS instrument

http://eosdata.gsfc.nasa.gov/DATASET_DOCS/czcs_dartaset.html

http://podaac.jpl.nasa.gov/topex/www/ql_index.html

<http://SeaWiFS.gsfc.nasa.gov/SEAWIFS.html>

<http://SeaWiFS.gsfc.nasa.gov/SEAWIFS/IMAGES/IMAGES.html>

http://SeaWiFS.gsfc.nasa.gov/SEAWIFS/IMAGES/CZCS_DATA.html

<http://SeaWiFS.gsfc.nasa.gov/cgibrs/level3.pl>

http://SeaWiFS.gsfc.nasa.gov/cgibrs/SeaWiFS_browse.pl

<http://earthobservatory.nasa.gov>, NASA/EOS, 2001: Earth Observatory.

<http://oceanografia.cicese.mx.oceansat/copp>, COLOR DEL OCÉANO Y PRODUCCIÓN PRIMARIA.

ANEXO I

Mapa oficial de la República de Colombia
(Instituto Geográfico Agustín Codazzi, 2004)

