

dispersión de contaminantes por las mareas en el Golfo de Nicoya

Luis Murillo Bolaños*

RESUMEN

Se usa una versión numérica en diferencias finitas del modelo matemático de Thomann para la predicción del nivel de oxígeno disuelto (DO) y del nivel de demanda de oxígeno disuelto (BOD) debidos a descargas municipales en nueve puntos localizados a lo largo del Golfo. Se asume que el agente dispersivo es la marea con su flujo y reflujo. El modelo incluye la acción convectiva del agua dulce y el decaimiento de la materia orgánica. Se concluye que el gran volumen del prisma de marea del Golfo posibilita descargas mucho mayores que las debidas a una ciudad con la población de Puntarenas, sin producir efectos drásticos en los niveles globales de oxígeno disuelto. Debido a la plasticidad del modelo será posible en un futuro próximo su uso en la predicción de otros parámetros con distribuciones similarmente dependientes de las mareas como nitratos, nitritos, fosfatos, cloruros y otras sustancias químicas provenientes de futuras industrias costeras o descargas debidas a barcos mercantes. El modelo puede ser usado también en otros cuerpos de agua costeros de importancia para el país como esteros, estuarios y el Golfo Dulce.

INTRODUCCION

El uso de modelos numéricos en la predicción de la calidad de las aguas marinas constituye uno de los avances más útiles de la Hidrodinámica Costera. Con la ayuda de estos modelos es posible predecir el impacto de las descargas contaminantes en esteros, estuarios y otros cuerpos de agua costeros (Tracor Inc., 1971). El análisis de los efectos causados por los contaminantes es necesari-

rio para determinar las cantidades, localización y grado de tratamiento de las descargas municipales (Ippen, 1966). En esta investigación se introduce esta disciplina a la comunidad científica e ingenieril de Costa Rica con el propósito de facilitar el desarrollo ponderado de nuestros recursos costeros. Se presenta un instrumento que permite cuantificar el balance ecológico de nuestras costas y el efecto que futuros desarrollos urbanísticos e industriales pudieran tener en él.

EL MODELO MATEMATICO

Se utiliza una versión alterada del modelo matemático unidimensional propuesto por Thomann en 1963 que consiste de dos ecuaciones diferenciales acopladas resueltas mediante el uso de diferencias finitas y el análisis de sistemas. Las ecuaciones se digitalizan y resuelven usando sistemas de computación⁽¹⁾. La primera ecuación refleja el equilibrio en la conservación de la cantidad de contaminante (BOD, Demanda Bioquímica de Oxígeno) que continuamente se descarga a lo largo del Golfo y que es distribuida por la acción convectiva del flujo de agua dulce y la acción dispersiva del agente de mezcla o agitación. La innovación de la presente investigación consiste en concebir el equilibrio resultante de la agitación como causado por el flujo y reflujo de las mareas en una escala de días y semanas en lugar de por difusión molecular o turbulenta. Esto implica el uso de coeficientes de mezcla debidos a la marea que difieren significativamente de los coeficientes de difusión molecular o turbulenta.

* M.Sc. en Ingeniería Oceánica y Oceanografía Física. Universidad Estatal de Oregon. Profesor en la Universidad de Costa Rica.

(1) En esta investigación se usó el sistema CDC CYBER 720 del Oregon State University Milne Computer Center, Oregon, Estados Unidos de Norteamérica.

La primera ecuación es

$$\frac{d}{dx} \left(Q * L - S * \frac{D}{dx} L \right) + K_1 * S * L = F$$

Ecuación No. 1

con:

L: concentración de contaminante (en este caso BOD)

D: coeficiente de mezcla o agitación

S: área transversal del Golfo

Q: flujo de agua dulce

F: descarga de contaminante (libras por día)

K₁: coeficiente de decaimiento del BOD; también es el coeficiente de acoplamiento con la segunda ecuación

x: coordenada longitudinal que sigue el eje del Golfo.

Para una deducción de esta ecuación lo mismo que de la ecuación No. 2 podrán consultarse los textos de Ingeniería Costera (Ippen, Mehauté, Thomann, etc.). La solución del equilibrio L(x) nos dará el perfil longitudinal del contaminante. Como la ecuación es digitalizada mediante el uso de diferencias finitas, dicha solución convierte a L en un vector con un número de componentes igual al número de secciones en que se divida el Golfo: L_i, i = 1,2,3,... n. Esta solución a la primera ecuación actúa a su vez sobre la oferta de oxígeno disuelto (DO) del Golfo que aquí llamaremos C. Este segundo equilibrio lo describe la ecuación:

$$\frac{d}{dx} \left(Q * C - S * D \frac{dC}{dx} \right) = K_2 * S * (C_s - C) - K_1 * S * L$$

Ecuación No. 2

en donde adicionalmente,

C: es la concentración de oxígeno disuelto resultante C_i,

C_s: es la concentración de saturación del DO o sea C_{s,i},

K₂: es el coeficiente de reaeración de oxígeno K_{2,i}.

La solución numérica a este segundo equilibrio, acoplado al primero mediante el término K₁ * S * L, nos da el perfil resultante de oxígeno disuelto como el vector C_i, i = 1,2,3,... n.

Los algoritmos usados en la digitalización de las ecuaciones y su solución se basan en procedimientos matemáticos propuestos por R. Thomann en 1963 (Murillo, 1981).

APLICACION DEL MODELO EN EL GOLFO DE NICOYA

Además de las alteraciones puramente matemáticas que se hicieron al modelo, se cambiaron y amplificaron los procedimientos interactivos dándole al modelo un alto grado de automaticidad. Lo anterior hizo posible que se ejecutaran corridas múltiples para un conjunto de distribuciones probables de descargas municipales de BOD diarias. También se adicionaron al programa básico subrutinas graficadoras de las distribuciones resultantes.

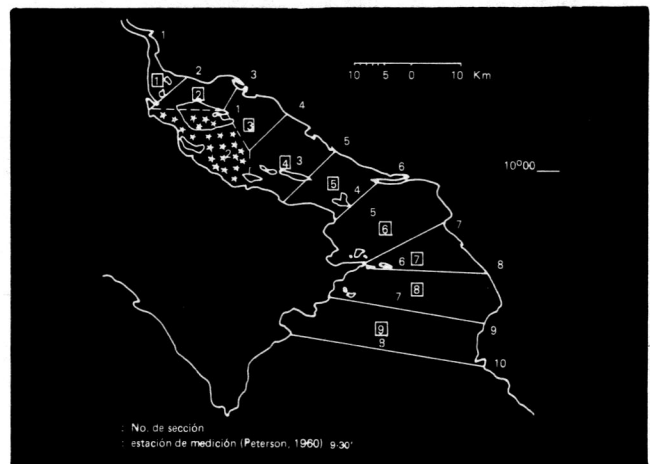


FIGURA No. 1. Seccionamiento en el Golfo de Nicoya para la aplicación del modelo unidimensional.

Para esta investigación el Golfo de Nicoya se dividió en nueve secciones (i = 1,2,3,... 9, ver figura No. 1). Para cada sección se calculó el volumen del prisma de marea como el producto del área horizontal de la sección por la amplitud de la marea. Para calcular esta última se usaron los resultados de los cálculos hechos con un modelo hidrodinámico bidimensional (Murillo, 1981). Es decir:

$$V_i = AR_i * m * n_i, \quad i = 1,2,3,... 9.$$

Ecuación No. 3

donde

V_i : volumen del prisma de marea de la sección 1
 m : rango de marea a la entrada del Golfo
 n_i : coeficiente de amplificación de la marea.

Según los cálculos hechos con el modelo hidrodinámico el coeficiente de amplificación varía según la expresión:

$$n_i = (0,0277) * i + 1.$$

Ecuación No. 4

Las áreas transversales de las secciones se calcularon de acuerdo con:

$$xA_i = \bar{d}_i * b_i,$$

Ecuación No. 5

con

xA_i : área transversal de la sección i ,

\bar{d}_i : profundidad media de la sección i ,

b_i : anchura promedio de la sección i .

La longitud de cada sección ($l_{i,i+1}$) se calcula luego como:

$$l_{i,i+1} = 2 * V_i / (xA_i + xA_{i+1})$$

Ecuación No. 6

Los valores numéricos se encuentran en el cuadro No. 1. Estas longitudes $l_{i,i+1}$ representan físicamente la distancia de penetración de la marea.

Las anteriores definiciones constituyen pues un **Modelo de agitación causada por las mareas**. Implícito en estas definiciones se encuentra un alto grado de deformación geográfica del Golfo. Esto puede originar cambios de escala geométrica que a su vez pueden variar significativamente los valores de los Coeficientes de dispersión diferenciándolos de aquellos valores usados por Thomann originalmente (Thomann, R.V., 1972).

CALCULO DE LOS COEFICIENTES DE AGITACION

Las ecuaciones 1 y 2 son resueltas numéricamente mediante el uso de diferencias finitas (Thomann, 1972). Sus representaciones en el modelo son matrices u operadores definidos por las características físico-matemáticas de las ecuaciones mismas que llamamos A1 y A2. La solución de la ecuación 1 se puede representar mediante la la operación:

$$L = [A1]^{-1} * F, \text{ o } (A1)_{i,j}^{-1} * F_j$$

Ecuación No. 7

con:

$[A1]^{-1}$: inversa de la matriz A1 e $i,j = 1,2,3... 9$.

El vector F_j representa las descargas municipales diarias en cada sección.

CUADRO No. 1 Parámetros usados en la digitalización del Golfo de Nicoya según el modelo.

NUMERO DE SECCION	FLUJO DE AGUA DULCE PIES ³ / SEG.	COEFICIENTE DE REAERACION 1/DIA	COEF. DE DECAIMIENTO 1/DIA	VOLUMEN DEL PRISMA DE MAREA PIES ³ x 10 ⁶	COEFICIENTE DE DIFUSION MILLAS ² /DIA	AREA TRANSVERSAL PIES ² x 10 ³	CONCENTRACION DE SATURACION DE O ₂ MG/L
1	2023	00,410	0,132	3335	1,0 x 10 ⁻⁷	130	7,7
2	2079	00,140	0,132	6740	10,0 x 10 ⁻⁷	442	7,7
3	2230	00,090	0,132	7018	0,03	722	7,7
4	2478	00,090	0,132	11805	0,3	1398	7,7
5	2870	00,040	0,132	9790	1,0	2203	7,7
6	3441	00,40	0,132	16412	20,0	3213	7,7
7	4884	00,010	0,132	12323	500,0	03618	7,7
8	7597	00,010	0,132	17298	5000,0	9638	7,7
9	9814	0,0033	0,132	19181	66000,0	12472	7,7

El alto grado de automaticidad del modelo escrito para esta investigación permite varios posibles vectores F_i para los cuales se resuelven las ecuaciones 1 y 2 simultáneamente.

Para encontrar el valor de los coeficientes de agitación D_i , procedemos de la siguiente manera: variamos los valores D_i de la matriz A1 hasta que la solución de la ecuación 7 aproxime los valores de la salinidad promedio medidos para cada sección. Los valores de la salinidad se tomaron de Peterson, C.L., 1960. Para el cálculo asumimos una descarga punto de sal a la entrada del Golfo es decir:

$$F_i = F_{i,i+1} = 0 \text{ para } i = 1,2,3,\dots,7 \text{ y}$$

$$F_{8,9} = 60 \times 10^{15} \text{ libras de sal por día.}$$

Los índices dobles se originan en el hecho de que las descargas se realizan realmente entre sección y sección. Una vez logrado este ajuste (Cuadro No. 2) procedimos a incorporar al modelo los coeficientes así descubiertos como los coeficientes de agitación de las mareas en el Golfo de Nicoya.

LA INFLUENCIA DE LA DESCARGA DE AGUA DULCE EN LA AGITACION

Los términos convectivos de las ecuaciones diferenciales 1 y 2 nos permiten introducir las descargas de agua dulce debidas a los ríos y la lluvia como elementos Q_i de las matrices A1 y A2. Estos valores corresponden con las condiciones de frontera de las ecuaciones diferenciales y el modelo, tal y como está escrito, permite su alteración sección por sección. Para determinar la influencia de la descarga neta de agua dulce, se aumentaron las descargas de la secciones crecientemente y luego se multiplicaron por diez para fijar la sensibilidad de los cálculos con respecto del agua dulce. Se puede observar (Cuadro No. 3) que los cálculos de la salinidad predicha dependen muy poco de las decargas de agua dulce. En otras palabras, se notó una casi completa insensibilidad de los operadores A1 y A2 a los cambios y magnitudes absolutas de los Q_i . Las salinidades calculadas por el modelo son independientes de estas descargas para las secciones medias y altas (4 – 9). Se observa una influencia decisiva de las Q_i en las secciones cercanas al Río Tempisque (1, 2 y 3).

CUADRO No. 2 Coeficientes de dispersión usados en la predicción de la salinidad (Octubre – Noviembre de 1952).

NUMERO DE SECCION	(ESTACION)	COEFICIENTES USADOS MILLAS ² /DIA	SALINIDAD* MEDIDA G/KG	SALINIDAD** CALCULADA G/KG
1		$1,0 \times 10^{-7}$	----- 0/0	0,0 0/0
2		$10,0 \times 10^{-7}$	-----	3,3
3	(1)	0,03	24,67	22,67
4	(3)***	0,3	26,10	25,67
5	(4)	1,0	30,85	29,37
6	(5)	20,0	30,58	30,10
7	(6)	500,0	32,15	30,92
8	(7)	5000,0	31,64	31,50
9	(8)	66000,0	33,06	33,14

* : Según Peterson, 1960. Los valores son promedios verticales de determinaciones hechas cada 5 metros. Donde no había determinación se interpoló linealmente. Para las secciones 1 y 2 no hay estaciones de medición.

** : Para una descarga punto a la entrada del Golfo de 60×10^{15} libras/día de sal.

*** : La estación de medición 2 corresponde con los bajos cercanos a las islas Chira, Berrugate, Venado y Bejuco y no se incluye en la digitalización del Golfo.

CUADRO No. 3 Dependencia entre la salinidad calculada y la descarga de agua dulce.

SEC- CION	DESCARGA DE AGUA DULCE*			COEFICIENTE DE DISPERSION MILLAS ² /DIA	SALINIDAD CALCULADA*		
	a	b	c		a	b	c
1	300	1000	3000	1×10^{-7}	0,34 ‰	0,0 ‰	0,005 ‰
2	300	1000	3000	10×10^{-7}	16,73	6,74	2,52
3	300	1000	3000	0,03	24,85	24,38	22,25
4	300	1000	3000	0,3	25,72	25,72	25,80
5	300	1000	3000	1,0	29,37	29,37	29,37
6	300	1000	3000	20,0	30,1	30,097	30,10
7	300	1000	3000	500,0	30,9	30,92	30,92
8	300	1000	3000	5000,0	31,50	31,50	31,50
9	300	1000	3000	66000,0	33,139	33,139	33,139

* : El caso a corresponde a 300 pies³ por segundo y la salinidad predicha por la computadora se encuentra en la columna salinidad calculada a.

Los resultados obtenidos en los apartados anteriores permiten dividir el Golfo en tres regiones características. La primera es la Región Superior (secciones 1, 2 y 3) en donde la acción del Río Tempisque es decisiva y los coeficientes de agitación son muy pequeños. Es predecible que cualquier estudio sobre la calidad de las aguas en esta región deberá tomar en cuenta tanto la agitación causada por las mareas, como la acción convectiva causada por el flujo de agua dulce. La segunda región o Región Media del Golfo (secciones 4, 5, 6 y 7) se caracteriza por tener coeficientes de agitación con valores medios parecidos a los coeficientes reportados por Thomann (1972) y Choi (1975) para el Estuario de Delaware y el Río Columbia respectivamente. El régimen de mezcla en esta región es menos dependiente de la descarga de agua dulce que la Región Superior y es a su vez altamente dependiente del flujo y reflujo de las mareas. Cualquier proyecto para localizar descargas municipales en esta región deberá tener en cuenta las corrientes de mareas. Por último la tercera región o Región Inferior del Golfo (secciones 8 y 9) posee coeficientes de agitación muy grandes que reflejan un dominio absoluto de las mareas y una

completa irrelevancia del flujo de agua dulce cualquiera que este sea. Esta es una región característicamente oceánica en donde la agitación será muy grande y estará dominada por las corrientes de marea. Su elevado valor refleja gradientes transversales de velocidad de gran importancia. Esto coincide con los cálculos hidrodinámicos hechos en esta parte del Golfo (Murillo, 1981).

LOS COEFICIENTES DE REAERACION Y DECAIMIENTO

Para cuantificar el efecto de la reoxigenación debida a la difusión de oxígeno atmosférico al agua y el efecto del decaimiento de la materia orgánica, el modelo cuenta con los términos: $K_1 * S * L$ (decaimiento) en la ecuación 1 y $K_2 * S * (C_s - C)$ en la ecuación 2. Los coeficientes de reaeración se determinan de acuerdo con la publicación O'Connor, D.J., Dobbings, W.E., 1958 corregidos por los efectos de temperatura según ASCE 1961. Las velocidades medias para cada sección requeridas para estos cálculos se obtuvieron de un Modelo Hidrodinámico Bidimensional usado por el autor

(Murillo, 1981) en el cálculo de las corrientes y alturas de marea en 327 puntos en el interior del Golfo.

Los coeficientes de decaimiento (K_1) para cada sección se calculan asumiendo una demanda bioquímica enteramente carbonácea y una temperatura promedio de 20°C. Se supone que la reacción de decaimiento es de primer orden (Thomann, 1972). Para un resumen de los procedimientos y resultados de estos cálculos consúltese la publicación del autor de 1981. Los resultados se encuentran en el cuadro No. 1.

INFLUENCIA DE LAS DESCARGAS DE BOD EN LA DISTRIBUCION RESULTANTE DE DO

Para cuantificar el efecto de las descargas municipales de Demanda Bioquímica de Oxígeno Disuelto (BOD) sobre la distribución de Oxígeno Disuelto (DO) se decidió experimentar con las descargas equivalentes de BOD según:

- a) $1,0 \times 10^5$ libras por día en todas las secciones.
- b) $2,0 \times 10^5$ libras por día en todas las secciones.
- c) $1,0 \times 10^9$ libras por día en las secciones 8 y 9.
- ch) $1,0 \times 10^6$ libras por día en todas las secciones.

Los resultados de a, b, c se muestran gráficamente en la figura No. 2, los resultados de b y ch se encuentran en los cuadros No. 4 y 5.

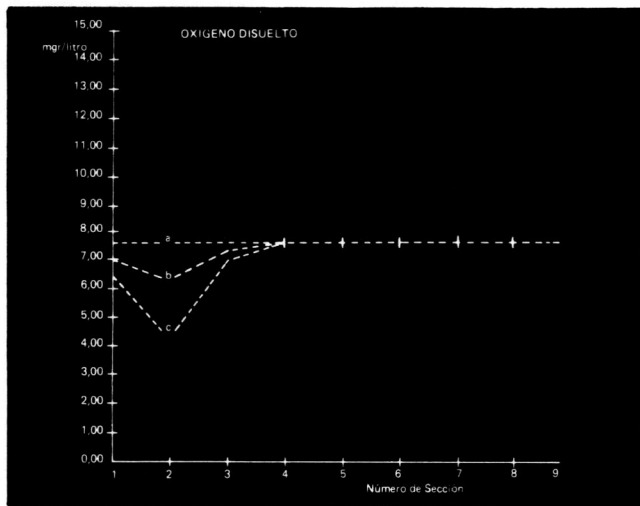


FIGURA No. 2. Perfiles longitudinales de la concentración de oxígeno disuelto para a: 1×10^5 libras/día en todas las secciones, b: 2×10^5 en todas las secciones y c: 1×10^9 en las secciones 8 y 9.

CUADRO No. 4. Perfil longitudinal de oxígeno disuelto resultante de una descarga homogénea de BOD de 2×10^5 libras/día en todas las secciones (mg/litro).

SEC-CION	BOD MG/L	CONSUMO DE LA MATRIZ A ₂ EN MG/LITRO	CONCENTRACION DE SATURACION	PERFIL DE OXIGENO RESULTANTE
1	2,5813	0,7346	7,7000	6,9654
2	1,8611	1,5360	7,7000	6,1632
3	0,7501	0,3933	7,7000	7,3067
4	0,1180	0,0183	7,7000	7,6817
5	0,0043	0,0001	7,7000	7,6999
6	0,0001	0,0000	7,7000	7,7000
7	0,0000	0,0000	7,7000	7,7000
8	0,0000	0,0000	7,7000	7,7000
9	0,0000	0,0000	7,7000	7,7000

CUADRO No. 5. Perfiles longitudinales de DO Y BOD resultantes de una descarga homogénea de BOD de 1×10^6 libras/día en todas las secciones.

SEC-CION	CONSUMO DE DO MG/LITRO	DO RESULTANTE C _s -C: MG/L	BOD MG/LITRO
1	7,34	0,35	25,81
2	5,368	-7,66	18,61
3	3,93	3,76	7,5
4	0,18	7,52	1,1
5	0,0009	7,69	0,04
6	0,0000	7,7	0,001
7	0,0000	7,7	0,0000
8	0,0000	7,7	0,0000
9	0,0000	7,7	0,0000

*: Para un nivel de saturación inicial C_s = mg/litro.

Los resultados obtenidos en el modelo indican que el Golfo de Nicoya posee una capacidad de desagüe global que excede en mucho los requerimientos de la ciudad de Puntarenas en cuanto a los niveles de BOD y DO se refiere. Esto desde luego deberá entenderse dentro del marco teórico supuesto en la presente investigación. En lugares aislados podrá haber focos locales con un alto grado de contaminación originaria de descargas punto locales no controladas. El Golfo en su totalidad sin embargo tiene una capacidad de desagüe global muy satisfactoria para las condiciones poblacionales actuales. En estos cálculos se asume una actividad biológica nula (es decir no hay respiración ni fotosíntesis) y como resultado se obtiene un modo de comportamiento dispersivo básico. Los efectos biológicos pueden ser incorporados al modelo sin mayor dificultad una vez que se realicen las mediciones de campo requeridas. Tampoco tomamos en cuenta el efecto tóxico de algunas sustancias químicas que en pequeñísimas cantidades pueden causar efectos catastróficos además de ser sustancias que se acumulan selectivamente en los organismos de los diferentes niveles nutricionales de la escala ecológica del Golfo. El modelo sin embargo puede emplearse incluyendo estos procesos en un futuro próximo siempre que se realicen las determinaciones de campo necesarias. El campo de la calidad de las aguas costeras en nuestro país está abierto a futuras investigaciones interdisciplinarias que podrían incluir a los Ingenieros Costeros, Biólogos Marinos y Químicos.

LITERATURA CONSULTADA

- Effect of Water Temperature on Stream Reaeration. Reporte No. 31, Comisión de Investigación en Ingeniería Sanitaria. *Journal ASCE*. División of Sanitary Engineering. Vol. 87(SA6), p: 59–71, Noviembre, 1961.
- Choi, B. **Pollution and Tidal Flushing Predictions for Oregon's Estuaries**. Tesis de Maestría. Oregón: Universidad Estatal de Oregon, 1975.
- Ippen, A.T. (editor). **Estuary and Coastline Hydrodynamics**. Nueva York: McGraw-Hill, 1966.
- Mehauté, B.L. **Hydrodynamics and Water Waves**. Nueva York: Springer-Verlag, 1976.
- Murillo, L.M. **Modelling Tidal Hydrodynamics and Dispersion in the Gulf of Nicoya. Costa Rica**. Tesis de Maestría. Oregón: Universidad Estatal de Oregón, 1981.
- O'Connor, D.J., Dobbings, W.E. "Mechanisms of Reaeration in Natural Streams". *Transactions. ASCE*. Vol. 123, p:655. 1958.
- Peterson, C.L. "The Physical Oceanography of the Gulf of Nicoya, Costa Rica; a Tropical Estuary". *Boletín de la Comisión Interamericana de Atún Tropical*. Vol. 4(4). p:139–216. 1960.
- Thomann, R.V. "Mathematical Model for Dissolved Oxygen". *Journal ASCE*. Vol.89(SA5); p:1–30. Octubre, 1963.
- Thomann, R.V. **Systems Analysis and Water Quality Management**. Nueva York: Environmental Science Services Division, 1972.
- Estuarine Modeling: An Assesment. Capabilities and Limitations for Resource Management and Pollution Control. **Water Pollution Control Research Series**. Tracor Inc.—Water Quality Office, EPA (Oficina de Protección Ambiental del Gobierno de los Estados Unidos de Norteamérica). Febrero, 1971.