



ANÁLISIS DEL USO DEL SUELO POR ACUICULTURA EN EL DELTA EN EL CANAL DEL DIQUE ENTRE 1986 Y 2003 (CARIBE COLOMBIANO)

Yves-François THOMAS¹, Loïc MÉNANTEAU², Carolina GARCIA-VALENCIA³

¹Laboratoire de Géographie Physique, UMR - 8591 CNRS, Meudon, Francia. E-mail:

thomas@cnrs-bellevue.fr

²Géolittomer, UMR - 6554 CNRS, Nantes, France. E-mail: loic.menanteau@univ-nantes.fr

³Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras, INVEMAR, Santa Marta, Colombia. E-mail: cgv@invemar.org.co

Resumen - Al sur de la ciudad de Cartagena de Indias (litoral Caribe de Colombia) se encuentra el Canal del Dique, brazo natural canalizado del Río Magdalena que forma un delta de tres bocas. Este delta, colonizado por manglares donde dominan *Rhizophora mangle*, *Avicennia germinans*, *Laguncularia racemosa* y *Pelliciera rhizophorae*, fue explotado tradicionalmente por mucho tiempo. Las zonas de manglares fueron taladas para usos como producción de madera para construcción y carbón de madera. Adicionalmente, a partir de los años ochenta predominó una actividad agroindustrial con la instalación de infraestructura acuícola (piscinas) para el levante de camarón *Penaeus vannamei* y *P. stylirostris* con miras a su exportación. El desarrollo de la industria acuícola indujo una fuerte presión sobre el sector del Canal del Dique transformando radicalmente el paisaje del delta.

Los autores se proponen mostrar, gracias a un seguimiento satelital utilizando las imágenes Landsat TM, ETM y Spot HRV como HRG (18 imágenes en total), la evolución del uso del suelo del delta entre 1986 y 2003. La interpretación de las imágenes permitió cartografiar la dinámica de las superficies convertidas en infraestructuras acuícolas y la alteración de la hidrología del delta (desviación de canales preexistentes, apertura de nuevos canales, drenaje de ciénagas). La crisis de la industria acuícola debida a la aparición en las fincas camaroneras del virus del síndrome de Taura, se presenta desde 1992 persistiendo hasta 1997. Los resultados del estudio tienden a desmentir la aserción común según la cual el desarrollo de la industria acuícola se haría sobre el manglar. En la zona estudiada, principalmente la superficie de lagunas y salares se convirtieron en infraestructuras acuícolas.

La teledetección espacial resultó ser una herramienta eficaz para llevar a cabo un seguimiento satelital del desarrollo de la acuicultura en el delta de una zona tropical, el Canal del Dique. La crónica de imágenes Landsat (TM y ETM) y de Spot (HRV y HRG) utilizada permitió cartografiar de forma precisa, anual o bianualmente, la dinámica de la superficie del manglar así como la extensión de las piscinas acuícolas. Las imágenes satelitales, por su carácter repetitivo, sinóptico y multiespectral, se constituyen en un instrumento fundamental de vigilancia del litoral.

Abstract - In the southern region of Cartagena de Indias city (Colombia's Caribbean coast), is the canal of the Dique, canalized natural arm of the Magdalena river that forms a three mouths delta. This delta is colonized by mangroves dominated mainly by *Rhizophora mangle*, *Avicennia germinans*, *Laguncularia racemosa* and *Pelliciera rhizophorae*. It was traditionally exploited for a long time. Mangroves were degraded to be used for wood production for construction and for vegetal coal. Additionally, during the eighties an agro-industrial activity with the aquaculture infrastructure installation (ponds), predominated for breeding *Penaeus vannamei* shrimp and *P. stylirostris* for exportation. The development of the aquaculture industry induced a strong pressure on the sector of the canal of the Dique, transforming radically the delta's landscape.

The authors intend to show the evolution of the land use in the delta between 1986 and 2003, using a satellite track down with the Landsat TM, ETM, Spot HRV and HRG images (18 images in total). The interpretation of these images allowed mapping the dynamics of the surfaces that were converted into structures for aquaculture. The alteration of the delta's hydrology (deviation of preexisting channels, opening of new channels, coastal lagoon drainage) was mapped as well. The aquaculture industry crisis, as a result of the appearance of the syndrome of Taura virus in the shrimp farms, began during 1992 and persisted up to 1997. The results of this study show that the common belief of mangrove degradation due to the development of the aquaculture industry is not real. In the study area, mainly the surfaces of lagoons and salty swamps were used to establish aquaculture infrastructure.

Spatial teledetection was a useful tool to carry out a satellite track down of the aquaculture development in the delta of a tropical zone: the canal of the Dique. The Landsat (TM and ETM) and Spot (HRV and HRG) images chronicle used, allowed the accurate mapping (yearly or every two years) of the dynamics of the mangrove surface as well as the extension of the aquaculture ponds. Given their repetitive, synoptic and multispectral characters, satellite images constitute a fundamental instrument for coastal monitoring.

Palabras clave - Manglar, Acuicultura, Imágenes satelitales (*Landsat y Spot*), Colombia (*Costa Caribe de*), Dique (*Canal del*).

Key words - Mangrove, Aquaculture, Satellite images (*Landsat and Spot*), Colombia (*Caribbean coast*), Dique (*Canal of*).

INTRODUCCIÓN

En Colombia, los manglares cubren una superficie total de cerca de 371 081 has y se distribuyen desigualmente sobre las dos costas: 282 835 has en la costa Pacífica y 88 246 ha en el litoral del Caribe. En este último existen deltas formados por los ríos Atrato, Sinú, Magdalena y el Canal del Dique. En el Canal del Dique se encuentran 8 801 has de manglar, situadas en su mayoría en el departamento de Sucre (Sánchez- Páez Heliodoro *et al.*, 2004). El delta del Canal del Dique comprende desde Punta Comisario, al sur y al norte, la salida a Pasacaballos del mismo nombre hacia la parte meridional de la Bahía de Cartagena de Indias (Figura 1). Está formado por sedimentos de origen aluvial de clase de granulometría que van desde arenas medias a finas, así como

también material arcilloso rico en materia orgánica hacia los sectores donde el manglar está bien desarrollado (Leblanc, 1983).

Los manglares del delta tienen una composición florística caracterizada por la presencia de *Rhizophora mangle*, *Avicennia germinans*, *Laguncularia racemosa*, *Conocarpus erectus* y *Pelliciera rhizophorae* y por vegetación asociada en la que dominan *Pterocarpus officinalis*, *Nostichodendron colombianum*, *Ceiba pentandra*, *Lecythis sp.* y *Ficus* (Tibaquirá *et al.*, 1980). La distribución de las especies no es uniforme: sobre una primera franja, muy frecuentemente, domina *R. mangle*; más adentro, se encuentra *A. germinans* y/o *L. racemosa*, finalmente, a lo largo de los canales internos, *R. mangle* se encuentra usualmente mezclado con *P. rhizophorae*.



Figura 1. Localización de la zona de estudio.

La ocupación del delta del Canal del Dique es antigua, como lo prueba el yacimiento arqueológico de Puerto Chacho (Puerto Badel) datado de 3100 BC establecido sobre una terraza aluvial cercana al canal (Reichel-Dolmatoff, 1965). Está constituido por un montículo conchífero (“conchero”) que contiene restos de peces marinos así como conchas de moluscos de aguas poco profundas y salobres (Legros, 1992). El Canal del Dique actual tiene un trazado artificial ya que se construyó en 1650 por los españoles (Lemaître, 1982). Con una extensión de 115 km, tuvo como efecto la conexión entre numerosas ciénagas, desde Calamar hasta Pasacaballos. Inicialmente desembocaba en la bahía de Barbacoas y hacia mediados de los años treinta trabajos de excavación entre Barú y el continente permitieron al Canal del Dique desembocar en la Bahía de Cartagena de Indias (Leblanc, 1985). El delta, cuya superficie es de 4 337 km², tiene en su desembocadura tres bocas laterales: el Caño Correa, que corresponde al curso natural del brazo del

Magdalena, el Caño Matunilla y el Caño Lequerica, que son el resultado de dragados efectuados en 1958 por el Ministerio de Obras Públicas y Transporte (MOPT). Posteriormente, en 1982, se emprendieron otros trabajos para profundizar y rectificar el canal. Estas transformaciones tuvieron consecuencias sobre la dinámica sedimentaria (Leblanc, 1985) y el paisaje (depósitos de dragados; Viña, 1990) del delta. Así pues, de 1961 a 1985, se observa un progradación de 2.3 km (cerca de 100 m al año) del frente aluvial del Caño Lequerica, lo que causó la emersión de 190 ha de tierra y el depósito de 11'000 000 de m³ de sedimentos.

Junto al cultivo de arroz en extremo marginal y a la actividad ganadera reducida, subsisten actividades vinculadas a la explotación de los manglares con utilización de los árboles para la producción de madera útil en construcción, de pulpa de madera, palos y leña, así como el uso específico de *R. mangle* para la producción de carbón de madera (Álvarez-León y Polanía, 1996). Se emplean también *A. germinans* y *R. mangle* en la farmacopea popular, ya que se conoce la goma extraída de la resina de *A. germinans* por su eficacia en el cuidado de dolores pulmonares, y las infusiones de corteza de *R. mangle*, por sus propiedades antipiréticas, así como anti-diarreico y anti-hemorrágico (Pérez-Arbelaez, 1978).

Es importante no olvidar las actividades pesqueras, de gran interés para la población local. Así pues, Tibaquirá *et al.* (1980) indican que el producto pesquero en los sistemas acuáticos de bosques de manglar, puede producir un beneficio económico tres veces superior al proporcionado por la producción y la comercialización de productos forestales, al cual se le puede añadir la renta de las actividades derivadas de la recolección de los crustáceos (*Callinectes sapidus*, *Cardisoma guanhumí*) y moluscos (*Crassostrea rhizophorae*, *Anomalocardia brasiliensis*, *Donax sp.* y *Melongena melongena*).

Contrariamente a las previsiones pesimistas iniciales, las actividades tradicionales del delta del Canal del Dique, desde 1980, han cambiado el lugar progresivamente, debido en gran parte, a la acuicultura semi-intensiva o intensiva del camarón, la “camaronicultura”. Basada en una tecnología importada de Ecuador, Francia, Estados Unidos y Taiwán, esta acuicultura se

desarrolló a partir de especies marinas nativas: *Penaeus californiensis*, *P. stylirostris*, *P. vanamei* — especie del Pacífico — y de una especie del Pacífico asiático *Macrobrachium rosenbergii* (Álvarez-León y Polania, 1996). Entre ellas la especie *P. vanamei* (camarón blanco) representa hoy el 95% de la producción contra un 5% para *P. stylirostris* (camarón azul).

Sobre el Caribe colombiano se contaron en el año 2003 doce granjas y quince laboratorios de producción de juveniles, todos situados en los departamentos de Bolívar, Córdoba y Sucre. Cinco plantas de tratamiento y comercialización están, por su parte, todas establecidas en la ciudad de Cartagena de Indias. A pesar del carácter relativamente marginal de la producción de camarones de la especie *P. vanamei* (7 218 toneladas) a escala mundial (3%, producción mundial en el año 2002: 221 433 ton), las granjas acuícolas de la costa del Caribe proporcionaron hasta 1998

más del 81% de la contribución nacional (Aguilera, 1998). La comercialización casi enteramente se vuelve hacia la exportación y se vende en Europa (84.7%), Estados Unidos (11.4 %) y Japón (3.3%).

A medida que se desarrolló la producción de camarón (Figura 2), fuertes críticas se dieron en contra de la conversión de una importante extensión de manglar, ciénagas y suelo desnudo en zonas acuícolas (Tabla 1) con la instalación de todo un conjunto de infraestructura (caminos de acceso, espolones, canales, estaciones de bombeo, estanques y piscinas), ocasionando una drástica modificación al paisaje. Se cuestionaron prácticas susceptibles de impactar negativamente en el medio ambiente: salinización de los suelos, relleno de las ciénagas, contaminación de las aguas y pérdida de hábitats y nichos de gran cantidad de especies vegetales o animales tanto acuáticas como terrestres.

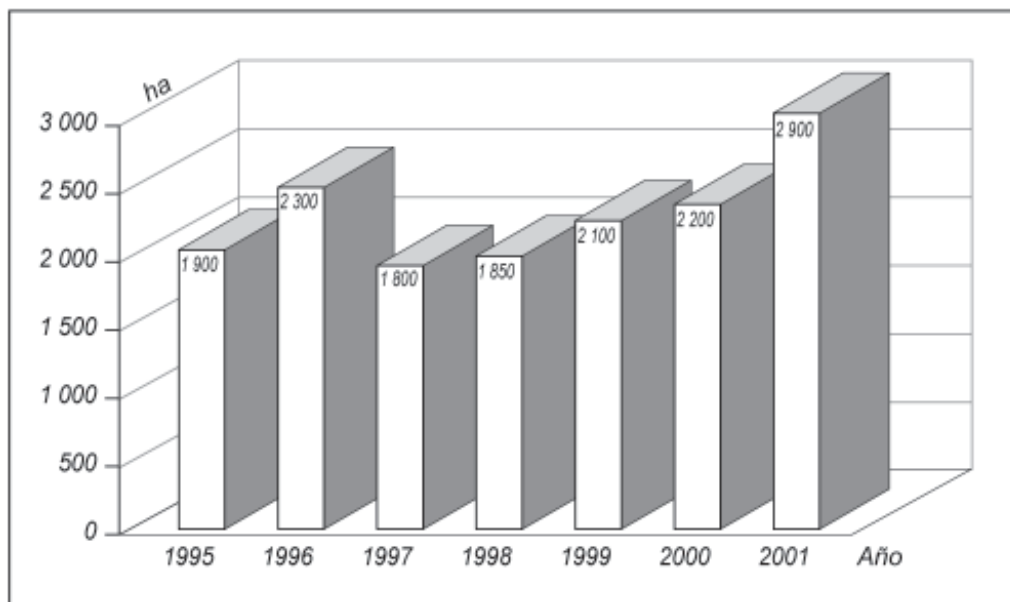


Figura 2. Evolución de la superficie de las piscinas acuícolas sobre el litoral del Caribe de Colombia entre 1995-2001.

Así pues, para el área del Dique la Corporación Autónoma Regional del Canal del Dique CARDIQUE (1998) dio como título, al concluir su proyecto MANGLARES, “*Deterioro y extinción por el aprovechamiento forestal único realizado por las camaronerías en Galerazamba y Bahía de Barbacoas*”. Las ONG medioambientales, en el resto del mundo, fueron más lejos en sus críticas: la asociación

ecologista Indymedia Perú no dudó en definir la acuicultura como el paso “de la panacea económica a la catástrofe ecológica”, y Greenpeace exigió una prórroga global e indefinida sobre toda extensión de la acuicultura del camarón hasta que se demostrara que esta actividad era una “práctica ecológica, saludable y socialmente justa”.

Tabla 1. Principales características de camaronicultura en el delta del Canal del Dique.

Producción	
Sistema de piscinas	utilización de agua de mar
Densidad de siembra	15 a 30 camarones por m ²
Ciclo de producción	de 2 a 2.8 al año
Talla comercial	entre 12 y 17 gramos
Duración del ciclo	entre 98 y 120 días
Descanso entre ciclos	20 días
Mortalidad	entre 45 y 60%
Rendimiento	de 1.500 a 5.700 kg.año ⁻¹
Exportación	entre 80 y 100%
Capital nacional	100 %

Los autores se proponen utilizar la crónica de imágenes proporcionadas por los satélites de observación de la Tierra Landsat y Spot entre 1986 (año de aparición de las primeras explotaciones) y 2003 (este trabajo se realizó en 2004) para analizar las interacciones entre los bosques de manglar y la acuicultura en el delta del Canal del Dique. El presente trabajo tiene como principales objetivos la definición de la

superficie cubierta por los bosques de manglar, la cuantificación de la evolución de su superficie, la evaluación — primera aproximación — de su estado mediante el empleo de índices de vegetación y finalmente la estimación de la dinámica espacial de las áreas acuícolas localizadas dentro o fuera del manglar.

DATOS Y METODOLOGÍA

Las imágenes obtenidas por radiómetros distintos y en condiciones diferentes, tanto ángulo de observación del radiómetro como de iluminación solar, fueron objeto de distintas correcciones para su análisis.

Imágenes Landsat y Spot. El estudio de las zonas de manglar del Canal del Dique fue realizado empleando una serie de 18 imágenes Landsat y Spot. La tabla 2 lista sus principales características (naturaleza del radiómetro, fecha, hora y condiciones de adquisición de las imágenes).

Tabla 2. Imágenes Landsat y Spot utilizadas.

Satélite	Radiómetro	KJ	Fecha	Hora(UTC)	Días acumulados	Latitud centro imagen	Longitud centro imagen	Ángulo cenital(°)	Ángulo de incidencia(°)	Visibilidad horizontal(m)
Landsat 5	TM	10-53	18/01/1986	14.846944	0	10.122778	-76.343056	47	0	10.000 ⁽¹⁾
Spot 1	HRV1, XS	641-330/0	27/03/1986	15.621111	68	10.017569	-75.574514	23.9	2.3 (R)	10.000 ⁽¹⁾
Landsat 5	TM	09-53	13/12/1986	14.601130	329	10.116389	-74.833056	47	0.	9.900 ⁽¹⁾
Spot 1	HRV1, XS	641-330/0	10/11/1987	15.553333	661	10.017778	-75.591458	32.4	10.4 (R)	11.200 ⁽¹⁾
Landsat 4	TM	09-53	11/01/1989	14.829317	1089	10.116389	-74.816389	46	0.	9.900 ⁽¹⁾
Landsat 5	TM	10-53	28/12/1989	14.776038	1440	10.122778	-76.343056	48	0.	9.900 ⁽¹⁾
Spot 2	HRV2, PAN	641-330/0	09/04/1990	15.682778	1542	10.014652	-75.529167	20.7	6.3 (L)	9.900 ⁽¹⁾
Landsat 4	TM	09-53	25/07/1990	14.775195	1649	10.122778	-74.798056	35	0.	10.000 ⁽¹⁾
Spot 2	HRV2, XS	641-330/0	10/01/1991	15.567500	1818	10.017847	-75.553542	39.5	10.0 (R)	15.000 ⁽¹⁾
Spot 2	HRV1, XS	641-330/0	25/07/1992	15.456667	2380	10.018542	-75.709861	26.4	26.1 (R)	9.900 ⁽¹⁾
Spot 3	HRV1, XS	641-329/5	01/04/1995	15.601327	3360	10.252986	-75.344653	23.0	1.0 (R)	10.000 ⁽¹⁾
Spot 2	HRV2, XS	641-329-5	14/08/1997	15.428346	4246	10.253819	-75.618889	25.2	25.8 (R)	11.000 ⁽¹⁾
Spot 4	HRVIR2, XI	641-329/6	24/12/1998	15.697327	4743	10.199653	-75.323681	38.7	7.6 (L)	7.300 ⁽²⁾
Landsat 7	ETM ⁺	09-53	25/11/2000	15.127970	5445	10.122778	-74.790833	39.4	0.	9.500 ⁽³⁾
Landsat 7	ETM ⁺	10-53	18/12/2000	15.232239	5468	10.122778	-76.346111	42.7	0.	11.000 ⁽³⁾
Landsat 7	ETM ⁺	09-53	25/09/2001	15.096380	5749	10.122778	-74.849722	28.5	0.	8.500 ⁽³⁾
Landsat 7	ETM ⁺	09-53	02/01/2003	15.094494	6213	10.122778	-74.810556	43.8	0.	5.600 ⁽³⁾
Spot 5	HRG1, XG	641-330/0	26/03/2003	15.848333	6296	10.017279	-75.663720	21.0	20.7 ()	12.000 ⁽³⁾
(1): International Surface Weather Observations										
(2) : National Climatologic Data Center										
(3) : Russian Weather Server										

Pre-tratamiento de las imágenes: Rectificación geométrica. Se rectificó geométricamente cada imagen en el referencial WGS 84 en coordenadas métricas UTM zona 18 N. La banda pancromática de la imagen Landsat ETM del 2

de enero de 2003 sirvió de imagen referencia para rectificar las otras imágenes. Los valores de error medio cuadrático observados fueron siempre inferiores a 13 metros con un promedio menor a 8 metros (Tabla 3).

Tabla 3. Valores del error medio cuadrático en x-y observados en la rectificación geométrica.

Fecha	Error medio cuadrático - x	Error medio cuadrático - y
18/01/1986	12,3 m	11,9
27/03/1986	11,1	10,1
13/12/1986	9,45	8,85
10/11/1987	11,7	6,00
11/01/1989	10,4	6,60
28/12/1989	1,95	8,85
09/04/1990	6,75	7,50
10/01/1991	8,55	8,10
25/07/1992	8,25	7,20
01/04/1995	11,4	8,25
14/08/1997	2,10	6,00
24/12/1998	6,45	8,25
25/11/2000	9,00	6,30
18/12/2000	5,55	7,80
25/09/2001	2,70	2,55
02/01/2003	Imagen de referencia	
26/03/2003	8,40	7,80
Media	7.88	7.63

Se observó que el valor del error medio cuadrático de las imágenes menos recientes fue mayor, dado al escaso número de puntos de control disponible. En efecto, el delta del Canal del Dique era entonces una zona esencialmente compuesta de manglar y pastos donde no existían rasgos físicos susceptibles de servir de puntos de control.

Corrección atmosférica. La aplicación de correcciones radiométricas requirió, *in fine*, la deducción del espesor óptico de los aerosoles. En ausencia de información sobre la distribución de la granulometría y la naturaleza de los aerosoles, este parámetro pudo deducirse a partir de la visibilidad horizontal, o incluso a partir de valores de luminancia de aguas claras en el infrarrojo cercano (Kergomard, 2000). La radiometría de las imágenes fue corregida empleando el programa informático “6S” (Vermote *et al.*, 1997). Los datos de visibilidad horizontal necesarios para la modelación de la señal fueron obtenidos de la estación meteorológica del aeropuerto Rafael Núñez de Cartagena de Indias. Las condiciones meteorológicas observadas al momento de adquirir las imágenes condujeron a elegir un modelo de

atmósfera de tipo “tropical” y un modelo de aerosoles de naturaleza “continental”. La dinámica de reflectancias calculadas fue escalada aplicando un factor multiplicativo de 255.

Fusión de imágenes. Las bandas 2, 3 y 4 de las imágenes Landsat ETM adquiridas los días 25/11/2000, 18/12/2000, 25/09/2001 y 26/03/2003, y cuya resolución es de 30 m, se fusionaron con la banda pancromática del mismo sensor cuya resolución es de 15 m, para permitir una mejor valoración del límite de las piscinas acuícolas. La técnica de fusión de imágenes elegida, se basó en el procedimiento descrito a continuación:

- las bandas ETM-4, 3 y 2 a 30 m de resolución se combinaron en una composición a color RVA (Rojo, Verde y Azul);
- la composición RVA se transformó en una composición CIS (Color, Intensidad, Saturación);
- el neocanal “Intensidad” de la composición CIS fue sustituido por la banda ETM-8 a 15 m de resolución (banda pancromática) para obtener una composición C’I’S’;

- la composición C'T'S' se convirtió en una composición R'V'A';
- finalmente, las "pseudo" bandas R'V'A' portaron la información de la banda pancromática.

Tratamiento de las imágenes: Extracción del límite de los perímetros acuícolas: La localización de las parcelas acuícolas sobre cada una de las 18 imágenes disponibles fue realizada empleando la banda TM o ETM-4 (0.76 a 0.90 μm) en el caso de las imágenes Landsat o la banda HRV, HRVI o HRG-3 (0.79 a 0.89 μm) en las imágenes Spot. Lo anterior debido a que el agua se comporta como un cuerpo negro a estas longitudes de onda, y proporciona una respuesta espectral

contrastada cuando están presentes un cuerpo de agua o incluso una superficie muy húmeda.

Los píxeles de las imágenes tratadas procedieron de sensores diferentes y de resoluciones espaciales variables: 30 m para el radiómetro TM, 20 m para el radiómetro HRV en modo multiespectral, 15 m para el radiómetro ETM después de fusión y 10 m tanto para los radiómetros HRV, en modo pancromático y HRG. Un error pudo pues introducirse en la medida de la extensión de las piscinas. Para la cuantificación de tal error se efectuó una prueba gráfica sobre un conjunto de 20 piscinas acuícolas (Figura 3).

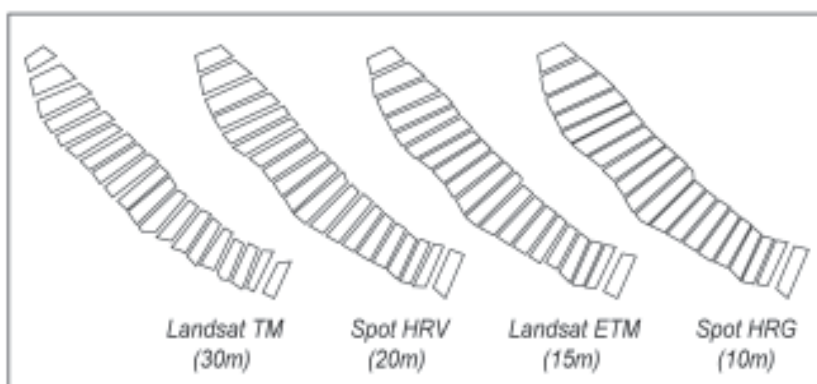


Figura 3. Extensión de un conjunto de 20 piscinas acuícolas digitalizadas a partir de imágenes satelitales de distinta resolución.

Los resultados de la prueba evidenciaron la presencia de un número importante de píxeles mixtos sobre las imágenes de más baja resolución espacial, lo que condujo a una subestimación de la superficie de las piscinas acuícolas. El orden de magnitud del error en la estimación del tamaño de éstas pudo calcularse (Figura 4). Las superficies medidas

$A_p(i)$ $\{i = 30, 20, 15\}$ sobre las imágenes resultantes de los sensores TM, HRV y ETM se compararon respectivamente con las medidas obtenidas sobre la imagen del sensor HRG ($i=10$). Los resultados de la razón $A_p(i) / A_p(10)$ fueron los siguientes: 0.71, 0.83 y 0.88, es decir que se observa una subestimación del 29 al 12%.

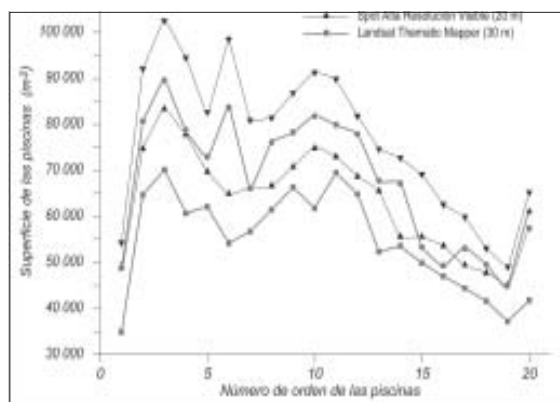


Figura 4. Superficie de una serie de 20 piscinas acuícolas digitalizadas a partir de imágenes satelitales de distinta resolución.

Una relación lineal entre el tamaño (i) del píxel (p) y el orden de magnitud de la subvaloración de la superficie de las piscinas acuícolas pudo evidenciarse (Figura 5). La ecuación lineal que

expresó el resultado ($A_{p=i}/A_{p=10}$) en función de $A_{p=10}$ tuvo los valores numéricos: $(A_{p=i}/A_{p=10}) = 1,112 * A_{p=10} - 0,0136$ con un coeficiente de correlación igual a $-0,982$.

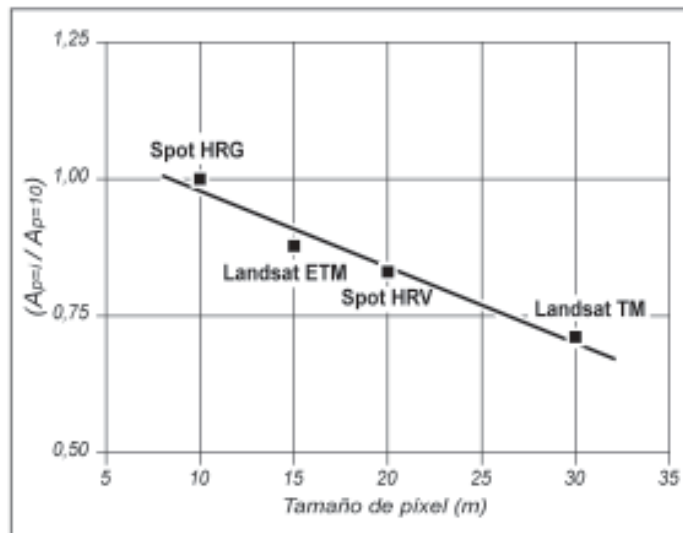


Figura 5. Relación lineal que muestra la subestimación de la superficie de un conjunto de 20 piscinas acuícolas a distinta resolución.

Después de haber comprobado la hipótesis de la permanencia de la geometría de las piscinas sobre la duración del período de tiempo estudiado, los autores optaron seguir la estrategia siguiente para estimar, de la mejor manera posible, la superficie de las piscinas acuícolas:

- se ubicó cada piscina acuícola sobre la pantalla, eventualmente, aplicando un procedimiento de extensión de la dinámica de la imagen;
- los límites de las piscinas acuícolas de la imagen en tratamiento se superpusieron con las observadas sobre la imagen Spot-5 adquirida el 26 de marzo de 2003, en método RHG, a resolución de 10 m;
- finalmente, los límites de las piscinas acuícolas de la imagen en tratamiento se extrajeron sobre esta misma imagen Spot-5.

Estas operaciones permitieron minimizar los errores de estimación de la superficie de las piscinas, puesto que la localización se realizó sobre la imagen que presentaba la mejor resolución y localización espacial.

Descripción del estado de la vegetación. Los autores, en una primera aproximación, utilizaron el Índice Normalizado de Vegetación (NDVI) para describir el estado de la vegetación de la secuencia de imágenes. El

índice se calculó de la siguiente manera: $NDVI = (IR - R) / (IR + R)$ pero fue aplicado en forma de una función $G = 128 * NDVI + 127$ para obtener una representación entera del color entre [0 - 255]. El neocanal resultante presentó un gradiente que varió desde 0, cuando la cobertura vegetal estuvo ausente, hasta 255, cuando la cobertura vegetal presentó actividad clorofílica elevada (vigorosidad). Su cálculo fue equivalente al retirar el canal rojo, donde existe una alta separabilidad de las firmas espectrales de las superficies mineralizadas, del canal infrarrojo para el cual la cobertura vegetal presenta una fuerte reflectancia.

Clasificación de las zonas de manglar. Una delimitación de las zonas de manglar del delta del Canal del Dique fue obtenida a partir de clasificación supervisada por medio del algoritmo de la “distancia mínima”. Las parcelas de entrenamiento fueron adquiridas empleando el mapa de vegetación “*Mapa de límites y unidades de cobertura y uso. Santuario de flora y fauna José Ignacio Hernández Camacho ‘El Mono Hernández’*”. Se usaron, *in fine*, tres unidades de paisaje: una primera clase compuesta de las zonas acuáticas (océano, ciénagas y canales); una segunda clase formada por sectores de manglar y una tercera clase correspondiente a los otros espacios naturales y/o antropogénicos.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se analizaron aspectos del paisaje, de la dinámica de ocupación del suelo por la construcción de piscinas en el tiempo y su impacto en el medio, llevando a abordar la problemática de la acuicultura en la zona de estudio.

El paisaje del delta del Canal del Dique. Se realizó un mapa de distribución del Índice Normalizado de Vegetación calculado a partir de la imagen más antigua, de enero de 1986, y luego combinada con los resultados de la clasificación obtenida en esta misma fecha. Por último, los límites de las piscinas de levante de camarón observables sobre la imagen más reciente, de marzo de 2003, se superpusieron (Figura 6).



Figura 6. Índice Normalizado de Vegetación y piscinas acuícolas del delta del Canal del Dique.

La clase de las zonas acuáticas se representó en color azul; la clase compuesta de los sectores de manglar en color verde, cuya intensidad fue función del valor tomado por el Índice Normalizado de Vegetación y la clase compuesta de los otros espacios naturales y/o antropogénicos, en niveles de gris, cuya intensidad fue función también del valor tomado por el Índice Normalizado de

Vegetación. Los límites de las piscinas fueron superpuestos y representados en rojo. Los elementos de paisaje en verde corresponden a vegetación arbórea y vigorosa de tipo "manglar", cuya composición florística fue ya descrita anteriormente (cf. *Supra*). La vegetación contigua a esta unidad de paisaje estuvo constituida por formaciones arbustivas, el "corcho" (*Pterocarpus officinalis*), o por vegetación gramínea baja donde dominó frecuentemente "enea" (*Espadaña dominguensis*), y en zonas anfibias dominó el "helecho 'ranconcha'" (*Achrostichum aureum*). También se encontraron zonas de cultivo de arroz y pastos. Al oeste sobre la península de Barú y al este del Canal del Dique dominó un paisaje conocido como "rastros", compuesto de arbustos bajos, maleza, pastos y algunas veces suelo desnudo.

Evolución y caracterización de la influencia en el suelo de la actividad acuícola. Fue posible evidenciar la distribución y la extensión de las piscinas de levante de camarones en el delta del Canal del Dique (Figura 7). Cinco fincas se comparten las piscinas: C.I. Océanos, más extensa, con alrededor de 1 000 ha de estanques, Cartagenera de Acuicultura S.A. cuya superficie es casi equivalente a la primera, Biomar Ltda, Piedrecitas y Proacuícola S.A.

El análisis de la evolución de construcción de piscinas (Figura 8) acuícolas indica una suspensión de la inversión en el período incluido entre 1994 y 1998, estancamiento bien localizado tanto en número como en superficie. Se tuvo en cuenta sin embargo que las piscinas construidas en 1997-1998 tuvieron superficies más importantes.



Figura 7. Vista aérea oblicua de las piscinas de camarón en Punta Comisario.

Esta variación de su importancia en el tiempo se pone en evidencia sobre la imagen de marzo de 2003, que revela un histograma bimodal: las de pequeño tamaño (del orden de 1 ha) son las más antiguas mientras que las de mayor importancia (del orden de 7.5 ha) son las más recientes. Este estancamiento del esfuerzo de inversión en la construcción de piscinas se debe a la aparición del síndrome de Taura en el camarón del delta del Canal del Dique. Este virus, altamente infeccioso para el camarón de América Central, *P. vannamei*, ocurre tanto en las postlarvas como en los juveniles y los adultos. Puede ser transmitido por canibalismo de camarones infectados, por cohabitación entre individuos infectados y no infectados, a través de aguas de

transporte, redes y otros equipos y herramientas infectados, por las heces procedentes de aves marinas consumiendo camarones contaminados por el virus. En su fase aguda, los camarones cesan su alimentación, se hunden rápidamente en su fase de agonía y se agrupan sobre los bordes o en la superficie de las piscinas donde pueden atraer un gran número de aves marinas. El síndrome de Taura se detectó por primera vez en Ecuador en 1991 y 1992. Se propagó entre 1994 y 1995 a través de la mayoría de las regiones de levante de camarones de América, por la exportación de postlarvas y reproductores infectados. Sobre la costa del Caribe de Colombia, sus efectos negativos se manifestaron hacia 1997 y 1998 con reducción de la producción de camarón.



Figura 8. Mapas de evolución de las piscinas de levante de camarón (número y superficie) entre enero de 1986 y marzo de 2003 en el delta del Canal del Dique.

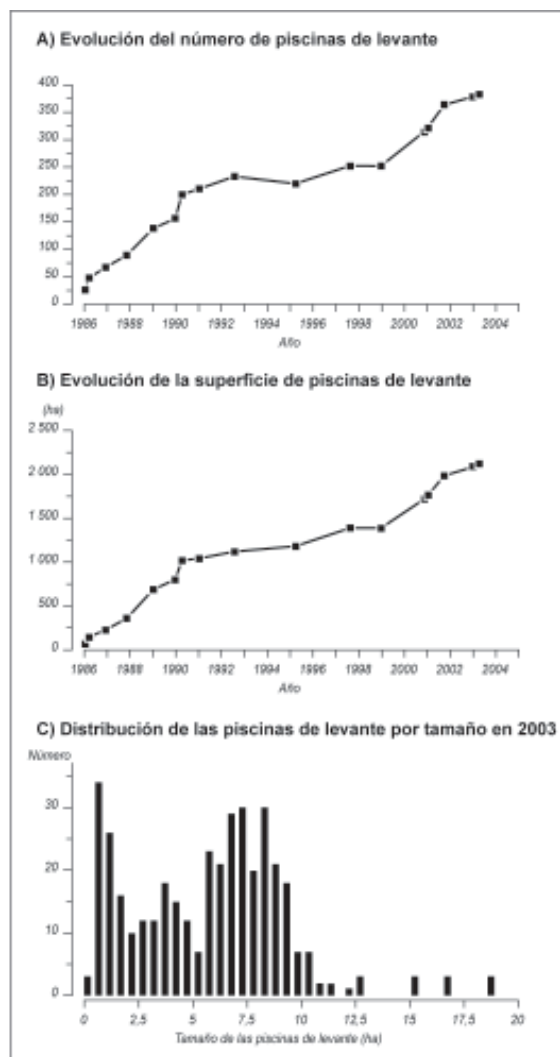


Figura 9. Curvas de evolución del número y superficie de las piscinas de levante de camarón entre 1986 y 2003 y tamaño de las piscinas observado en marzo de 2003.

Grado de afectación de los manglares del delta del Canal del Dique por la acuicultura.

Se construyeron varias piscinas, entre las que se cuentan las primeras establecidas sobre pequeñas ciénagas o zonas de manglar en los alrededores del canal de la Boca Lequerica pero, esencialmente, se construyeron sobre suelos desnudos salados. Se dedujo que contrariamente a lo que se pensaba, el desarrollo de las piscinas tuvo un bajo impacto medioambiental en los manglares. Este hecho se debió no a preocupaciones ecológicas por parte de las empresas acuícolas, sino más bien a consideraciones económicas y técnicas de su parte. Varias razones son argumentadas por ellos para no construir piscinas acuícolas sobre los manglares: altos costos a medio plazo; obligación de recolección de camarón con ayuda de motobombas, mantenimiento de pH del agua constante por adición de cal a causa de la fuerte tendencia a acidificación; alteración del drenaje (cuñas de los canales) por el flujo de agua, lo que hizo más costoso el mantenimiento de la dinámica de entrada y salida del agua de las piscinas. A este respecto, conviene recordar que estas mismas razones fueron la causa del semiabandono de la explotación de las piscinas establecidas sobre los manglares de la costa Pacífica de Colombia.

Finalmente, conforme al análisis, la teledetección espacial resultó como un método eficaz para llevar a cabo un seguimiento satelital del desarrollo de la acuicultura ("camaronicultura") en el delta de una zona tropical, el Canal del Dique. La crónica de imágenes Landsat (TM y ETM) y de Spot (HRV y HRG) utilizada permitió cartografiar de forma precisa, anual o bianualmente, la dinámica de la superficie del manglar, así como la extensión de las piscinas acuícolas de camarón sobre un período de 17 años (desde 1986 hasta 2003). El método empleado y los tratamientos efectuados mostraron un mínimo impacto medioambiental de la infraestructura acuícola sobre el manglar. Análisis más específicos podrían proporcionar información complementaria sobre la gestión estacional e interanual de las piscinas de camarón. Para zonas de tan difícil acceso, como el delta del Canal del Dique, las imágenes satelitales, por su carácter repetitivo, sinóptico y multispectral, se constituyen en un instrumento fundamental de vigilancia del litoral.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguilera M. M. (1998). *Los cultivos de Camarones en la costa Caribe de Colombia*. Cartagena de Indias, Banco de la República, Documentos de trabajo sobre economía regional, abril N° 2, 52 p.
- Álvarez León R. y Polanía, J. (1996). Los manglares del Caribe colombiano: síntesis de su conocimiento. *Revista de la Academia colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 20, (78), pp. 447-464.
- CARDIQUE (1998). *Diagnóstico, zonificación y planificación estratégica de las áreas de manglar de Bolívar*. Cartagena de Indias.
- Donato Rondon J. (1998). Los sistemas acuáticos de Colombia: síntesis y revisión, Guerrero (éd.), Sánchez, Alvarez y Escobar (comp.) *Una Aproximación a los Humedales en Colombia*, UICN, Fondo FEN, Santa Fe de Bogotá, 163 p.
- Kergomard C. (2000). Pratique des corrections atmosphériques en télédétection utilisation du logiciel 5S-PC, *Cybergeo*, (181) : <http://www.cybergeo.presse.fr>.
- Leblanc F. (1983). *Informe final estudio geológico litoral Caribe colombiano*, CIOH, Informe Técnico, Cartagena, 26 p.
- Leblanc F. (1985). *Approche morphologique et sédimentologique du delta du Dique, côte caraïbe de la Colombie*. Thèse de 3^{ème} cycle, Université de Bordeaux I, 244 p.
- Legros Th. (1992). Puerto Chacho et les premiers céramistes américains – Nouvelles données sur le Formatif Ancien du littoral caraïbe de Colombie. Thèse de 3^{ème} cycle, Université de Paris Panthéon Sorbonne, UER d'Histoire de l'Art et Archéologie, Centre de Recherche en Archéologie Précolombienne, 523 p.
- Lemaître E. (1982). *Historia del Canal del Dique. Sus peripecias y vicisitudes*. Constructora Sanz & Cía. Cobe Ltda, 64 p.
- Mispan M. R. y P. M. Mather (1997). Multi-Sensor Radiometric Correction: A Case Study from Malaysia. 18th Asian Conference on Remote Sensing, Malaysia, October 20-24, <http://www:gisdeveloppement.net/aars/acrs/1997/ps2/ps4022pf.htm>
- Muller E. (1993). Evaluation and correction of angular anisotropic effects in multirate SPOT and Thematic Mapper data, *Remote Sensing of Environment*, (45), pp. 295-309.
- Pérez-Arbelaez E. (1978). *Plantas útiles de Colombia*. Bogotá, Arco, 831 p.

- Reichel-Dolmatoff G. (1965). *Colombia: Ancient Peoples and Places*, London, Thames et Hudson, 231 p. + 65 pl.
- Sánchez-Páez H., G. A. Ulloa-Delgado y H. A. Tavera-Escobar (2004), *Manejo integral de manglares por comunidades locales Caribe de Colombia*, Unión Gráfica Ltda., Bogotá, junio 2004, 335 p.
- Sánchez-Páez H. y R. Álvarez-León (2000). *Conservación y Manejo para el Uso Múltiple y Desarrollo de los Manglares en Colombia*, Proyecto PD 171/91 Rev. 2 Fase II (Etapa 2), Ministerio del Medio Ambiente / OIMT. Santa Fe de Bogotá D. C. (Colombia), 511 p.
- Tibaquirá L., D. Yanine-Díaz y E. Daza (1980). *Aspectos técnicos generales de carácter evaluativo y conceptual sobre el ecosistema de manglar de las zonas de Ciénaga Grande y Canal del Dique en el litoral Atlántico*, Bogotá D. C., INDERENA, Subgerencia de Fomento de Bosques Agua y Suelos, 51 p + anexos.
- Vermote E., D. Tandré, J. L. Deuzé J.L., Herman M. and J. J. Morcrette (1997). *Second Simulation of the satellite Signal in the Solar Spectrum (6S)*, Villeneuve d'Ascq, Laboratoire d'Optique Atmosphérique Ed., 218 p.
- Viña G. (1990). Impacto del dragado en las zonas del manglar del Canal del Dique, *Ríos y costas*, 1, (1), pp. 7-17.
- Winograd M. (1987). Mangroves de Colombia: Particularités biologiques et économiques. *Gaussenia*, (3), pp. 11- 43.
- El Centre National d'Etudes Spatiales (France) que financió la compra de una parte de las imágenes SPOT en el marco de los proyectos ISIS "Estudio diacrónico (1986-2003) del desarrollo de la acuicultura en los manglares del delta del Canal del Dique (litoral del Caribe de Colombia)" y "Definición de un modelo de desarrollo sostenible para las Áreas Marinas Protegidas (AMP) de los archipiélagos Corales del Rosario y San Bernardo" (Expedientes ISIS0206-337 del CNES, Géolittomer LETG UMR 6554 del CNRS e ISIS 0307-499, Laboratorio de Geografía Física, UMR 8591 del CNRS e Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras, INVEMAR).
 - El Global Land Cover Facility de la Universidad de Maryland y el NASA REASON Program, por el suministro gratuito de las imágenes Landsat TM y ETM.
 - El Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas que puso a disposición de los autores su base de datos de fotografías aéreas.
 - El Comité Ecos-Nord que, en el marco del proyecto "Un modelo geodinámico de bahía tropical: "la Bahía de Cartagena de Indias" (Acción C03U01), financió los trabajos de campo.
 - Dr. Federico Newmark, responsable del programa "Valoración y Aprovechamiento de Recursos" (VAR) del "Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras" (INVEMAR) por su valiosa información.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean expresar su gratitud hacia: