

Bol. Cient. CIOH	Cartagena (Colombia)	No. 11	Julio 1992	Pág 3 - 14	ISSN 0120-0542
---------------------	-------------------------	--------	---------------	------------	----------------

**DINAMICA DE LA PLUMA DE TURBIDEZ DEL CANAL DEL DIQUE
EN LA BAHIA DE CARTAGENA - COLOMBIA**

Por:
CF. Jorge Urbano**
Yves François Thomas*
Carlos Parra**
Pierre Yves Genet**

RESUMEN

Se estudian cuatro imágenes de satélite SPOT, del área de la bahía de Cartagena de Indias, tomadas por el radiómetro Alta Resolución Visible (ARV) operando en modo multiespectral y con fechas: 27 de marzo de 1986, 10 de noviembre de 1987, 7 de marzo de 1990 y 20 de diciembre de 1990.

Cada imagen fué corregida radiométricamente en término de reflectancia dispersa y calibrada con base en la concentración de sólidos en suspensión medidos en NTU.

Los mapas temáticos de isoclasas obtenidos se han incluido en la base de datos que el Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas administra en ambiente SIG, como nuevos datos para el programa del centro de acopio, procesamiento, análisis y distribución concerniente a la zona costera del Caribe colombiano.

Estas imágenes muestran los diferentes comportamientos de las masas de agua a través de los sedimentos en suspensión. Se obtuvo una tipificación de las situaciones que se presentan. Los resultados obtenidos son de interés para la calibración de Modelos temáticos de la dinámica de la bahía de Cartagena de Indias; así como su aplicación en la formulación de planes de contingencias en situaciones de algún tipo de contaminación.

ABSTRACT

Four SPOT satellite images are studied from the Cartagena de Indias bay, taken by the High Resolution Visible radiometer functioning on the multiespectral mode dated: march 27, 1986; november 10, 1987; march 7, 1990 and december 20, 1990.

Each one of the images was corrected radiometrically in terms of scattered and calibrated reflectance based on concentration of solids in suspension measured in NTU.

The obtained thematical charts of isolines have been included in the database wich the Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas gives in SIG enviroment, as new data for the storage, processing, analisis and distribution center concerning the coast zone of the Colombian Caribbean .

These images show the different water masses behavior through sediments in suspension. A clasification of the situations presented was obtained.

** Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas, A.A. 982, Cartagena de Indias, Colombia; Fax: (57-53) 690641

* Laboratoire de Géographie Physique du CNRS (URA 141), 1 Place Aristide Briand, F92195 Meudon Cédex, France; Fax: 33.1.45.07.58.99

The obtained results are of interest for calibrating thematic models of the dynamics of the Cartagena de Indias bay; as well as their application on the presentation of contingency plans in any type of pollution situation.

Palabras claves: Colombia, Caribe (Mar), Cartagena de Indias (bahía de), Dique (Canal del), zona costera, hidrología, turbidez, Sistema de Información Geográfica (SIG), Sensores Remotos, SPOT

MATERIAL Y METODOLOGIA

Datos de las imágenes. La localización (figura 1) y las características de las escenas tratadas se presentan en la Tabla 1.

Procedimiento de análisis. Se utilizaron las tres bandas espectrales: la banda XS3 ($\lambda = 0,79$ hasta $0,89 \mu\text{m}$) para localizar la frontera entre el medio continental y el dominio oceánico; las bandas XS1 ($\lambda = 0,50$ hasta $0,59 \mu\text{m}$) y XS2 ($\lambda = 0,61$ hasta $0,68 \mu\text{m}$) para el análisis de la concentración de sólidos en suspensión.

El procedimiento de análisis se compone de las siguientes fases:

(1). Selección de una ventana de 1024 por 1024 elementos de imagen (Pixel), cada uno de ellos con una resolución espacial de 20 por 20 metros, centrada sobre la bahía de Cartagena de Indias.

(2). Tratamiento de las bandas XS1 y XS2, compuesto por:

a - La calibración de los valores radiométricos en términos de luminancia equivalente SPOT $L(\lambda)$ expresada en $\text{w}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}$ para una banda λ de un radiómetro ARV se deduce de los valores digitales $ND(\lambda)$ leídos sobre la cinta magnética por medio de la relación siguiente (CNES & SPOT - IMAGE, 1991):

$$L(\lambda) = \frac{ND(\lambda)}{\alpha(\lambda) \cdot 1,3^{m(\lambda)-3}}$$

Los valores de $\alpha(\lambda)$ y $m(\lambda)$ son respectivamente un coeficiente de calibración absoluta, es decir una constante característica de cada instrumento ARV en una época precisa para una ganancia de referencia, y la ganancia efectivamente empleada durante la adquisición.

Los valores del coeficiente de calibración $\alpha(\lambda)$, y la ganancia empleada $m(\lambda)$ se presentan en la Tabla 2.

b - Extracción de la reflectancia dispersa en la masa de agua medida por debajo de la superficie de agua. Esta operación se realiza en tres etapas:

ETAPA I. Cálculo de la reflectancia medida al nivel del satélite [$R_s(\lambda)$], para cada pixel del dominio oceánico, sin tomar en cuenta los efectos atmosféricos ni ambientales:

$$R_s = \frac{L(\lambda) \cdot \pi}{F \cdot E_o(\lambda) \cdot \cos(\theta)}$$

Con $E_o(\lambda)$ la irradiancia del Sol fuera de la atmósfera, F un término de correlación de la variación de distancia Tierra-Sol y θ el ángulo central del Sol. Para las bandas espectrales XS1, XS2 y XS3, los valores de $E_o(\lambda)$ son respectivamente de 1850, 1610 y 1090 $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\mu\text{m}^{-1}$. El parámetro F se estima así:

$$F = \frac{1}{1 - \epsilon \cdot \cos\left[2 \cdot \pi \cdot \frac{(J-3)}{365}\right]^2}$$

Satélite	SPOT-1	SPOT-1
Radiometro	ARV-1	ARV-1
K.J.	641,329	641,329
Modo espectral	Multibanda	Multibanda
Resolución	20m.	20m.
Fecha	27/03/1986	10/11/1987
Hora	15h37m08s	15h33m04s
Elevación del sol	66,0°	57,2°
Azimut del sol	108,9°	146,5°
Orientación	8,8°	8,7°
Incidencia	2,3° (D)	10,4° (D)
Pre-tratamiento	1-B	1-B

Satélite	Spot-1	Spot-2
Radiometro	ARV-2	ARV-2
K.J.	641,329	641,329
Modo espectral	Multibanda	Multibanda
Resolución	20m.	20m.
Fecha	07/03/1990	20/12/1990
Hora	15h25m33s	15h37m47s
Elevación del sol	58,7°	50,8°
Azimut del sol	120,0°	150,0°
Orientación	8,6°	8,8°
Incidencia	25,1° (D)	2,0° (D)
Pre-tratamiento	1-B	

Tabla 1: Características de las escenas SPOT

Fecha	XS1	XS2	XS3
27/03/1986			
(λ)	0,5893	0,4800	0,7877
$m(\lambda)$	5	6	5
10/11/1987			
(λ)	0,4954	0,3545	0,5566
$m(\lambda)$	5	6	5
07/03/1990			
(λ)	0,4545	0,3795	0,5634
$m(\lambda)$	6	7	5
20/12/1990			
(λ)	0,5421	0,4190	0,7548
$m(\lambda)$	6	7	5

Tabla 2 Longitud de la onda, coeficiente de calibración (λ) y ganancia $m(\lambda)$ de las escenas SPOT.

ϵ es la excentricidad de la órbita de la Tierra ($\epsilon = 0,0167$) y J el día Juliáno. Para las imágenes del 27/03/1986, 10/11/1987, 07/03/1990 y 20/12/1990, F toma los siguientes valores: 1,0047, 1,0203, 1,0158 y 1,1332.

ETAPA II. Cálculo la reflectancia medida al nivel de la superficie $[R_o(\lambda)]$, para cada pixel del dominio oceánico (Ben Moussa H. y al., 1989):

$$R_o(\lambda) = [R_e(\lambda) - R_a(\lambda)] \cdot \frac{1 - S(\lambda) \cdot R_e(\lambda)}{T(\lambda)}$$

Con $R_a(\lambda)$ la reflectancia de la atmósfera (efectos Rayleigh y Mie), $R_e(\lambda)$ la reflectancia del medio ambiente, $S(\lambda)$ el albedo esférico de la atmósfera y $T(\lambda)$ la transmisión atmosférica. $R_o(\lambda)$ se iguala al valor $R_e(\lambda)$ mínimo que se observa sobre la imagen; $R_e(\lambda)$ se iguala a $R_a(\lambda)$ tomando para una primera observación $S(\lambda) = 0$; $S(\lambda)$ se iguala a 0.15 (Duhaut, 1985); y $T(\lambda)$ se calcula con un modelo "5S", Tanré y al., 1986.

Los valores de $R_a(\lambda)$ y de $T(\lambda)$ se presentan a continuación (Tablas 3 y 4).

Fecha	xs1	xs2	xs3
27/03/1986			
$R_a(\lambda)$	0,1059	0,0665	0,0425
10/11/1987			
$R_a(\lambda)$	0,0686	0,0351	0,0214
07/03/1990			
$R_a(\lambda)$	0,1059	0,0698	0,0419
20/12/1990			
$R_a(\lambda)$	0,0651	0,0289	0,0171

Tabla 3: Reflectancia de la atmósfera $R_a(\lambda)$ de las escenas SPOT.

Fecha	XS1	XS2	XS3
27/03/1986			
T(λ)	0,947	0,938	0,918
10/11/1987			
T(λ)	0,945	0,936	0,916
07/03/1990			
T(λ)	0,946	0,936	0,916
20/12/1990			
T(λ)	0,943	0,933	0,914

Tabla 4: Transmisión atmosférica T(λ) de las escenas SPOT.

ETAPA III. Cálculo de la reflectancia medida por debajo de la superficie {R_w(λ)} para cada pixel del dominio oceánico (Ben Moussa H. y al., 1989);

$$R_w(\lambda) = \frac{R_e(\lambda)}{K}$$

con:

$$K = \frac{n^2}{(1-p)} \approx 0,545$$

si K es el factor de transmisión de la interfase Océano-Atmósfera, n el índice de refracción del agua de mar (n = 1.341) y p el factor de reflexión de Fresnel por debajo del agua (se supone que p es constante y vale 0,021).

(3) Filtrado, para reducir el ruido residual de la imagen y mejorar su aspecto visual, suprimiendo las componentes de más alta señal, se aplica un filtro digital. El archivo de reflectancia R_w(λ) se convolúa con un patrón de tamaño 3 x 3 de forma:

$$\begin{matrix} 0.0625 & 0.1250 & 0.0625 \\ 0.1250 & 0.2500 & 0.1250 \\ 0.0625 & 0.1250 & 0.0625 \end{matrix}$$

(4) Calibración de la imagen, en el dominio oceánico, en términos de turbidez, expresada en unidades NTU (Nephelometric Turbidity Unit.). Con base en la red de muestreos con cubrimiento desde Galerazamba hasta Boca Lequerica y Boca Matunilla

incluyendo las islas del Rosario, se efectuaron mediciones de los siguientes parámetros, en las unidades e instrumentos mencionados:

- . Transparencia del agua, METROS, disco Secchi.
- . Cantidad de luz, MICRO EINSTEIN M² SEC⁻¹, radio - cuanto fotómetro.
- . Turbidez del agua, NTU, botellas nansen.
- . Cantidad de luz reflejada, REFLECTANCIA, radiómetro.

Seguidamente se procede a realizar los cálculos estadísticos tendientes a obtener una función matemática que refleje de la mejor forma posible (baja desviación estándar y correlación cercana a 1) el comportamiento de los sólidos en suspensión en función de la reflectancia; obteniéndose la siguiente relación (Thomas y al., 1991):

$$NTU = \exp\left[2,142 - 3,823 \cdot \text{Ln}\left(\frac{R_w(XS1)}{R_w(XS2)}\right) + 1,618 \cdot \text{Ln}\left(\frac{R_w(XS1)}{R_w(XS2)}\right)\right]$$

(5) Extracción del límite Continente-Océano. Se enmascaran la neo-banda "turbidez" por medio de la banda XS3. El mar actúa como un cuerpo negro en el infra-rojo próximo.

(6) Generación de los mapas de los contornos de turbidez (Figuras 2, 3, 4 y 5).

RESULTADOS

El área de estudio (figura 1), tiene dos fuentes de aporte de sedimentos.

- Los sedimentos localizados en la parte norte de la imagen, al frente de las playas de Bocagrande, tienen su origen en la deriva litoral del río Magdalena y se transportan a lo largo de la costa como consecuencia del cambio de orientación de la misma.

- Al sur la desembocadura del Canal del Dique aporta los sedimentos directamente a la bahía.

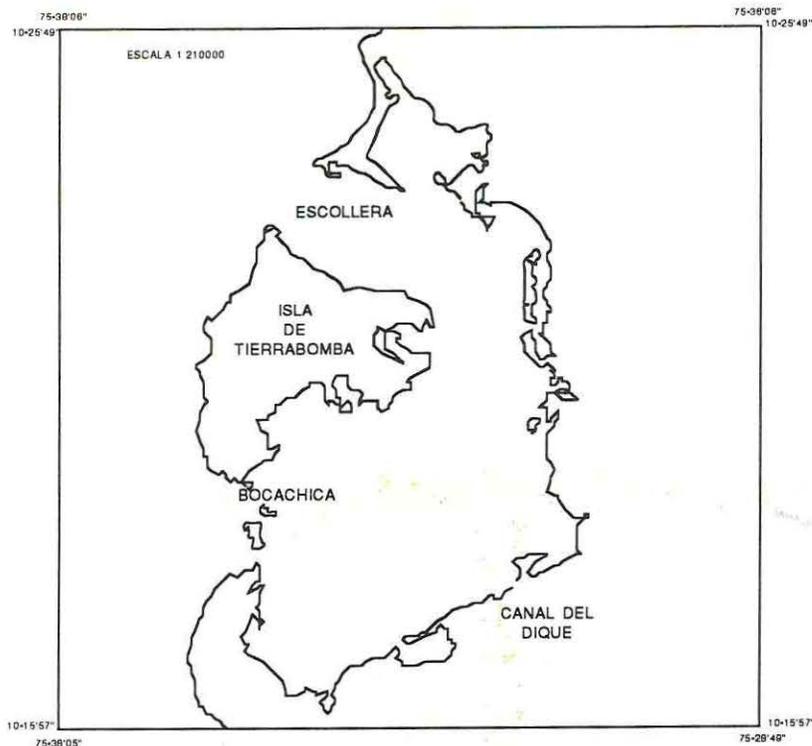


FIGURA 1: Bahía de Cartagena

Estos sedimentos se transportan en dirección norte u oeste.

La repartición de los sedimentos en y fuera de la bahía dependen del caudal del Canal del Dique que llega al área y de la circulación debido a las corrientes. Estos dos parámetros tienen origen climatológico y varían con el tiempo.

7 de marzo de 1990. Figura 3. la imagen presenta una pluma de turbidez pequeña, por la ausencia de precipitación, con un rango de turbidez desde 1 a 8,1 NTU, ocupando solamente la mitad de la parte sur de la bahía.

Comportamiento de la dinámica. Las imágenes corresponden a períodos con presencia de vientos significantes de dirección noreste, con velocidades promedio de 10 nudos (18 Km/H), el comportamiento de la turbidez comprueba la presencia de corrientes de dirección norte-sur, con velocidades menores a las observadas durante el período en el cual no se presentaron vientos significantes; la dinámica su-

perficial es amortiguada por la presencia del viento sobre los efectos del Canal del Dique; se presenta un mayor flujo de agua superficial por el sector de Bocagrande, la cual hace ver, los sedimentos en superficie, acumulados en el extremo sur de la bahía; en esta situación el movimiento de remolino en el extremo sur se presenta mejor definido, Figura 4.

Imágenes tomadas después de una lluvia y sin vientos (27 de marzo de 1986 y 20 de diciembre de 1990)

Las imágenes tomadas después de una lluvia se caracterizan por una pluma de turbidez en la desembocadura del Canal del Dique mucho más importante, debido al caudal del canal y al mayor aporte de sedimentos.

27 de marzo de 1986. Figura 5. La imagen muestra una pluma de turbidez delgada dirigida hacia el norte con 2,9 a 10 NTU, mientras que el agua de

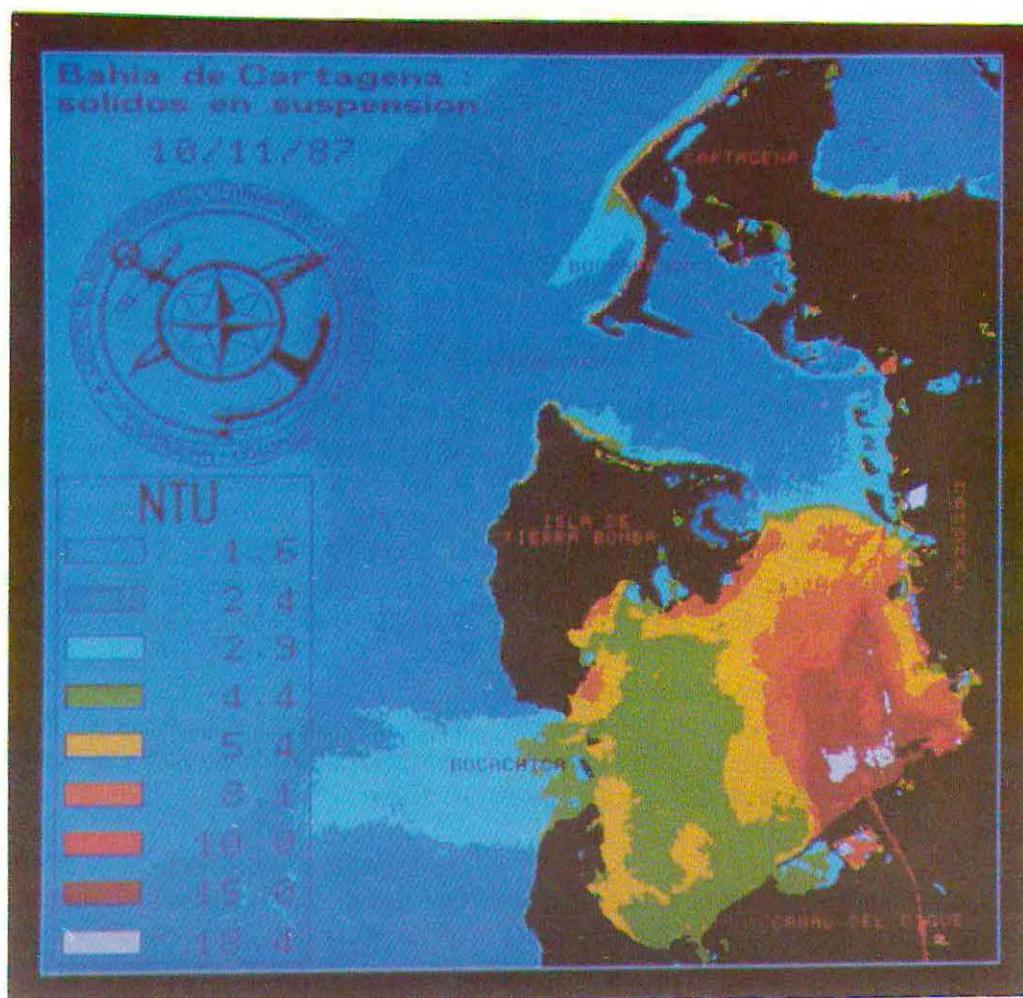


Figura 2. Imagen de la concentración de sólidos en suspensión de la bahía de Cartagena de Indias del 10 de noviembre de 1987; unidades empleadas: Nephelometric Turbidity Units (N.T.U.)

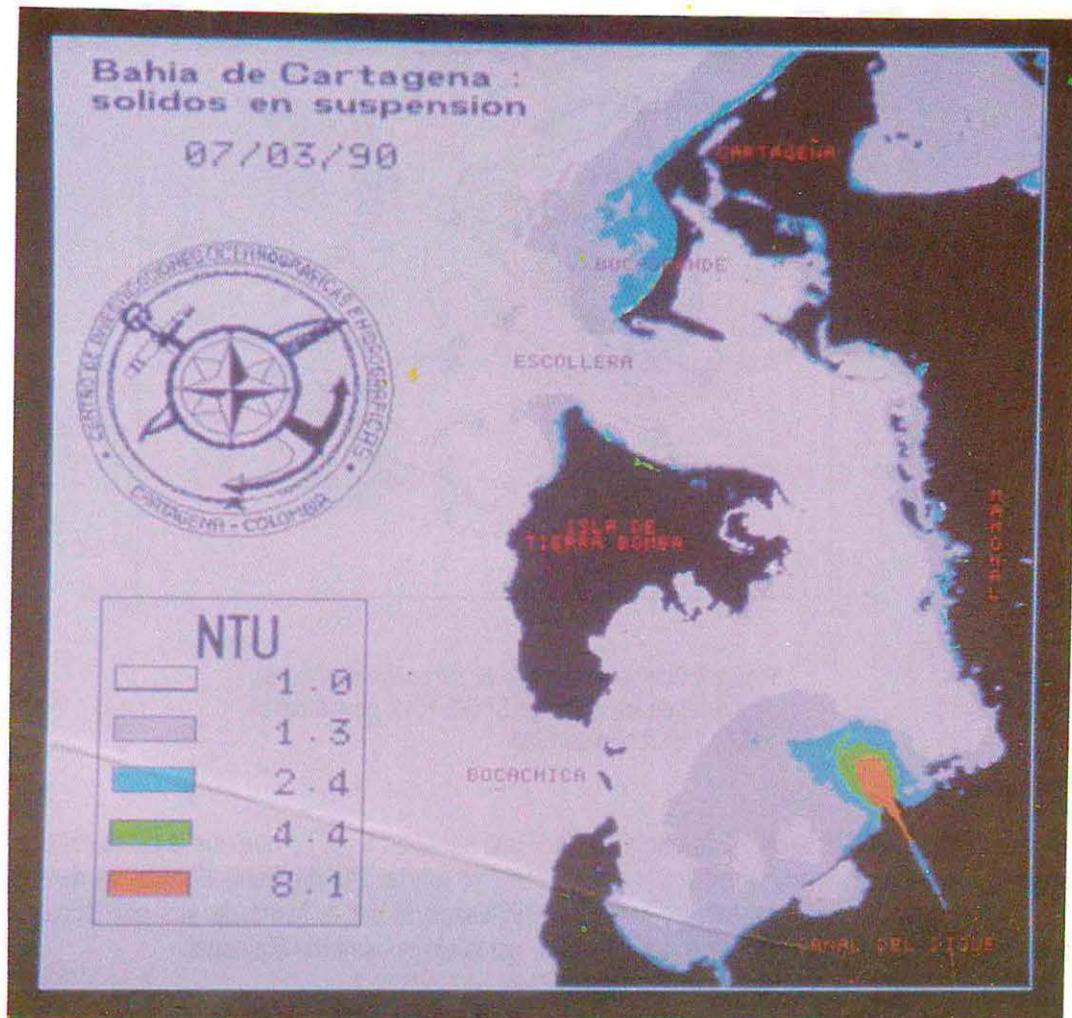


Figura 3. Imagen de la concentración de sólidos en suspensión de la bahía de Cartagena de Indias del 7 de marzo de 1990; unidades empleadas: Nephelometric Turbidity Units (N.T.U.)

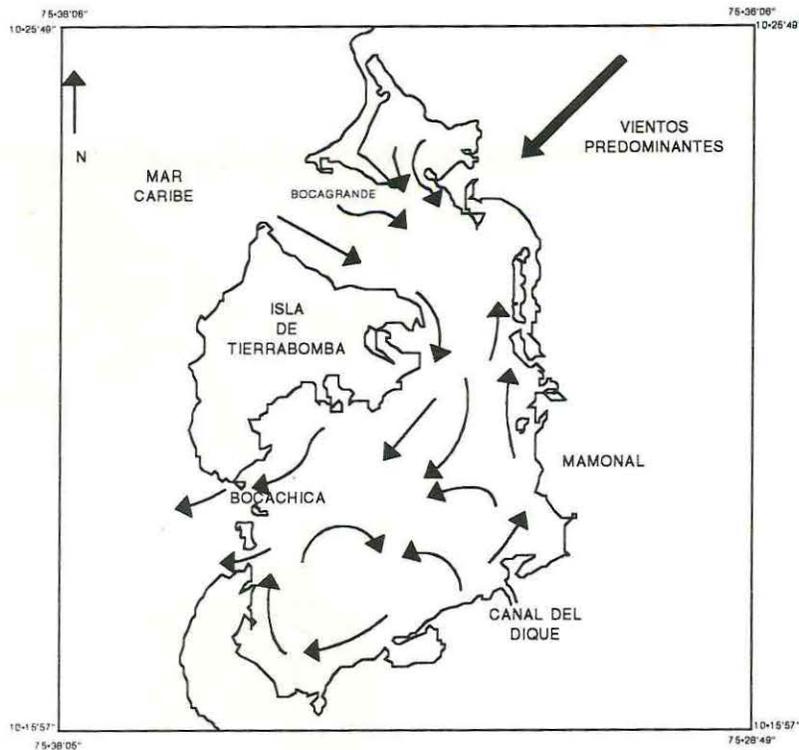


Figura 4. Comportamiento de las corrientes superficiales, deducidas de las imágenes SPOT, 10 de noviembre de 1987 y 7 de marzo de 1990.

mar afuera, de 2,4 NTU, entra en la bahía por la Escollera y Bocachica.

20 de diciembre de 1990. Figura 6. La imagen muestra una pluma de turbidez de importancia comparable con la anterior, en la semejanza de los valores de NTU. Presenta una entrada de agua de mar por el sur-oeste, con 2,4 NTU, la que impide la salida de agua turbia, originada en el canal, que tiene 8,1 NTU y genera un frente de turbidez vertical. Es importante destacar la presencia de

una franja de 5,4 NTU que une la costa este de la bahía con la isla de Tierra Bomba, ya que está influenciada por el humo de una chimenea del complejo industrial de Mamonal.

Comportamiento de la dinámica. En presencia de vientos de baja velocidad, la dinámica superficial de las aguas está conformada por corrientes que tienen su origen en la desembocadura del Canal del Dique y se desplazan hacia la desembocadura de Castillo Grande, cubriendo 2/3 de la superficie de

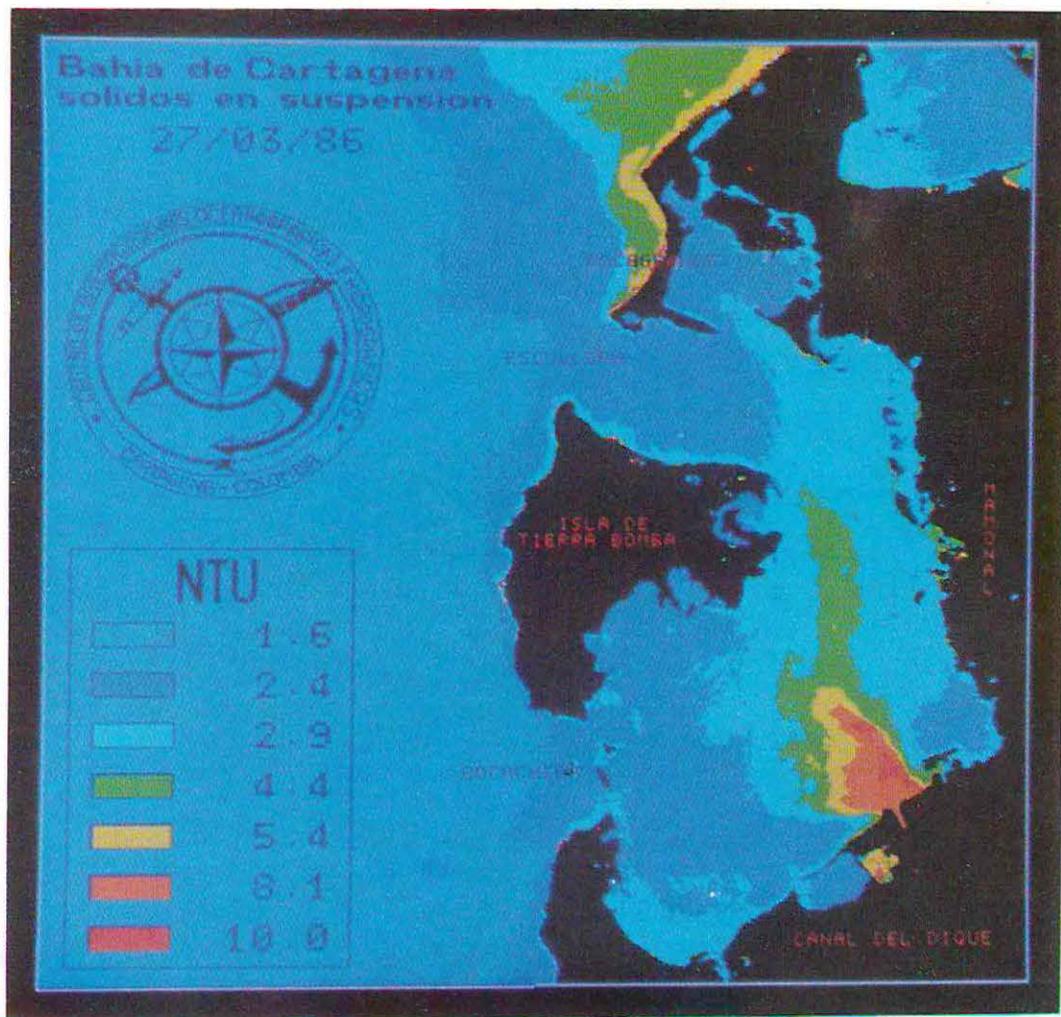


Figura 5. Imagen de la concentración de sólidos en suspensión en la bahía de Cartagena de Indias, del 27 de marzo de 1986; unidades empleadas: Nephelometric Turbidity Units (N.T.U.)

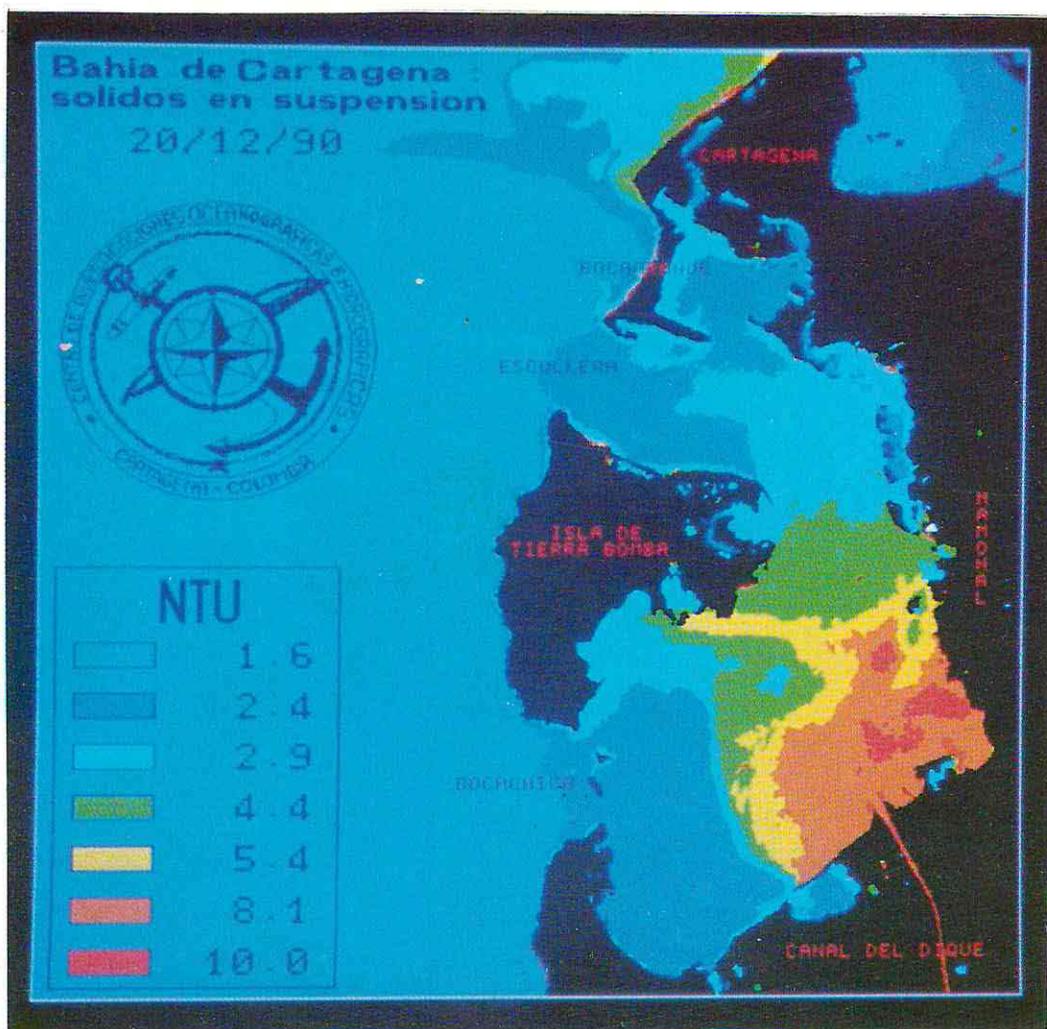


Figura 6. Imagen de la concentración de sólidos en suspensión de la bahía de Cartagena de Indias del 20 de diciembre de 1990; unidades empleadas: Nephelometric Turbidity Units (N.T.U.)

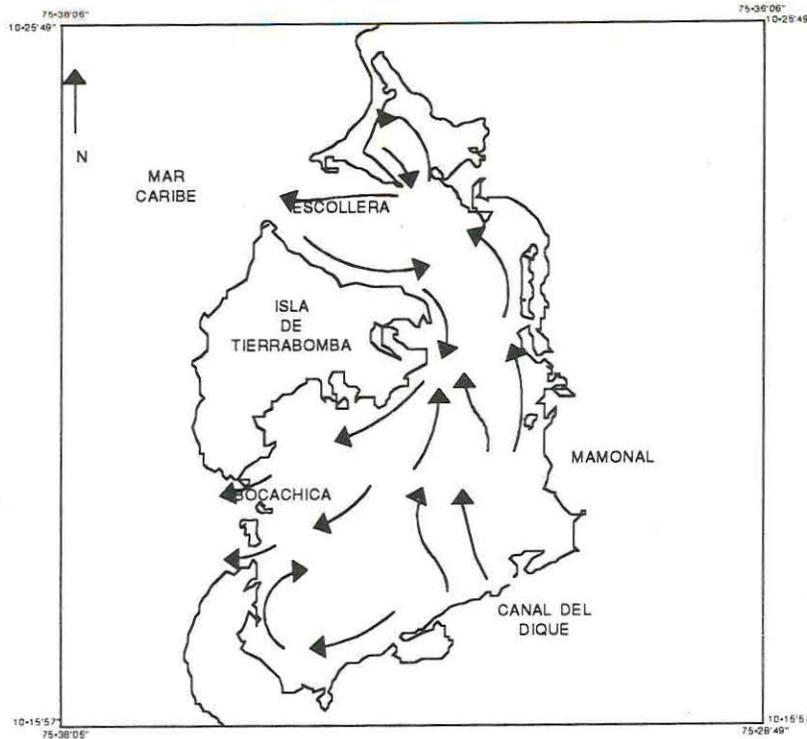


Figura 7. Comportamiento de las corrientes superficiales, deducidas de las imágenes SPOT, del 27 de marzo de 1986 y 20 de diciembre de 1990.

la bahía y cargadas al cordón de islotes del sector oriental; estas corrientes penetran por el extremo oriental a la bahía interior y salen por el extremo occidental para luego producir un intercambio con el mar abierto por el sector de Bocagrande; en el extremo sur de la bahía, las corrientes se desplazan pegadas a la Isla de tierra Bomba para salir superficialmente por Bocachica y el varadero; en el extremo sur, se trata de formar un remolino de dirección igual al movimiento de las manecillas del reloj. Figura 7.

CONCLUSIONES

- El intercambio de aguas en la bahía, se produce a nivel superficial, tanto por Bocagrande como por Bocachica; en el sector de Bocachica, se determinó mediante métodos adicionales la presencia de un

efecto pistón a partir de los cuatro metros de profundidad; lo anterior indica la existencia de un flujo permanente de agua de mar abierto hacia la bahía, sin ser afectado por la condición dinámica superficial.

- La dinámica de la bahía se encuentra afectada por la presencia de los vientos Alisios del noreste, los cuales durante la ausencia de precipitación inducen corrientes superficiales de dirección norte-sur, que acentúan los efectos de las corrientes introducidas en la bahía por el Canal del Dique en el extremo sur.

- En presencia de lluvias, se incrementan las corrientes originadas por el flujo del Canal del Dique, produciéndose así un mayor arrastre de sedimentos, los cuales contribuyen a disminuir las profundidades de los canales navegables entre

los islotes y el costado oriental de la bahía.

- El Canal del Dique aporta la mayoría de los sedimentos en suspensión que llegan a la bahía de Cartagena. Esta repartición varía según las condiciones de las corrientes y precipitación en la región, las cuales son impredecibles. Hemos visto que las masas de agua turbias no pueden salir con facilidad de la bahía y no se mezclan fácilmente con las masas de agua de mar. Estos factores ocasionan riesgos naturales en los siguientes casos:

RECURSOS BIOLÓGICOS

Se observan masas de agua muy turbias desplazándose en la bahía, lejos de la desembocadura del Canal del Dique. Estas masas son un peligro evidente para la camaricultura, ubicada en la periferia sur de la bahía, porque un crecimiento brusco de la turbidez de las aguas de alimentación

a las lagunas tendría un efecto negativo sobre estas especies de gran importancia socio-económica y sobre los ecosistemas de arrecifes coralinos en donde la pluma de sedimentos ha sido uno de los vectores más significantes en el deterioro y su posterior destrucción.

EL TURISMO

Por la misma razón, el agua a lo largo de las playas de Tierra Bomba pueden llegar muy turbias de un día a otro, lo que crea problemas para la instalación de complejos turísticos.

EL TRANSITO DE EMBARCACIONES

Las condiciones dinámicas de la bahía no permiten la salida de los sedimentos en suspensión, haciendo que estos se depositen en la misma, con una rata de sedimentación de 7mm por años (CIOH, 1990) lo que a lo largo del tiempo, afectaría el tránsito de embarcaciones mayores.

BIBLIOGRAFIA

Ben Moussa H. & al (1989). Télédétection des algues macrophytes de l'archipel de Moléne (France); Radiométrie de terrain et application aux données du satellite SPOT. Londres, International journal of Remote Sensing, Volumen 10, pp. 53-69.

CIOH (1990). Estudio para determinar la factibilidad de construcción de un "Nuevo canal de acceso a la bahía de Cartagena". Colombia.

CNES & SPOT-IMAGE (1991). Guide des utilisateurs de données SPOT. Toulouse, Centre National d'Etudes Spatiales et SPOT-IMAGE Ed., Revi-

sion 2, 3 Volumenes, multipaginación.

DUHAUT P. (1985). Influence de l'atmosphère sur les mesures satellitaires; simulation et inversion Lille, Thèse de l'université des sciences et techniques de Lille I Ed., 150 - 180 p.

TANRED. & al. (1991) Columbian caribbean coastal circulation as show by SPOT imagery. In: "proceedings of the fifth latin american symposium on remote sensing". Lima, SELPER, Capítulo peruano Ed., pp. 424 - 438.