

# DETECCIÓN DE SEDIMENTOS SUSPENDIDOS USANDO IMÁGENES DE SATÉLITE Y DATOS DE BARCO

Por: Raúl Aguirre Gómez

La adquisición por el Instituto de Geografía de una estación receptora de imágenes de satélite del tipo de Transmisión de Imagen de Alta Resolución (High Resolution Picture Transmission: HRPT), obtenidas mediante el Radiómetro Avanzado de Muy Alta Resolución (Advanced Very High Resolution Radiometer: AVHRR), ha permitido el desarrollo de varios proyectos de investigación de carácter nacional (Alvarez *et al.*, 1995; Gallegos *et al.*, 1996). El estudio de procesos oceanográficos mediante imágenes satelitarias de este tipo se ha visto enriquecido ampliamente en los últimos años, tanto en análisis de la temperatura de la superficie del mar (Barton, 1995), como en color del océano (Froidefond *et al.*, 1993). Sobre este último tópico versa este trabajo, el cual, a manera de ilustración, muestra un estudio realizado sobre la detección de sedimentos en aguas del Mar del Norte usando imágenes AVHRR y datos *in situ* desde buques. La idea fundamental es la de proponer una aplicación potencial de las imágenes AVHRR en el estudio de los mares mexicanos.

## INTRODUCCIÓN

El estudio de sedimentos suspendidos en el mar es impor-

tante, desde el punto de vista ecológico, dado que éstos son los principales portadores de material inorgánico y orgánico (incluyendo contaminantes) y forman el sustrato para diferentes procesos bioquímicos (Doerffer, 1989). Las partículas sedimentarias afectan la penetración de la luz y el transporte de nutrientes, entre otros procesos.

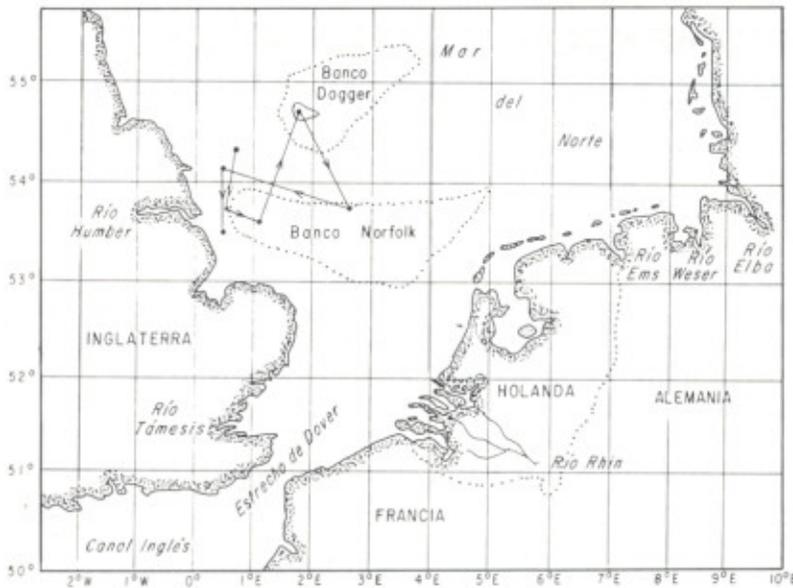
Desde el inicio de los experimentos dedicados al análisis del color de la superficie del océano, varios sensores remotos han sido utilizados para la detección de sedimentos suspendidos (e.g. Klemas *et al.*, 1974). Otros estudios han combinado mediciones tomadas desde buques y satélites (Holligan *et al.*, 1983). En los últimos años, diversos estudios han demostrado la capacidad del sensor AVHRR para la detección de cuerpos de agua con niveles altos de turbidez y/o plancton mediante sus canales 1 y 2, correspondientes a los intervalos del visible (0.55 - 0.68  $\mu\text{m}$ ) e infrarrojo cercano (0.725 - 1.1  $\mu\text{m}$ ) del espectro electromagnético (e.g. Stumpf, 1987; Froidefond *et al.*, 1983). Sin embargo, hasta el momento ningún estudio hecho con imágenes del AVHRR ha considerado la variación de los sedimentos en tiempo y espacio.

Por consiguiente, el objetivo

de la investigación descrita en este trabajo es evaluar la utilidad del sensor AVHRR/NOAA-11 para la detección de sedimentos suspendidos en zonas costeras, apoyada con datos colectados desde buques.

## DESCRIPCIÓN DEL ÁREA EN ESTUDIO

El área en estudio comprende las regiones centro y sur del Mar del Norte, de acuerdo con la división propuesta por Holligan *et al.*, (1989). Esta zona tiene profundidades que van de 20 a 40 m y está delimitada al norte y al este por zonas de bancos de arena (Norfolk Banks y Dogger Bank), al sur por el Canal Inglés y las costas belgas y holandesas, y hacia el oeste por las costas británicas. La ruta de muestreo seguida por el *RSS Challenger* estuvo confinada entre las latitudes 53.5° N a 55° N y longitudes 0.4° E a 2.6° E. La **figura 1** ilustra las partes sur y centro del Mar del Norte, así como la trayectoria de muestreo seguida por el barco. Las características hidrológicas del Mar del Norte han sido descritas en diversas ocasiones (e.g. Otto *et al.*, 1990) por lo que solamente se mencionarán aquí los aspectos más relevantes en la interpretación de las imágenes de satélite.



**Figura 1.** Mapa de las regiones sur y central del Mar del Norte. Las flechas indican la trayectoria seguida por el RSS Challenger.

Las aguas del Océano Atlántico entran al Mar del Norte a través del estrecho de Dover en el sur y entre las islas Shetland y Noruega por el norte. Recibe también aportaciones del Báltico y de los ríos Rhin, Ems, Weser y Elba, localizados en el continente europeo, y de los ríos Támesis, Humber, Forth-tay y Meray, localizados en las costas británicas (Hardisty, 1990). Diversos estudios meteorológicos muestran que la dirección del viento durante el año es, en promedio, sur - occidental con ocurrencia de vientos fuertes entre los meses de noviembre a marzo, lo cual produce un oleaje intenso en el invierno, pudiendo alcanzar alturas de 2 m (Burridge, 1972).

Las mareas observadas en el Mar del Norte son predominantemente una respuesta de las aguas en la plataforma

continental a las mareas generadas en el Atlántico. Las mareas en esta zona cambian conforme se mueven de aguas oceánicas a zonas de poca profundidad en la plataforma continental. Las corrientes producidas por mareas son más fuertes en la parte sur del Mar del Norte, en las costas orientales escocesas y entre las islas Orkney y Shetland. Las variaciones en las corrientes de marea y la profundidad del mar traen como consecuencia la presencia de patrones estacionales en el área en estudio, los cuales son más marcados en los periodos de verano y de invierno. Estas diferencias se deben principalmente a la razón en la cual el calentamiento solar es transferido hacia abajo como consecuencia del mezclado interno producido por vientos y mareas. Si el mezclado es fuerte y el agua tiene poca

profundidad, entonces el calor es distribuido homogéneamente en la columna de agua, pero si el mezclado es débil o el agua es profunda se forma entonces una capa superficial caliente sobre una capa profunda fría, quedando estratificada la columna de agua.

La estratificación temporal y la mezcla por marea son factores que influyen en la turbiedad superficial del agua. Los valores más altos de turbiedad son encontrados en el invierno en aguas poco profundas y sujetas a fuertes corrientes de marea. En el verano hay una reducción general en los niveles de turbidez del agua como resultado de la estratificación de la columna de agua y velocidad del viento menores a la media. Las propiedades ópticas de las regiones sur y central del Mar del Norte son afectadas por la entrada de aguas relativamente claras provenientes del Canal Inglés durante el año (Holligan et al., 1989).

Aun cuando el flujo regular de agua debido a corrientes de marea en el Mar del Norte es importante en procesos de corto plazo (= horas), son los flujos de residuales o de largo plazo (= meses) los que controlan la diseminación de contaminantes a gran escala. En el Mar del Norte la circulación general del agua sigue un patrón ciclónico, por lo que el flujo residual del agua en la región en estudio van en dirección sur - este (Eisma, 1981).

Los estudios de sedimentos del lecho marino revelan que en el Mar del Norte los tipos

más importantes son los de origen terrígeno (arenas, grava, lodos) y biogénico (carbonatos de calcio, material silíceo) (Wingfield *et al.*, 1978). La concentración de sedimentos suspendidos medidos a profundidad media es baja (< 2 mg l<sup>-1</sup>) en las regiones lejanas de la costa, y aumenta en las regiones costeras (> 10 mg l<sup>-1</sup>) (Eisma, 1981). En la región en estudio el contenido de sedimentos terrígenos es mayor que los de tipo biogénico (carbonatos), los cuales están presentes en aproximadamente un 5%, y en raras ocasiones en más de un 20%, de las concentraciones señaladas (Hardisty, 1990).

## ADQUISICIÓN DE DATOS

Inicialmente se eligió un conjunto de 15 imágenes del sensor AVHRR/NOAA-11 correspondientes a fechas relevantes para el proyecto del Mar del Norte (North Sea Project). Desafortunadamente, después del examen visual de la fotografía de cada imagen, solo 6 de ellas presentaron zonas sin nubes sobre el área en estudio. Las fechas de estas imágenes son: 7 de febrero; 9 de abril, 7 de mayo, 4 de julio, 5 de julio y 5 de agosto, todas correspondientes a 1989. Las imágenes fueron obtenidas a través de la estación receptora de imágenes de la Universidad de Dundee, Escocia, y proporcionadas por los servicios de cómputo de la Universidad de Plymouth, Inglaterra. Las características del paso del satélite para estas

fechas se muestran en la **Tabla 1**. Los datos de buque fueron tomados por el RSS Challenger, el cual realizó investigaciones y experimentos en el área en estudio durante 15 meses. Por espacio de 12 días cada mes se tomaron datos *in situ* sobre las características físicas, químicas, biológicas y geológicas del Mar del Norte.

## METODOLOGÍA

Las imágenes de satélite fueron procesadas con el *International Imaging System (IIS)*, modelo 75 y con paquetería desarrollada en Plymouth, para procesar imágenes AVHRR (Holligan *et al.*, 1989).

Los valores de la energía luminosa emergente (radianza) del cuerpo de agua fueron calculados a partir de los datos crudos de las imágenes, después de filtrar efectos atmosféricos, tales como absorción por moléculas de aire y ozono, que reducen la señal del agua, y la dispersión de Rayleigh (moléculas de aire) y de Mie (aerosoles), las cuales se suman a la señal del agua.

La corrección atmosférica por efectos de dispersión de Rayleigh estuvo basada en los procedimientos propuestos por Gordon *et al.* (1988). Los efectos por absorción debida al ozono fueron estimados a partir del conocimiento de la geometría sol - pixel - satélite y de datos de la presión atmosférica en la superficie y concentración de ozono en la columna. Así, la corrección se realizó sustrayendo la concentración conocida de ozono de las imágenes. La dispersión de Mie se calculó según el método propuesto por Arnone y La Viollete (1984), el cual consiste en hacer una sustracción interactiva entre las bandas 1 y 2 del AVHRR hasta que ciertos patrones causados por los aerosoles desaparezcan, a juicio del observador, de las imágenes y se obtenga un valor para el coeficiente de Angstrom. Este método, aunque subjetivo, es la mejor alternativa para analizar cuerpos de agua costeros. Finalmente, la presencia de sedimentos en el agua fue revelada mediante un procedimiento de

**Tabla 1.** Características del paso del satélite para las seis fechas analizadas

Fecha	Satélite	Día Juliano	Inclinación	Hora de toma
7/Feb/1989	NOAA-11	38	8.92733	12:16
9/Abril/1989	NOAA-11	99	8.936539	13:42
7/May/1989	NOAA-11	126	8.937523	12:27
4/Jul/1989	NOAA-11	185	8.940231	12:23
5/Jul/1989	NOAA-11	186	8.940231	12:12
5/Agos/1989	NOAA-11	217	8.940102	13:34

realce y produciendo un umbral con el canal 2 para los pixeles con valores digitales superiores a 80, con lo cual se enmascararon tierra y nubes.

Todas las imágenes usadas en este estudio fueron georreferenciadas a una proyección de Mercator usando un modelo orbital del satélite y la geometría de observación (Snyder, 1982).

Los datos *in situ* fueron analizados mediante dos programas escritos en lenguaje FORTRAN, desarrollados especialmente para este fin: SHIPEX y PIXEX. El programa SHIPEX proporcionó información sobre latitud, longitud, atenuación, sedimentos suspendidos totales y, derivados de este parámetro, sedimentos orgánicos e inorgánicos. El programa PIXEX fue diseñado para proporcionar el valor digital correspondiente a la posición del barco y, de esta manera, relacionar los datos medidos con ambas plataformas.

La comparación entre los datos de barco y satélite se realizó usando un criterio de simultaneidad consistente en seleccionar los datos del barco medidos en el intervalo de una hora antes y una hora después del paso del satélite. Este criterio, sin embargo, no pudo ser aplicado en todos los casos, ya que en ocasiones las mediciones realizadas por el barco estaban fuera del intervalo propuesto y, como se mostrará posteriormente, la bondad del intervalo propuesto para la simultaneidad probó estar sujeta a condiciones estacionales, pudiendo ampliarse en fechas de verano.

Los números digitales de los canales 1 y 2 del sensor AVHRR fueron convertidos a valores radiométricos de radianza con el fin de relacionarlos con los datos del buque. Dado que la sensibilidad de los canales 1 y 2 se ha degradado con el tiempo, se aplicaron factores de corrección de calibración (Holben et al., 1990). Con esta información se llevó a cabo un análisis de regresión lineal para establecer la relación existente entre los datos colectados por el RSS Challenger y los valores de radianza medidos por el AVHRR/NOAA-11. El parámetro estadístico usado para este fin fue el coeficiente de determinación ( $R^2$ ), el cual sirve para mostrar la relación uno a uno entre los datos observados y los valores calculados, explicando así el porcentaje de variancia entre ambos conjuntos de valores. Este parámetro se calcula elevando al cuadrado el coeficiente de correlación de las variables.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos

muestran un amplio espectro de valores para el coeficiente de determinación  $R^2$ , partiendo de valores bajos ( $R^2 = 0.024$ ) obtenidos en el periodo de invierno - primavera hasta valores altos ( $R^2 = 0.94$ ) durante el periodo de verano. Estos resultados están en función de diversos factores entre los que pueden mencionarse principalmente las características estacionales y las condiciones meteorológicas presentes en el área en estudio y, en grado variable, factores tales como la simultaneidad entre los datos de buque e imágenes satelitarias y una adecuada corrección atmosférica en las fechas de muestreo. En este último aspecto la corrección por aerosoles debe considerarse como una fuente de error sistemática ya que, a partir de un criterio subjetivo, puede afectar en diferente grado el análisis de cada una de los casos estudiados.

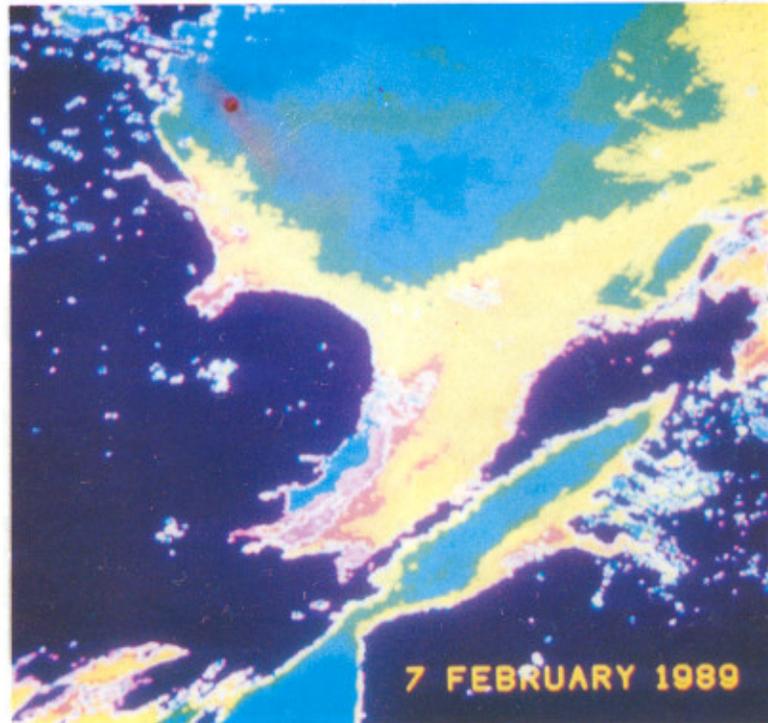
El análisis de regresión lineal muestra que existe una clara diferencia entre los periodos invierno - primavera y verano. En el primer caso se obtuvieron valores bajos en el coeficiente de determinación  $R^2$  y

**Tabla 2.** Valores de regresión calculados para estimar la concentración de Sedimentos Suspendidos Totales [SST] a partir de valores de radianza del sensor AVHRR/NOAA-11 (X):  $[TSS] = mX + b$

Fecha/Parámetro	No. de Obs.	Pendiente (m)	Constante (b)	$R^2$
7/Feb/89	27	-5.52	62.46	0.024
9/Abril/89	6	-12.42	64.21	0.242
7/May/89	48	-9.88	120.93	0.136
4/Jul/89	10	1.03	49.09	0.720
5/Jul/89	14	13.54	18.35	0.939
5/Agos/89	30	2.36	35.76	0.810

pendientes negativas. Durante el verano se obtuvieron valores altos de  $R^2$  y pendientes positivas, implicando un aumento lineal de la radianza conforme la concentración de sedimentos aumenta. La **tabla 2** muestra los valores del análisis de regresión lineal.

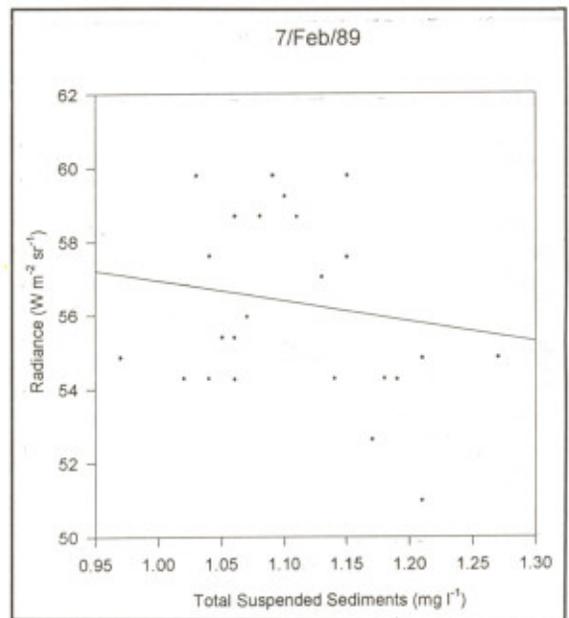
Estos resultados pueden explicarse, en gran medida, por las características estacionales y las condiciones meteorológicas del Mar del Norte, donde los vientos son más fuertes en la época de invierno - primavera que en la del verano. Esta situación produce que el transporte superficial de sedimentos así como cambios en el nivel del mar sean mayores durante el invierno, afectando por consiguiente las características reflectivas del cuerpo de agua. Adicionalmente, la distribución de la radiación solar total en las islas británicas es tal que durante el verano la cobertura por nubes es menor que en otras épocas del año, lo cual permite hacer un análisis adecuado con imágenes de satélite. Finalmente, es evidente que la estratificación temporal y la mezcla por marea influyen en la turbiedad superficial del agua y por consiguiente en las propiedades reflectivas del agua marina. En el invierno, en aguas someras y sujetas a fuertes corrientes de marea, la distribución de sedimentos es grande y produce niveles altos de turbiedad. En el verano, los niveles de turbidez del agua sufren una reducción general gracias a la estratificación de la columna de agua y a velocidades de viento bajas, lo



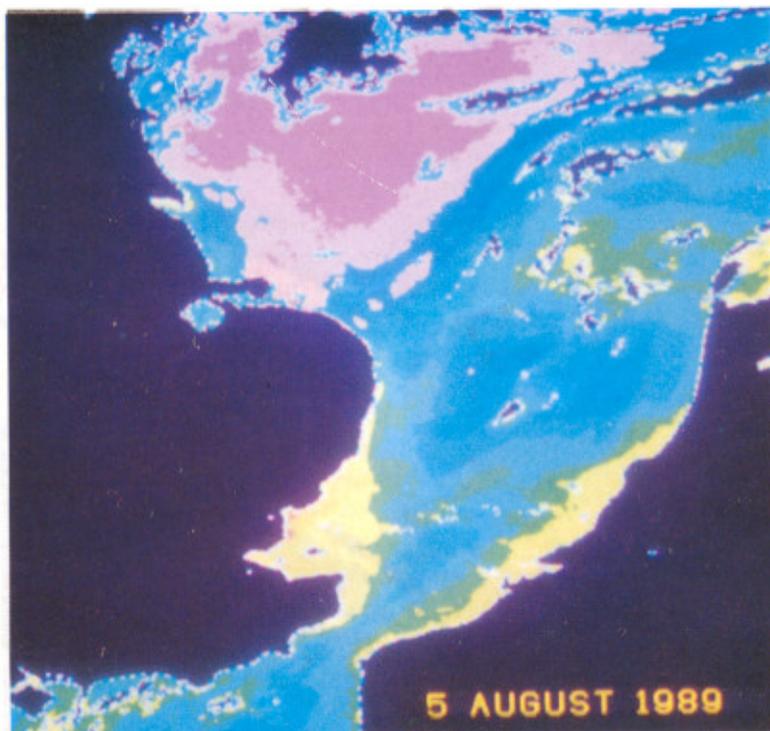
**Figura 2a.** Imagen del 7 de febrero de 1989 mostrando una larga pluma de sedimentos (tonos amarillos) en la parte sur del Mar del Norte y en la región muestreada por el barco.

cual da como resultado mejores condiciones para analizar el color del océano.

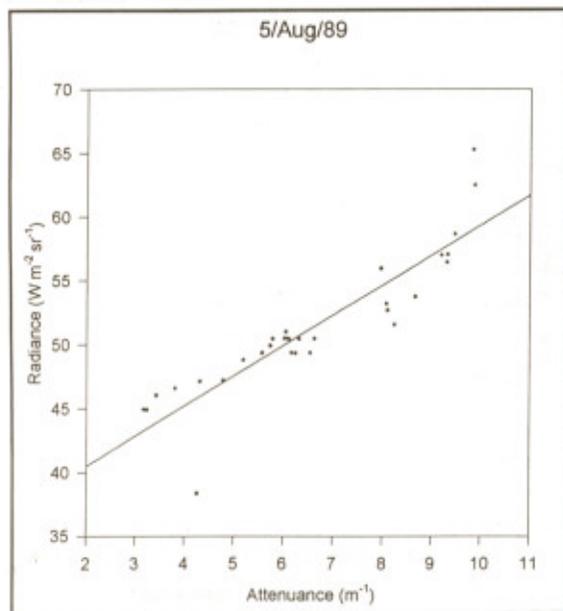
A manera de ilustración se presentan dos imágenes AVHRR de la zona en estudio correspondientes a cada uno de los periodos analizados. La primera imagen (**figura 2a**), perteneciente al periodo de invierno (7 de febrero), muestra una larga pluma de sedimentos (tonos amarillos) en la parte sur del Mar del Norte, extendiéndose desde la costa oriental de Inglaterra hasta las costas holandesas. La imagen presenta la acción de fuertes corrientes de marea sobre las aguas someras de esta región, características de la época invernal. En la región muestreada por el barco se puede apreciar el arrastre de



**Figura 2b.** Diagrama de dispersión entre valores de radianza y sedimentos suspendidos totales para la imagen del 7 de febrero.



**Figura 3a.** Imagen del 5 de agosto de 1989, mostrando regiones estratificadas en el sector cubierto por el barco (tonos violetas) y una reducción del arrastre de sedimentos en las costas inglesas y continentales.



**Figura 3b.** Diagrama de dispersión entre valores de radianza y sedimentos suspendidos totales para la imagen del 5 de agosto.

## CONCLUSIONES

El análisis de regresión lineal muestra que existe una marcada diferencia entre el periodo de invierno - primavera y el de verano. Esta diferencia se puede apreciar en las características de las curvas de regresión y los coeficientes de determinación  $R^2$ . Así, en la época invierno - primavera las pendientes de las curvas son negativas y los valores  $R^2$ , bajos, mientras que en el verano las pendientes son positivas y los valores  $R^2$ , considerablemente más altos. Estos resultados pueden ser entendidos mediante argumentos meteorológicos y climáticos, dado que en los periodos de vientos fuertes (invierno), las olas y las corrientes perturban y resuspenden los sedimentos del fondo dando lugar a aguas mezcladas, lo cual afecta la transparencia óptica del agua. La concentración de sólidos suspendidos en estas ocasiones puede ser considerablemente mayor que en épocas con condiciones meteorológicas más estables (Collins *et al.*, 1981). Estos hechos refuerzan la importancia de establecer un criterio de simultaneidad entre datos de barco y de satélite. Los resultados obtenidos sugieren que el intervalo de  $\pm 1$  hora es adecuado para el periodo invierno - primavera y puede ampliarse durante el verano cuando las características ópticas del Mar del Norte permanecen estables por intervalos de tiempo mayores.

Para el Mar del Norte, la

eficacia en la detección de sedimentos suspendidos depende primordialmente de la temporada del año en la cual se realice el estudio. Los resultados indican que el estudio de aguas costeras es todavía un campo abierto de

investigación, por lo que puede sugerirse un mayor número de estudios estacionales con el fin de obtener un mejor entendimiento de las aguas costeras usando técnicas de percepción remota.

La estación receptora de imágenes de satélite con que cuenta el Instituto de Geografía de la UNAM, proporciona así una gran posibilidad para realizar estudios de este tipo en las aguas costeras mexicanas.

## REFERENCIAS

- Alvarez, R., R. Bonifaz, G. Gómez y R. Vidal (1995), "Sistema dual de recepción de imágenes AVHRR - HRPT para monitoreo de riesgo volcánico, de incendios y de huracanes", *Memorias del VIII Simposio SELPER*, Puerto Vallarta, Instituto de Geografía, UNAM, México, pp. 892-900.
- Arnone, R. A. y P. E. La Violette (1984), "A method of selecting optimal Angstrom coefficients to obtain quantitative ocean colour data from NIMBUS-7 CZCS", *Proceedings of SPIE*, **481**, pp. 187-193.
- Barton, I. J. (1995), "Satellite - derived sea surface temperatures: Current status", *Journal of Geophysical Research*, **100** NO. C5, 8777-8790.
- Burridge, D. M. (1972), "Some aspects of the climate of the North Sea as observed from offshore installations", *London Weather Centre Memorandum No. 22*.
- Collins, M. B., C. L. Amos y G. Evans (1981), "Observations of some sediment - transport processes over intertidal flats, The Wash, U. K.", *Special publications of the International Association of Sedimentologist*, **5**, 81-98.
- Doerffer, R., J. Fischer, M. Stossel y C. Brockman (1989), "Analysis of thematic mapper data for studying the suspended matter distribution in the coastal area of the German bight (North Sea)", *Remote Sensing of Environment*, **28**, pp. 61-73.
- Eisma, D. (1981), "Supply and deposition of suspended matter in the North Sea," *Special publications of the International Association of Sedimentologist*, **5**, pp. 415-428.
- Froidefond, J. M., P. Castaing, J. M. Jouanneau y R. Proud'homme (1993), "Method the quantification of suspended sediments from AVHRR NOAA-11 satellite data", *International Journal of Remote Sensing*, **14**(5), pp. 885-894.
- Gordon, H.R., J. W. Brown y R. H. Evans (1988), "Exact Rayleigh scattering calculations for use with the NIMBUS-7 Coastal Zone Colour Scanner", *Applied Optics*, **27**(5), pp. 862-871.
- Gallegos, A., J. Barberán, S. Czitrom, A. Fernández y R. Rodríguez (1996), "Oceanografía satelital en el Instituto de Ciencias del Mar y Limnología", *GEO-UNAM, Boletín Informativo del Área de Ciencias de la Tierra*, Instituto de Geografía, UNAM, vol. 3, núm. 2, pp. 3-8.
- Hardisty, J. (1990), *The British Seas* (UK. Routledge).
- Holbein, B. N., Y. J. Kaufman y J. D. Kendall (1990), "NOAA-11 AVHRR visible and near-IR inflight calibration", *International Journal of Remote Sensing*, **11**(8), pp.1511-1519.
- Holligan, P. M., M. Violler, D. S. Harbour, P. Camus y M. Champagne-Philippe (1983), "Satellite and ship studies of coccolithophore production along a continental shelf edge", *Nature*, **304**, pp. 339-342.
- Holligan, P. M., T. Aarup y S. B. Groom (1989), "The North Sea satellite colour atlas", *Continental Shelf Research*, **9**(8), pp. 665-765.
- Klemas, V., D. Bartlett, W. D. Philpot y R. Rogers (1974), "Coastal and estuarine studies with ERTS-1 and Skylab", *Remote Sensing of Environment*, **3**, pp. 153-174.
- Otto, L., J. T. F. Zimmerman, G. K. Furnes, M. Mork, R. Saetre y G. Becker (1990), "Review of the physical oceanography of the North Sea", *Netherlands Journal of Sea Research*, **26**(2-4), pp. 161-238.
- Snyder, J. P. (1982), *Map projections used by the Geological Survey*, U. S. Geological Survey Bulletin, 1532, 313 pp.
- Stumpf, R. P. (1987), "Application of AVHRR satellite data to the study of sediment and chlorophyll in turbid coastal waters", NOAA Technical Memorandum NESDIS AISC 7, Washington, D. C., 50 pp.
- Wingfield, R. T. R., C. D. R. Evans, S. E. Deegan y R. Floyd (1978), "Geological and geophysical survey of the Wash, report 78/18", Institute of Geological Science, Her Majesty's Stationery Office, London.