

CÁLCULO DE LA TRANSPARENCIA DEL AGUA EN LA BAHÍA DE CARTAGENASerguel Lonin¹*División de Estudios Ambientales, Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas,
Cartagena de Indias D.T. y C., Colombia***RESUMEN**

Se presentan algunos cambios hechos al bloque de transporte del modelo hidrodinámico CODEGO del CIOH. Los esquemas numéricos aplicados son el FCT (Flux Corrected Transport) y el TVD (Total Variation Diminishing) para simulaciones de transporte de salinidad, transparencia y cualquier otro elemento del ecosistema. Este bloque ha sido utilizado en el Modelo de Ecosistema CIOH, Versión 1.0 para la bahía de Cartagena. Se presentan algunos resultados del cálculo de la transparencia del agua.

ABSTRACT

Some changes in the transport code of the CODEGO hydrodynamic model are presented. The FCT (Flux Corrected Transport) and TVD (Total Variation Diminishing) schemes have been proposed to calculate the salinity, transparency and any ecosystem element. This block is being used into the Ecosystem Model CIOH, Version 1.0 for the Cartagena Bay. Some results of the water transparency modeling are introduced.

1. INTRODUCCIÓN

Desde 1995 en el CIOH se vienen estudiando procesos hidrodinámicos y de contaminación de la bahía de Cartagena y otros cuerpos de agua. La herramienta más eficiente en la actualidad para este tipo de estudios son los modelos matemáticos para la simulación de los procesos hidrodinámicos. El desarrollo de los métodos numéricos y el crecimiento de los recursos de cómputo han permitido aplicar modelos de muy alto nivel.

En el presente artículo se muestran algunos aspectos sobre la adaptación física del modelo y la reformulación matemática para obtener mayor eficiencia en el cálculo, que inicialmente fue basado en el modelo MECCA (Hess, 1989), para las aplicaciones ecológicas de la zona de estudio. La inicialmente escogida fue la bahía de Cartagena y nuestra atención estuvo relacionada con la solución de los problemas del ecosistema de ella. Para este estudio fue necesario implementar un modelo de ecosistema, que debía tener dos bloques principales: 1) Un bloque local de evolución propia del sistema para un punto y 2) un bloque-unificador, es decir, el bloque de transporte de los elementos del ecosistema.

En el caso del modelo usado (CODEGO, versión 1.0,

CIOH, 1997), este bloque pretende simular una posibilidad para el transporte en tres dimensiones y en el tiempo, teniendo en cuenta, también, los procesos de deposición y resuspensión de los elementos con la boyancia negativa. Por ejemplo, el fitoplancton tiene una velocidad de descenso por su propio peso en el agua. Además, para el cálculo del comportamiento del ecosistema en la bahía, la turbidez es un parámetro, que tiene gran importancia en este momento, porque es un limitante del sistema, como en un futuro hipotético, cuando supongamos, que el canal del Dique no aporte más sus aguas turbias a la bahía. En este caso, el diagnóstico y pronóstico del comportamiento de las partículas suspendidas, que parcialmente y en el primer lugar producen la turbidez, juegan un papel grande en este estudio. Las partículas en suspensión se caracterizan por una tendencia de deposición y la otra de resuspensión, siempre y cuando el estado hidrodinámico de la bahía y de las aguas adyacentes sea favorable para uno u otro proceso. La estructura espacial del fenómeno tampoco es simple. Por esta razón, estamos hablando sobre la creación de un modelo hidrodinámico para la bahía.

La estructura y capacidad de los modelos señalados anteriormente no permiten realizar el cálculo de transporte de las partículas sólidas ni la distribución de salinidad en el caso de la bahía, porque las variaciones

¹ Ing. Oceanólogo Ph.D.

espaciales de estas características sufren cambios bastante bruscos. Actualmente, el Canal del Dique aporta aguas con una salinidad cero, mientras que en las bocas de la bahía, la salinidad del mar son unos 35%. Teniendo en cuenta la escala característica espacial de la bahía (unos kilómetros) y los valores característicos de velocidades de corrientes (unas decenas de $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$), un bloque de transporte, que no tiene la propiedad numérica *de transporte*, producirá los valores negativos de salinidad en el proceso de cálculo.

El campo de las partículas en suspensión está siempre bien estratificado en la vertical y tiene el mismo comportamiento en la horizontal, como el campo de salinidad. Por eso, el problema de descripción matemática numérica para estos elementos del sistema hidrodinámico es distinta en comparación con la modelación de temperatura u otros elementos, que distribuyen en una forma "continua" sin frentes con gradientes significativos.

Matemáticamente, esta conclusión se ha revelado en seguida a los criterios dados sobre la presencia de colas parásitas en la solución para los esquemas no transportivos (Fletcher, 1988). En otras palabras, los valores negativos u oscilaciones parásitas no se aparecen cuando el número de Reynolds de malla no supera un valor de 2, es decir, $Re_{\text{celda}} = U\Delta/\Lambda \leq 2$, donde U -velocidad característica de transporte; Δ es tamaño de la celda y Λ es viscosidad turbulenta del proceso. Para las condiciones de la bahía, $U = 0.1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$; $\Delta = 250$ metros y $\Lambda = 1 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, entonces, $Re_{\text{celda}} = 25$.

Obviamente, para satisfacer a la dicha condición para el número de Reynolds de malla es posible al disminuir el único parámetro variable, que es el tamaño de celda de cálculo (el paso de la malla en el sentido horizontal), por lo menos en catorce veces. Las capacidades de ningún computador pueden permitir hacer el cálculo prácticamente eficiente con una malla de 20 metros de paso, que cubría el espacio de toda la bahía.

Por lo tanto, una alternativa del uso de todos los esquemas no transportivos numéricamente, es la elaboración de un esquema, que tiene las propiedades de transporte. Hasta el momento, ninguno de los últimos transportivos contiene la propiedad de conservación. Sin embargo, algunos de ellos co-mantienen parcialmente de una manera simultánea las dos propiedades: cuasiconservatividad y de transporte.

En el presente artículo se están considerando las modificaciones hechas para el modelo CODEGO, que

permiten usarlo como el bloque hidrodinámico y de transporte para cualquier cálculo, relacionado con el problema de ecosistema y su descripción matemática. En el próximo capítulo se dan las formulaciones propuestas del problema desde el punto de vista de la matemática numérica para señalar los cambios significativos del presente modelo. Luego, se presentan algunos resultados en la parte de modelación de turbidez en la Bahía de Cartagena, cuyos resultados se entraron en una forma natural en el modelo de ecosistema, desarrollado en el CIOH en 1997.

2. MODIFICACIONES DEL BLOQUE DE TRANSPORTE

El problema de la formulación matemática de un esquema transportivo lo dividimos en dos partes: La primera, para el transporte en horizontal y la segunda - por vertical. Esta circunstancia tiene una razón por la diferencia entre los esquemas usados en el MECCA en el sentido vertical y por horizontal. Vamos a usar el esquema FCT (Flux Corrected Transport, Boris and Book, 1976) en horizontal, mientras que en vertical el esquema TVD (Total Variation Diminishing, Harten, 1983). Esta selección está basada en lo siguiente:

Dentro de los métodos más económicos y eficientes para eliminar las oscilaciones parásitas de dispersión es el algoritmo FCT (Boris and Book, 1976). Las condiciones de aplicación de este método incluyen la búsqueda de los flujos de antidifusión, cual es garantizar la suavización de la cola de dispersión, por un lado, y dar un mínimo de viscosidad artificial en la solución, por el otro. Entonces, el esquema FCT tiene dos pasos: en el primer paso una viscosidad artificial se entra al cálculo para aplanar el ruido de dispersión; en el siguiente, la viscosidad se saca, prácticamente, plenamente.

El método tiene algunas propiedades de los esquemas con las diferencias centrales, totalmente conservativos y, por esta razón, la tasa de disminución de las oscilaciones parásitas depende del valor de la viscosidad artificial y el número de Reynolds de malla. Los experimentos numéricos y las estimaciones simples mostraron, que la aplicación del esquema para el transporte horizontal garantiza la solución positiva bajo los parámetros definidos del esquema. Actualmente, para el paso espacial de 250 metros es posible buscar un valor de viscosidad artificial (0.0288 en el presente modelo), que trae la solución óptima para el transporte de salinidad y de suspensión en el caso de la bahía.

Al contrario, la estratificación vertical de las partículas suspendidas con un tamaño mayor (con una velocidad

de gravedad de unos milímetros por segundo) bajo las condiciones de calma se produce una predominancia de los procesos convectivos sobre los de difusión. En este caso, para discretización fina en vertical (por ejemplo, el paso vertical es el de unos decenas de centímetros) es muy difícil garantizar el planchamiento de las oscilaciones. Por otro lado, la estructura del algoritmo no permite realizar dos pasos necesarios para el esquema FCT en vertical, dado que los procesos verticales están escritos en forma implícita, mientras que en horizontal, en forma explícita.

El otro algoritmo, que satisface a la condición de entropía y requiere sólo un paso para el cálculo es el esquema TVD (Harten, 1983). Este esquema busca una solución físicamente correcta y tiene las propiedades de la monotonía.

Esquema FCT en horizontal

La ecuación de conservación de una sustancia S con la velocidad propia de gravedad w_g puede presentarse en los términos de MECCA (Hess, 1989) en la siguiente forma:

$$(HS)_{,t} + B_x^{-1}(B_x H(uS - D_h S_{,x}))_{,x} + B_y^{-1}(B_y H(vS - D_h S_{,y}))_{,y} + ((w + w_g)S - D_v S_{,q})_{,q} = 0, \quad (1)$$

donde H - profundidad total; B_x y B_y son espesores adimensionales del flujo, correspondientes a los tamaños de la malla Δ_x y Δ_y ; u, v y w son componentes de velocidad de corrientes; D_h y D_v - turbulencia en horizontal y vertical, respectivamente. Los índices t, x, y y q corresponden a las derivadas por el tiempo t y las direcciones x, y, q. q es coordenada sigma (adimensional) en vertical.

La parte de los procesos en el sentido horizontal se desarrollan explícitamente y los correspondientes términos de la ecuación (1) es posible unir al término explícito F de la solución numérica:

$$F = (HD_h B_x S_{,x})_{,x} - (B_x(U + uH)S)_{,x} + (HD_h B_y S_{,y})_{,y} - (B_y(V + vH)S_{,y})_{,y}, \quad (2)$$

donde los términos advectivos se presentan como la suma del flujo integral en columna de aguas y las desviaciones, es decir, $U + uH \sim UO_{n,m} + \langle uh \rangle$; $\langle uh \rangle = (u_{l-1,n,m} + 2u_{l,n,m} + u_{l+1,n,m})(H_{n,m} + H_{n,m+1})/8$; l, n, m son índices de la malla en vertical (l) y en horizontal.

El término F lo presentaremos en la forma discreta

$$\Delta TF = S_{l,n,m+1}FXMP + S_{l,n,m}(FXCC + FYCC) + S_{l,n,m-1} \times FXMM + S_{l,n+1,m}FYNP + S_{l,n-1,m}FYNM, \quad (3)$$

donde ΔT es el paso del modo interno de cálculo; los términos FXMP etc. es una superposición de los términos "normales" de aproximación numérica (FXMP' etc.) y los términos adicionales (FXMP''), que contienen la viscosidad artificial ν de la primera etapa del cálculo, es decir, $FXMP = FXMP' + FXMP''$, etc.,

$$FXMP' = C_3 BX_{n,m}(DH_{n,m+1} + DH_{n,m}) - C_4 BX_{n,m} UO_{n,m} - C_5 BX_{n,m}(u_{l-1,n,m} + 2u_{l,n,m} + u_{l+1,n,m})(H_{n,m} + H_{n,m+1});$$

$$FXMP'' = 0.5 BX_{n,m}(H_{n,m} + H_{n,m+1}) [\nu + BX_{n,m} C_6 (UO_{n,m} + (u_{l-1,n,m} + 2u_{l,n,m} + u_{l+1,n,m})/4)^2];$$

$$DH_{n,m} = D_h H; C_3 = \Delta T / (2\Delta L^2); C_4 = \Delta T / (2\Delta L); C_5 = \Delta T / (16\Delta L); C_6 = 2C_4^2$$

(el análogo del término $0.5\Delta t^2/\Delta L^2$ en el esquema de Lax-Vendroff). Los otros términos de la expresión (3) tienen la misma forma.

Este paso del cálculo se llama "el paso de predictor" y nos da la solución $S'_{l,n,m}$. El siguiente paso ("corrector") sirve para sacar la viscosidad artificial de la solución:

$$S_{l,n,m} = S'_{l,n,m} - f_{l,n+1/2,m} + f_{l,n-1/2,m} - f_{l,n,m+1/2} + f_{l,n,m-1/2},$$

donde los términos f son flujos de antidifusión de masa, los cuales determinamos a través de la siguiente expresión:

$$f_{l,n+1/2,m} = \text{sign}(\Delta M_{l,n+1/2,m}) \max\{0, \min[\Delta M_{l,n-1/2,m} \text{sign}(\Delta M_{l,n+1/2,m}), \mu |\Delta M_{l,n+1/2,m}|, \Delta M_{l,n+3/2,m} \text{sign}(\Delta M_{l,n+1/2,m})]\},$$

donde μ puede ser igual a ν ; $\Delta M_{n+1/2} = M'_{n+1} - M'_n$; $\text{sign } K = K / |K|$.

En la misma forma se dan los flujos:

$$f_{l,n-1/2,m}, f_{l,n,m+1/2} \text{ y } f_{l,n,m-1/2} \text{ en estas expresiones } M'_{l,n+1,m} = 0.5 B Y_{n,m}(H_{n,m} + H_{n+1,m}) S'_{l,n+1,m}.$$

Esquema TVD en vertical

La ecuación (1) aproximamos por el esquema de Krank-Nikolson en la siguiente forma:

$$A_{n,m} H_{n,m}(S'_{l,n,m} - S_{l,n,m}) + (\Delta T A_{n,m} h_{l,t}) S'_{l,n,m} + (\Delta T A_{n,m} / 4\Delta q) [(S'_{l-1,n,m} + S'_{l,n,m})(w_{l-1,n,m} + w_{l,n,m} + w_g) - (S'_{l,n,m} + S'_{l+1,n,m})(w_{l,n,m} +$$

$$W_{i+1,n,m}+W_g)]-(\Delta T A_{n,m}/\Delta q^2)(H_{n,m})^{-1}[DV_{i-1,n,m}(S'_{i-1,n,m}-S'_{i,n,m})-DV_{i,n,m}(S'_{i+1,n,m})]=(F+A_{n,m}H_{n,m}R+\Gamma)\Delta T, \quad (4)$$

donde

$$\Delta T \Gamma = -(A_{n,m}/2)0.5C(S_{i+1,n,m}-S_{i-1,n,m}), \quad (5)$$

$C = |W_g| \Delta T / \Delta q$; $W_g < 0$; $DV_{i,n,m} = D_v$; $S'_{i,n,m}$ es la solución en el paso $t + \Delta T$; $A_{n,m}$ - área de la celda de cálculo; h - nivel del mar.

Para construir el esquema TVD reescribimos el término (5) en otra forma:

$$\Delta T \Gamma = -(A_{n,m}/2)[C(S_{i,n,m}-S_{i-1,n,m})+(f_{i+1/2,n,m}-f_{i-1/2,n,m})], \quad (6)$$

$$f_{i+1/2,n,m} = 0.5C(S_{i+1,n,m}-S_{i,n,m}); \quad f_{i-1/2,n,m} = 0.5C(S_{i,n,m}-S_{i-1,n,m}).$$

Es muy fácil ver, que la forma (6) equivale correctamente a la ecuación (5). Una manera para construir las limitaciones de los flujos de antidifusión es la siguiente:

$$f_{i+1/2,n,m} = \Theta(r_i)0.5C(S_{i+1,n,m}-S_{i,n,m}); \quad f_{i-1/2,n,m} = \Theta(r_i)0.5C(S_{i,n,m}-S_{i-1,n,m});$$

$$r_i = \frac{S_{i,n,m}-S_{i-1,n,m}}{S_{i+1,n,m}-S_{i,n,m}} \quad \text{y} \quad \Theta(r) \text{ satisfecha a las condiciones:}$$

$$\Theta(r_i) = \begin{cases} \min(2,r), & r > 1, \\ \min(2r,1), & 0 < r \leq 1, \\ 0, & r \leq 0 \end{cases}$$

3. RESULTADOS

Con el fin de determinar el papel del canal del Dique en la formación del campo de turbidez (o transparencia) de las aguas, se efectuaron los experimentos numéricos con el modelo sobre el transporte de las partículas en suspensión del canal para las épocas del año. Para la época húmeda se dan las condiciones de viento variable y el caudal del canal se aceptó igual a $115 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, mientras que para la época seca se tomó el caudal de $55 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ y los vientos alisios.

La cantidad de las partículas suspendidas en el canal fue $380 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, la cual produce para la época húmeda una turbidez de 50 NTU en el área de 1 km^2 adyacente de la boca del canal y 10 NTU en el área de 20 km^2 . En la frontera abierta de Boca Chica se aceptaron las concentraciones de los sólidos suspendidos totales (C_{SST}) de $0.22 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, las cuales corresponden a la transparencia (profundidad del disco de Secci, z_d) de unos 4 metros y al coeficiente de extinción de luz $\alpha_s = 0.575 \text{ m}^{-1}$; en la frontera de Boca Grande: $C_{SST} = 0.79 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, $z_d = 2$ metros y $\alpha_s = 0.79 \text{ m}^{-1}$.

En la Tabla 1 se muestra la distribución de las partículas en suspensión por tamaños de granos aceptados en el modelo en la boca del canal.

Tabla 1. Las características de las partículas en suspensión en el canal del Dique para los experimentos numéricos.

Material	Tamaños de granos (mm)	Probabilidad acumulativa (%)	Tamaño Promedio (mm)	Velocidad de gravedad (W_g, ms^{-1})
Limos gruesos	≤ 0.06	18	0.045	6.410^{-4}
Arena muy fina	0.06 - 0.13	40	0.09	2.610^{-3}
Arena fina	0.13 - 0.28	87	0.2	1.310^{-2}
Arena media	0.28 - 0.5	98	0.4	5.110^{-2}
Arena gruesa	> 0.5	100	0.75	1.110^{-1}

El modelo calcula el campo de concentraciones de las partículas sólidas $C(x,y,z,t)$, mientras que nuestro objetivo es estimar la contribución del canal al campo de transparencia de las aguas. La última contiene las dos partes: La transparencia por las partículas minerales y la de elementos orgánicos, es decir, el fitoplancton produce una turbidez en la capa superior de aguas.

El modelo ecológico elaborado en el CIOH en 1997 en una forma conjunta con el Dr. Yuri Tuchkovenko, toma la información de la transparencia "total" para los cálculos de penetración de luz a la columna de agua. Por un lado, la transparencia por fitoplancton puede ser calculada a través del cálculo de su misma distribución, aplicando una fórmula empírica conocida, por ejemplo, la siguiente:

$$\alpha_{\text{fito}} = \alpha_0 + 0.0088C_A + 0.054(C_A)^{2/3}, \quad (7)$$

donde $\alpha_0 = 0.004$ es la extinción de luz por agua pura; C_A - concentración de clorofila A (en mg-A m^{-3}).

Por otro lado, la transparencia por las partículas minerales debe ser calculada a través de una u otra relación entre C_{SST} y α_s o z_d . La extinción α_s y la transparencia z_d se están relacionando por la siguiente fórmula:

$$\alpha_s = 2.3/z_d, \quad (8)$$

Así, nuestro fin es evaluar una relación empírica $\alpha_s = \text{Función}(C_{\text{SST}})$.

Los datos de mediciones en el campo (datos del CIOH, 1996-97) tienen la información sobre la transparencia (z_d) de las aguas y la cantidad de sólidos suspendidos totales (C_{SST}) en 29 estaciones en la bahía. Diez y seis estaciones

están ubicadas en la parte sur y el resto en la parte norte de la misma. Supongamos, que la gran contribución de las partículas minerales a la transparencia (turbidez) de las aguas se da en la parte sur (la influencia del Canal del Dique), mientras que en la parte norte, la transparencia está formada tanto por los minerales, como por fitoplancton. Esta suposición está válida, como sigue desde la Figura 1. Por lo tanto, la relación buscada entre α_s y C_{SST} está graficada en la Figura 1a (curva 1). Su expresión matemática es

$$\alpha_s = 1.31(C_{\text{SST}})^{0.542} \quad (9)$$

y sirve para la Bahía de Cartagena. Este resultado fue evaluado en una forma conjunta con Yuri Tuchkovenko.

En la Figura 2 se muestran los resultados de cálculo de la transparencia en el estado actual de la bahía para las dos épocas del año. Estos datos coinciden con datos de mediciones con el disco Secchi. En la Figura se indica no solamente la influencia del canal, sino también la erosión local, excluyendo los procesos fuertes de erosión en la deriva litoral en el mar abierto, teniendo en cuenta, que este problema está fuera de nuestro estudio. Por esta razón, los resultados lejos de realidad se fueron en la parte externa de Bocagrande.

Sin embargo, esta figura y la Figura 1b muestran, que la contribución de algas (fitoplancton) en comparación con las partículas sólidas son unas decenas de por cientos.

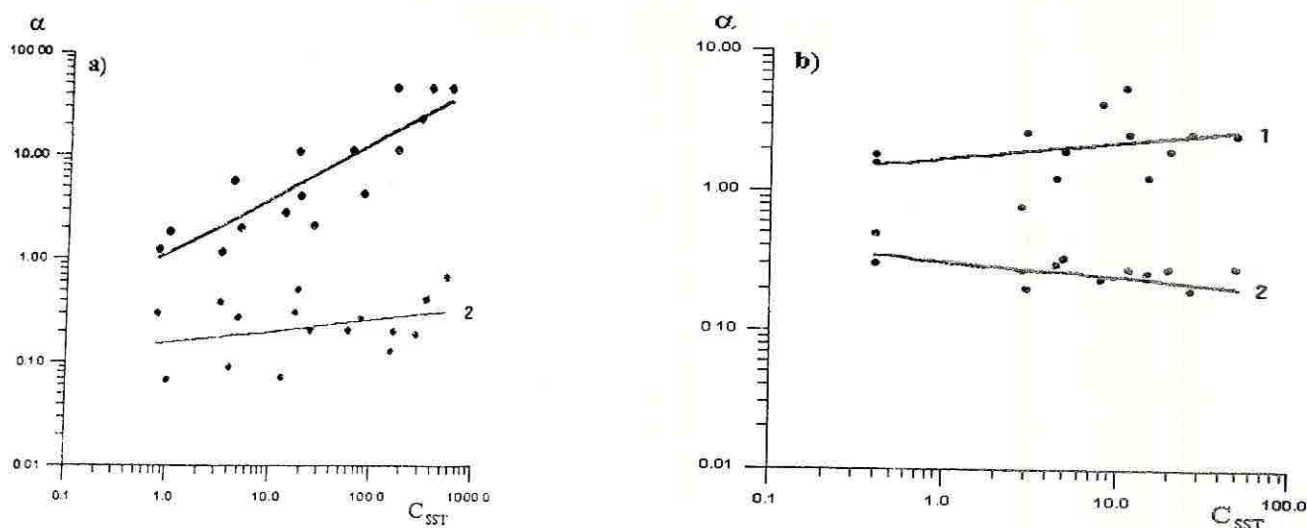


Figura 1. Relación del coeficiente de la extinción de luz (α , en m^{-1}) vs la concentración de los sólidos suspendidos totales (C_{SST} , en mg L^{-1}) por la presencia de las partículas minerales en suspensión (curva 1) y algas (curva 2). a) La parte sur de la bahía; b) La parte norte.

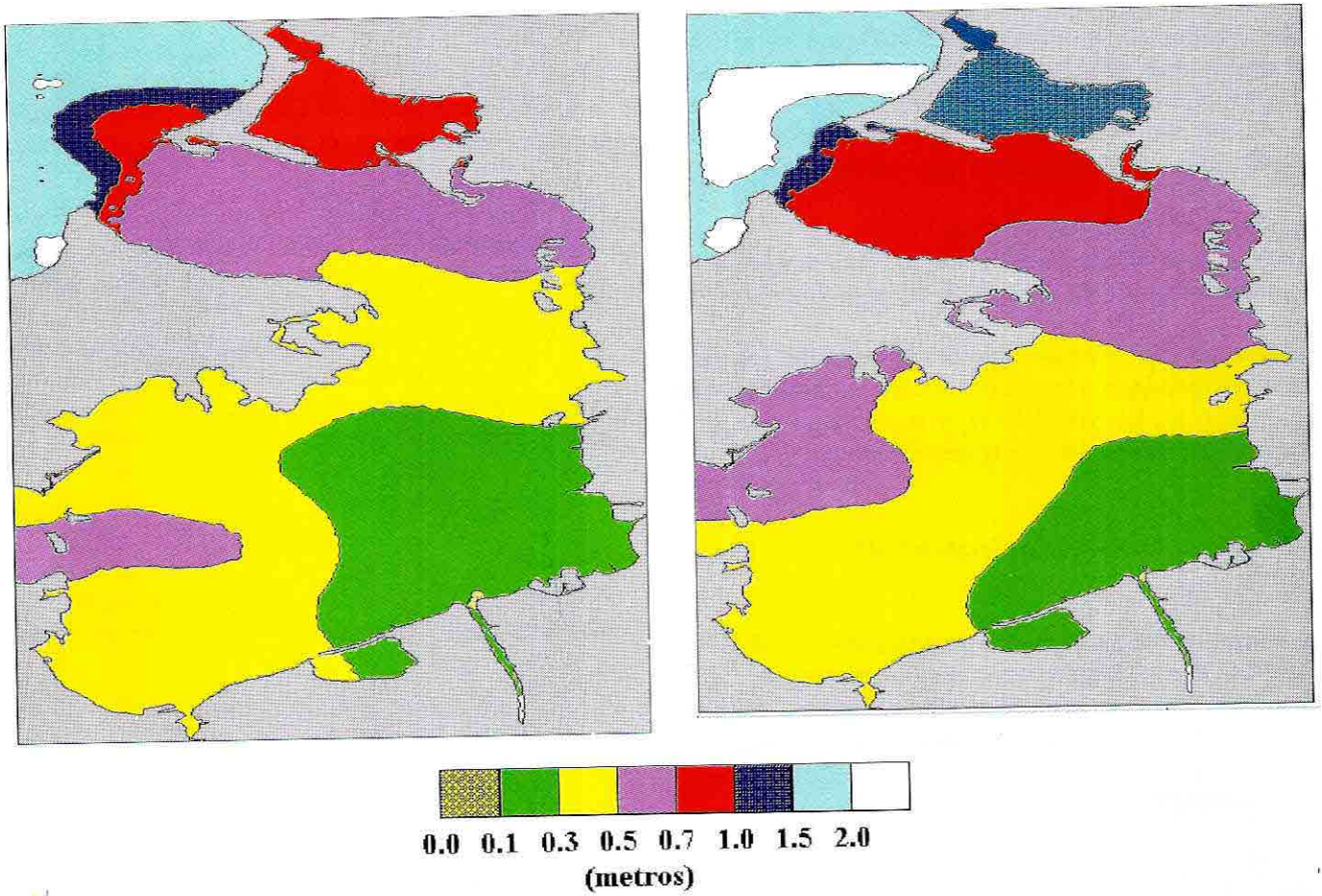


Figura 2. Distribuciones de la transparencia de las aguas para la época húmeda (izquierda) y la época seca (derecha) por el aporte del Canal del Dique.

Para observar la diferencia, que produce el canal en el campo de turbidez, se da la Figura 3. La Figura indica que la transparencia por las partículas minerales se aumentará sin la influencia del canal hasta un nivel de 5 metros casi para toda el área de la bahía. El mínimo de la transparencia

se observa en La Escollera y en los estrechos La Bocachica y El Varadero. Teniendo en cuenta la influencia de fitoplankton, se puede decir, que el estado fótico de la bahía alcanzará al estado del mar abierto bajo las condiciones de cerramiento del canal.

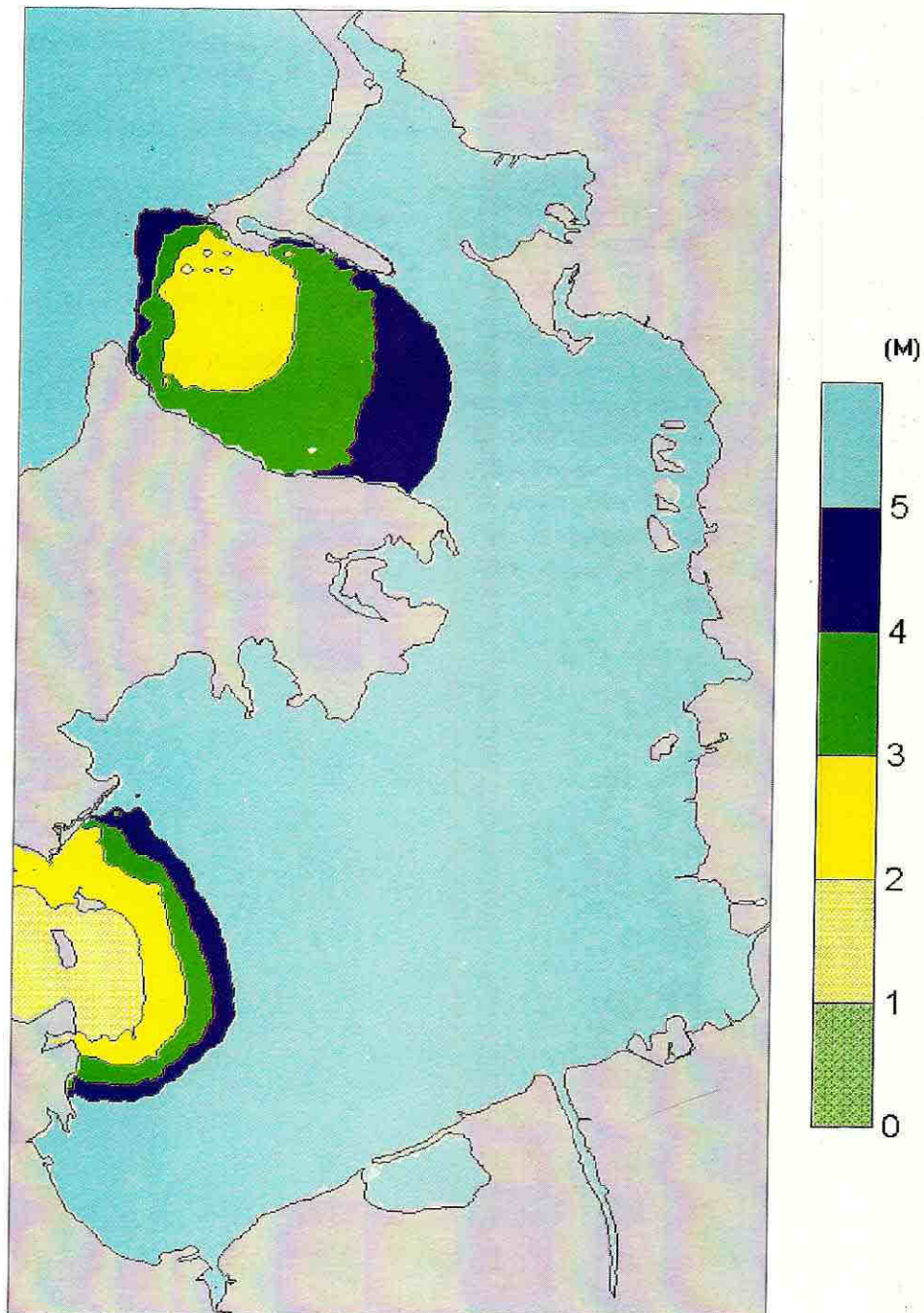


Figura 3 .Distribución de la transparencia de las aguas sin el aporte del canal.

4. CONCLUSIONES

El estudio presentado en este artículo está relacionado con la construcción de un esquema numérico para realizar los cálculos de transporte de cualquier tipo de sustancias. Por ejemplo, este modelo está usado en el modelo de ecosistema para la Bahía de Cartagena para el transporte de once componentes de ecosistema, los cálculos de salinidad y la transparencia de las aguas.

El último parámetro es muy importante en la situación actual de la bahía, porque con la influencia del Canal del Dique es el único factor limitante de desarrollo de comunidades de ecosistema. Los resultados, presentados en el artículo, sirven para un pronóstico del estado de las aguas bajo condiciones de obras consideradas en la bahía para mejorar su estado ecológico.

Desde el punto de vista de crítica estos resultados no tienen en cuenta los procesos de erosión de sedimentos y su transporte en la deriva litoral. Localmente, este efecto puede tener una mayor importancia. Para involucrar este fenómeno en el cálculo es necesario unir el modelo con un bloque de simulación de oleaje y, de esta manera, tener una posibilidad para calcular la tasa de erosión con la presencia de oleaje. En otros trabajos del autor, este bloque se ha acoplado con el modelo.

Agradecimientos: Este trabajo fue realizado con el apoyo y cofinanciación de Colciencias dentro del Proyecto 0140-09-347-95. El autor expresa su agradecimiento al Dr. Yves Thomas por la discusión del tema, al CF Carlos Andrade por la lectura del borrador y las sugerencias hechas. Este artículo fue preparado con ayuda del Ing. Oceanólogo Luis Giraldo.

BIBLIOGRAFIA

Blumberg, A.F. and G.L.A. Mellor, Description of a three-dimensional coastal ocean circulation model. *Three-Dimensional Coastal Models*, Amer. Geophys. Union, Wash., D.C., pp. 1-16. 1987

Boris, J.P. and D.L. Book, *Methods Comput. Phys.*, Vol. 16, pp: 85-129, 1976.

Fletcher, C.A.J. *Computational Techniques for Fluid Dynamics 2, Specific Techniques for Different Flow Categories*, N.Y., 280 p. 1988.

Harten, A. J. *Comput. Phys.*, Vol. 49, pp: 357-393, 1983.

Hess, K.W. *MECCA Program Documentation, NOAA Technical Report NESDIS 46*, Wash., D.C., 200 p, 1989.

S, Lonin, Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas.
A.A. 982 Tel 6694465, Fax 6694390
E-mail:cloh@sirius.enap.edu.co Cartagena, Colombia