

# CALIDAD DEL AGUA EN MARINAS PEQUEÑAS

Óscar A. Fuentes Mariles, Javier Osnaya Romero y Pedro A. Magaña Melgoza<sup>1</sup>

**RESUMEN.** Se describe un método para calcular la concentración de un contaminante o bien la concentración de oxígeno disuelto (OD) y la demanda bioquímica de oxígeno (DBO) para una marina donde existe un mezclado completo de las sustancias en sus aguas. Los resultados del método permiten analizar la calidad del agua, revisar el tamaño de la marina, evaluar las consecuencias de la descarga de un contaminante, estimar la magnitud de bombeos para reducir la concentración de contaminantes, etc. También se presentan ejemplos de aplicación.

## INTRODUCCIÓN

La calidad del agua de una marina está relacionada con las sustancias que le son vertidas y de los volúmenes de agua que intercambio con el mar.

A la marina pueden ingresar sustancias no deseables por escurrimientos superficiales debidos a la lluvia, derrames de agua contaminada de las embarcaciones, vertido de aguas residuales desde edificaciones, etc.

El volumen de intercambio se refiere a la cantidad de agua de mar que entra a la marina cuando está subiendo el nivel medio del mar y a la cantidad de agua de la marina que sale hacia el mar durante el lapso en que desciende dicho nivel. Las modificaciones del nivel medio del mar son originados por la marea astronómica.

En algunas marinas el volumen de intercambio con el mar después de varios ciclos de marea es insuficiente para mantener el agua de su interior en buenas condiciones. Tales son los casos de las marinas localizadas en lugares donde el rango de marea (diferencia entre los niveles máximo y mínimo) es pequeño. En estos casos el volumen puede aumentarse si se instalan equipos para bombeo de agua (intercambio forzado).

Con base en el volumen de intercambio en un lapso se realiza el análisis de la calidad del agua, la revisión de la geometría física de la marina, el cálculo del tiempo en que tardan en salir sustancias contaminantes, la obtención de la concentración de sustancias en el interior del cuerpo de agua, la evaluación de la bondad de implantar de bombeos para mejorar la calidad del agua, etc.

Lo anterior se puede llevar a cabo por medio de un modelo matemático sencillo, cuando existe un mezclado completo de las sustancias en sus aguas. Para marinas en las que no es válido lo anterior, se requiere utilizar modelos mas extensos, en dos o tres dimensiones en el espacio, para calcular la hidrodinámica de la marina y la difusión de sustancias.

En estos modelos se toma en cuenta la forma de la marina, las islas, puentes, muelles, etc. (Falconer 1989, Fuentes *et al* 1995).

## MAREA

El fenómeno que da lugar al movimiento del agua dentro de la marina es la marea astronómico. Ella determina la elevación del nivel del mar a lo largo del tiempo en la entrada de la marina.

La marea que se presenta en un sitio se puede predecir con un año de anticipación. Para este fin es común emplear calendarios o tablas de marea. En este caso se prefiere la versión aproximada siguiente:

$$\zeta = R \cos(\omega t) + h \quad (1)$$

donde  $R$  y  $T$  son el rango y período de marea respectivamente,  $h$  es la profundidad del nivel medio del mar y  $t$  representa al tiempo (Figura 1).

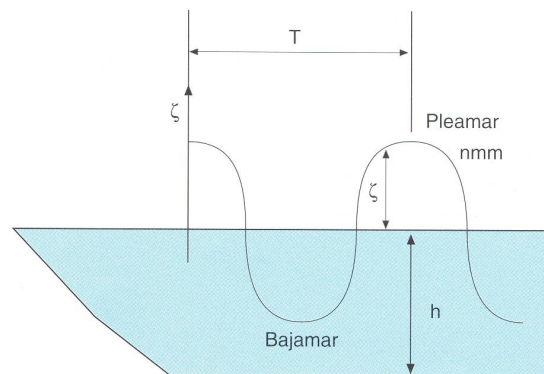


Figura 1. Variación del nivel de la superficie libre del agua debido a la marea

<sup>1</sup> Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México. Circuito Escolar, Apartado postal 70-4 72, Ciudad Universitaria, Coyoacán, México D.F. Tfs.: (525) 622 33 20, 622 33 22, 622 33 23 e-mail: ofin@pumas.iingen.unam.mx, jor@pumas.iingen.unam.mx,

Artículo publicado en Ingeniería del Agua. Vol.4 Num.4 (diciembre1997), páginas 47-54, recibido el 25 de septiembre de 1997 y aceptado para su publicación el 2 de diciembre de 1997. Pueden ser remitidas discusiones sobre el artículo hasta seis meses después de la publicación del mismo. En el caso de ser aceptadas, las discusiones serán publicadas conjuntamente con la respuesta de los autores en el primer número de la revista que aparezca una vez transcurrido el plazo indicado.

**ECUACION DE BALANCE DE MASA**

El modelo matemático para calcular la distribución temporal de la concentración de una sustancia dentro de la marina se plantea a partir del principio de balance de masa.

Sean  $P$  la masa por unidad de tiempo de una sustancia vertida en forma continua a la marina,  $Q_p$  el gasto del agua por unidad de área que si se quiere se bombea al interior de la marina y  $Q_R$  el gasto de agua de la marina por unidad del área que si se desea se extrae por bombeo desde la marina. La concentración de la sustancia  $C$  se expresa como el cociente de masa entre volumen. La masa de la sustancia vertida se considera despreciable en comparación con la del volumen de agua que existe dentro de la marina.

Al disminuir el nivel del agua en su entrada durante el lapso de descenso de la marea (de pleamar a bajamar, "ebb tide") la marina desaloja hacia el mar un volumen de agua que contiene una masa de cierta sustancia. Posteriormente, en el período de ascenso de la marea a la entrada (de bajamar a pleamar, "flood tide"), al recinto entra agua del mar, por ello no sale de la marina agua con masa de la sustancia de interés (Figura 2). En esta etapa, la concentración de la sustancia disminuye ya que la masa existente dentro de la marina se divide entre un mayor volumen de agua (por el agua que entró a la marina para alcanzar un nivel más alto, igual al de la pleamar).

En la ecuación de balance, también se considera el incremento de masa de la sustancia en la interfase agua-aire y la disminución por procesos físico-químicos.

La ecuación de balance de masa se establece a partir del volumen de control con área horizontal  $A$  y profundidad  $h$  mostrado en la Figura 3. De modo que la masa que entra ( $M_E$ ) menos la que sale ( $M_S$ ) del volumen de control es igual al cambio de la masa de su interior ( $dM$ ), es decir:

$$M_E - M_S = dM \tag{2}$$

El volumen del agua alojada en la marina se estima a partir de la marea como:

$$V = V_m + A_m \zeta \tag{3}$$

donde,  $V_m$  y  $Q_R$  son el volumen de agua y área de superficie libre de la marina para el nivel medio del mar y  $\zeta$  la elevación del agua respecto al nivel medio, está dado por la ecuación (1).

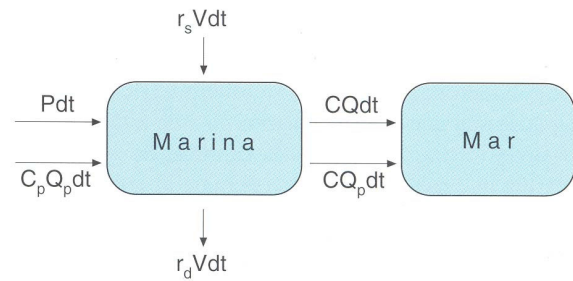


Figura 3 Volumen de control del balance de masa cuando disminuye el nivel del agua debido a la marea.

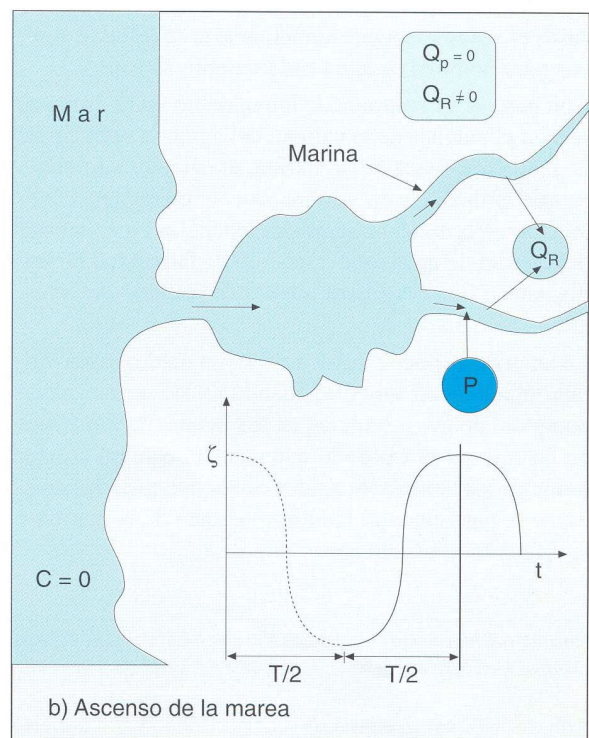
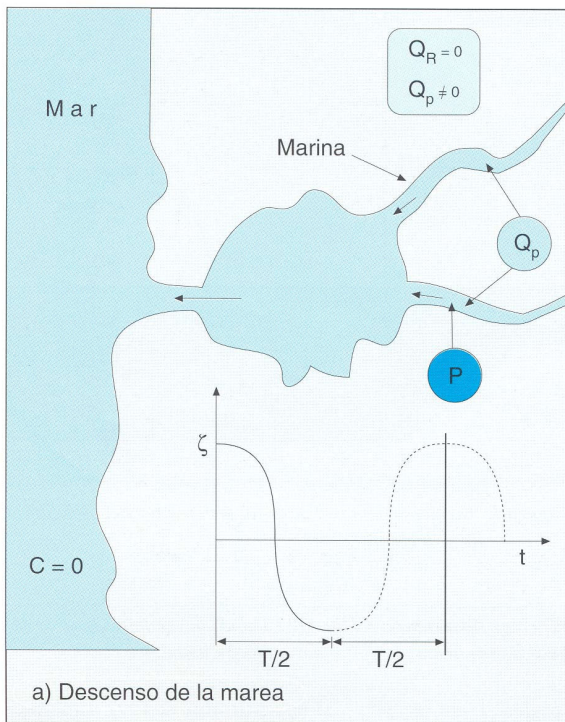


Figura 2. Gastos forzados por bombeo de agua para aumentar el volumen de intercambio de agua de mar.

Así el gasto que fluye en la comunicación del mar y la marina resulta ser:

$$Q = \frac{dV}{dt} = -\left(\frac{2A_m R \pi}{T}\right) \operatorname{sen}\left(\frac{2\pi t}{T}\right) \quad (4)$$

Como la masa de la sustancia en el interior de la marina es igual al producto de la concentración por el volumen,  $CV$  se tiene que:

$$dM = d(CV) = C dV + V dC \quad (5)$$

por lo cual la expresión anterior se escribe como:

$$M_E - M_S = C dV + V dC \quad (6)$$

o bien al despejar al último término:

$$V dC = M_E - M_S - C dV \quad (7)$$

si se tiene en cuenta que  $dV = Q dt$  y dividiendo entre  $V$ , se encuentra:

$$dC = \frac{M_E - M_S - C Q dt}{V} \quad (8)$$

La marea da lugar a dos etapas del flujo de agua, a continuación se disgregan los términos de la ecuación (8) que intervienen en cada una de ellas.

#### **Etapas de descenso de la marea**

Durante el descenso de la marea (el flujo de agua es de la marina hacia el mar), en un lapso  $dt$  se tienen las aportaciones de masa de la sustancia ( $M_E$ ) siguientes:

- Masa de una sustancia vertida desde el exterior:  
 $P' A_m dt = P dt$
- Masa que entra en la interfase agua-aire:  
 $r_s V dt$
- Puede existir un gasto  $Q_p$  que se bombea (solamente durante la etapa de descenso de la marea) a la marina con concentración  $C_p$  de la sustancia:  $C_p Q_p dt$ . Si el bombeo es con agua que no contiene a la sustancia (agua limpia) entonces,  $C_p = 0$ . Por lo que la entrada de masa queda:

$$M_E = P dt + r_s V dt + C_p Q_p dt \quad (9)$$

De la marina sale masa de la sustancia ( $M_S$ ) por estas causas:

- Por el flujo de agua de la marina hacia el mar:  
 $- C Q dt$   
(El signo menos es congruente con la ecuación 4)
- El decaimiento de la sustancia en el tiempo:  
 $r_d V dt$

- En caso de que exista el gasto de bombeo de agua  $Q_p$  se aumenta el flujo de agua de la marina hacia el mar (porque el gasto de bombeo agregó un volumen de agua a la marina) ello produce un egreso de masa igual a:  $C Q_p dt$

De este modo, el término de salida de masa resulta ser:

$$M_S = - C Q dt + r_d V dt + C Q_p dt \quad (10)$$

Al sustituir las ecuaciones (9) y (10) en la (8) y dividir entre  $dt$  se obtiene

$$\frac{dC}{dt} = \frac{P + r_s V + C_p Q_p + C Q - r_d V - C Q_p - C Q}{V} \quad (11)$$

o bien:

$$\frac{dC}{dt} = \frac{P + Q_p(C_p - C)}{V} r_d + r_s \quad (12)$$

La expresión anterior es válida para la etapa de descenso de la marea.

#### **Etapas de ascenso de la marea**

Durante el ascenso de la marea (el flujo de agua es del mar hacia a la marina) se presentan los ingresos siguientes:

- Masa vertida a la marina desde el exterior:  
 $P' dt = P A_m dt$
- Masa aportada en la interfase agua-aire:  $r_s V dt$
- Desde el mar entra un gasto de agua  $Q$  con una concentración de la sustancia  $C_m$  (en caso de que sea agua limpia,  $C_m = 0$ ) por lo que se incorpora una masa igual a  $C_m Q dt$ .
- En caso de existir el gasto de bombeo  $Q_R$  (solamente durante la etapa de ascenso de la marea) aumenta el flujo de agua del mar hacia la marina (para agregar el volumen del agua que salió de la marina por el bombeo del gasto  $Q_R$ ); esto hace ingresar una masa igual a la  $C_m Q_R dt$ .

Así la masa de entrada es:

$$M_E = P dt + r_s V dt + C_m Q dt + C_m Q_R dt \quad (13)$$

Las salidas de masa que ocurren durante esta etapa, se listan a continuación:

- Dentro del cuerpo de agua se tiene un decaimiento de la sustancia igual a:  $r_d V dt$ .
- Podría existir un gasto  $Q_R$  de bombeo desde la marina hacia el exterior, que produce una salida de masa igual a  $C Q_R dt$ .

El correspondiente a la salida de masa queda de la manera siguiente:

$$M_S = r_d V dt + C Q_R dt \quad (14)$$

Al tomar en cuenta a las ecuaciones (11) y (12) en la (8) y después de dividir entre  $dt$ , se llega a:

$$\frac{dC}{dt} = \frac{P+r_s V+C_m Q-r_d V-C Q_R-C Q+C_m Q_R}{V}$$

Al simplificar y ordenar términos se obtiene que:

$$\frac{dC}{dt} = \frac{P-(Q+Q_R) C+C_m(Q-Q_R)}{V} -r_d+r_s \quad (15)$$

La expresión anterior es aplicable para la etapa de ascenso de la marea.

Las ecuaciones (12) y (15) corresponden a las ecuaciones fundamentales de balance de masa en la marina (Figura 4).

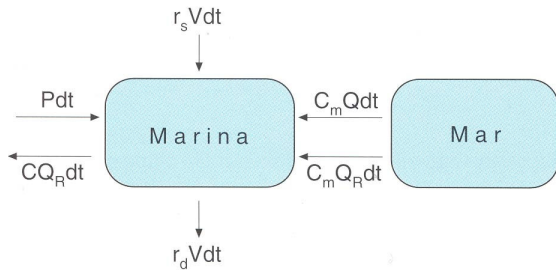


Figura 4. Volumen de control del balance de masa cuando aumenta el nivel del agua debido a la marea.

### CAMBIO DE LA CONCENTRACIÓN DE UNA SUSTANCIA

Cuando la sustancia vertida considerada en las ecuaciones fundamentales de balance de masa corresponde a un contaminante que no tiene aporte a través de la interfase y existe una tasa  $k$  de decaimiento en el tiempo se tiene que:

$$r_s = 0 \quad (16)$$

$$r_d = k C \quad (17)$$

de modo que las ecuaciones (12) y (15) quedan como: a. Para el descenso de la marea

$$\frac{dC}{dt} = \frac{P+Q_p(C_p-C)}{V} -k C \quad (18)$$

b. Para el ascenso de la marea:

$$\frac{dC}{dt} = \frac{P-(Q+Q_R) C+C_m(Q+Q_R)}{V} -k C \quad (19)$$

### CAMBIO DE LA CONCENTRACIÓN DE OD Y DBO

Una forma de estimar la calidad del agua es a partir de los valores que toman en el interior de la marina las concentraciones de oxígeno disuelto (OD) y demanda bioquímica de oxígeno (DBO). La primera se considera la

capacidad del agua para asimilar materia orgánica contaminante y soportar la vida acuática. En la segunda, a la cantidad de oxígeno requerida para la descomposición de la materia orgánica en el agua.

Se acepta que al inicio, el agua de la marina está saturada con OD y que cuando se ingresa agua con cierto contenido de materia orgánica en descomposición, el OD es consumido. Al mismo tiempo, cierta cantidad de oxígeno de la atmósfera se disuelve en el agua y aporta OD, sin que se llegue a exceder el valor de saturación que admite el agua.

Para determinar el efecto en la calidad del agua de la marina debido al vertido de agua con materia orgánica en descomposición, se propone calcular a lo largo del tiempo las concentraciones de OD y DBO.

### Ecuación para el cambio de concentración de DBO

La ecuación que permite calcular la concentración de DBO se encuentra a partir de las ecuaciones generales deducidas anteriormente y se toman en cuenta los aspectos siguientes:

La concentración de DBO se representa con la literal  $b$  y sustituye a la  $C$  de las ecuaciones (12) y (15).

- La cantidad de masa vertida de la sustancia (en este caso DBO)  $P$  se identifica como  $P_b$ .
- No existe aportación de DBO desde el aire, por lo que  $r_s = 0$ .
- En caso de que exista el bombeo  $Q_p$ , éste tiene una concentración  $b_p$  de DBO.
- El agua de mar tiene una concentración  $b_m$  de DBO.
- La tasa de consumo de DBO dentro de la marina se considera que es una fracción de la concentración de DBO, es decir:

$$r_d = k_l b \quad (20)$$

De manera que las ecuaciones mencionadas quedan como:

a. Para el descenso de la marea:

$$\frac{db}{dt} = \frac{P_b+Q_p(b_p-b)}{V} -k_l b \quad (21)$$

b. Para el ascenso de la marea:

$$\frac{db}{dt} = \frac{P_b-(Q+Q_R) b+b_R(Q+Q_R)}{V} -k_l b \quad (22)$$

### Ecuación para el cambio de concentración de OD

Esta ecuación también es deducida a partir de las ecuaciones (12) y (15) considerando los cambios siguientes:

- La concentración de OD corresponde a la literal  $d$ , por lo que se cambia a la  $C$  por  $d$ .
- La cantidad de masa de sustancia (en este caso OD) vertida  $P$  se identifica  $P_d$
- En caso de que exista el gasto de bombeo  $Q_R$  este tiene una concentración de OD de valor  $d_p$
- La concentración de OD del agua de mar es  $d_m$ .

- La aportación de OD desde el aire es proporcional a la diferencia entre la concentración de OD de saturación ( $d_s$ ) y la concentración de OD, esto es:

$$r_s = k_2 (d_s - d) \quad (23)$$

- La tasa de consumo de OD dentro de la marina se considera igual a la de consumo de DBO (se obtiene con la ecuación 20).

Tomando en cuenta los aspectos anteriores, se plantea que:

a. Para el descenso de la marea:

$$\frac{dd}{dt} = \frac{P_d + Q_P(d_P - d)}{V} - k_1 b + k_2 (d_s - d) \quad (24)$$

b) Para el ascenso de la marea:

$$\frac{dd}{dt} = \frac{P_d - (Q + Q_R)d + d_m}{V} - k_1 b + k_2 (d_s - d) \quad (25)$$

Para obtener OD y DBO durante el descenso de marea se emplean las ecuaciones (21) y (24) y, para la etapa de ascenso de marea se usan las ecuaciones (22) y (25).

### ÍNDICES DE INTERCAMBIO

Sean  $C_i$  y  $M_i$  la concentración y la masa de la sustancia en la marina después de haber transcurrido el  $i$ -ésimo ciclo de marea,  $V_H$  el volumen de agua en la marina al final del lapso  $T$  considerado en la ecuación (3).

La masa de la sustancia que queda en la marina después de  $i$  ciclos de marea es igual a la diferencia entre la masa de la sustancia al inicio del primer ciclo de marea ( $M_0$ ) menos la masa al final del  $i$ -ésimo ciclo de marca ( $M_i$ ).

$$DM = M_0 - M_i \quad (26)$$

al dividir entre la masa  $M_0$  resulta:

$$G_i = 1 - \frac{M_i}{M_0} \quad (27)$$

donde  $G_i = DM/M_0$  representa el porcentaje de masa que quedó en la marina (después de transcurrir  $i$  ciclos de marea) respecto al original ( $M_0$ ).

Como la masa es igual al producto de la concentración por el volumen, resulta que,  $M_i = C_i V_H$  y  $M_0 = C_0 V_H$ , por lo que la expresión (27) también se puede escribir como:

$$G_i = 1 - \frac{C_i}{C_0} \quad (28)$$

Por otra parte, la cantidad de masa que salió durante el ciclo  $i$  de la marea es:

$$S_i = M_{i-1} - M_i$$

Si se divide entre la masa de la sustancia al inicio del primer ciclo de marea se encuentra:

$$\frac{S_i}{M_0} = \frac{M_{i-1} - M_i}{M_0}$$

llamando al cociente  $S_i/M_0$  como  $E_i$  se escribe:

$$E_i = \frac{M_{i-1} - M_i}{M_0}$$

o bien:

$$E_i = \frac{C_{i-1} - C_i}{C_0} \quad (29)$$

donde  $E_i$  se le denomina coeficiente de intercambio; representa el porcentaje de la masa que salió durante el ciclo  $i$  de marea respecto a la que existía dentro de la marina (al inicio del primer ciclo).

Si se plantea la suma de los primeros  $i$  coeficientes de intercambio se tiene:

$$E_1 + \dots + E_i = \frac{(M_0 - M_1) + (M_1 - M_2) + (M_2 - M_3) + \dots + (M_{i-1} - M_i)}{M_0} = \frac{M_0 - M_i}{M_0}$$

que al comparar con la ecuación (27), se encuentra:

$$G_i = \sum_1^i E_j \quad (30)$$

Con base en la ecuación (30) se determina en número de ciclos necesarios para una cantidad máxima de masa contaminante dentro de la marina que no afecte la calidad de este líquido en su interior.

### APLICACIONES

Para obtener la solución de las ecuaciones diferenciales de balance de masa se empleó el método de Runge-Kutta de cuarto orden para un sistema de dos ecuaciones diferenciales ordinarias.

#### Cambio de la concentración de una sustancia contaminante

**Ejemplo 1:** Para una marina que contiene agua con una concentración de una sustancia contaminante igual a  $C_0$  se dispone de la información siguiente:

Profundidad media en la marina .....	3.0 m
Área de superficie libre de la marina (al nmm).....	40.000 m <sup>2</sup>
Volumen de agua dentro de la marina (al nmm).....	120.000 m <sup>3</sup>
Rango medio de marea.....	0.24 m
Período de marea.....	12.5 h
Coefficiente de decaimiento de la sustancia.....	k=0
Gasto colocado artificialmente.....	Q <sub>P</sub> =0
Gasto extraído artificialmente.....	Q <sub>R</sub> =0
Concent. de la sustancia contaminante en el mar.....	C <sub>m</sub> =0

Obtener la concentración de la sustancia dentro de la marina después de 20 días para un ingreso de masa de contaminante dado por los valores siguientes:

- a.  $P' = 0$ ;
- b.  $P' = 0.1 \text{ kg / (m}^2\text{s)}$ ;
- c.  $P' = 0.2 \text{ kg / (m}^2\text{s)}$ ;
- d.  $P' = 0.3 \text{ kg / (m}^2\text{s)}$ ;

Solución:

En la *Figura 5* se presentan los resultados obtenidos al resolver numéricamente las ecuaciones (13) y (14) con el método de Runge-Kutta de cuarto orden. En esta figura se observa que la concentración tiende a una concentración constante (de equilibrio). En este caso:  $P = P'A_m = P'(40000)$ .

Entre otros resultados de interés, la relación de concentración final entre la inicial después de 20 días se consignan en la *Tabla 1*.

P' (Kg/m <sup>2</sup> s)	P (Kg/s)	C/C <sub>0</sub>	C <sub>40</sub>
0.0	0.0	0.68	0.32
4000	0.1	2.39	-1.39
8000	0.2	4.73	-3.73
12000	0.3	7.08	-6.08

**Tabla 1.** Concentración relativa después de 20 días (40 ciclos de marea) para distintas tasas de ingreso de contaminante

Se aprecia que la concentración después de 20 días (40 ciclos de marea) es de 68 % de la inicial, cuando no entra contaminante; en cambio es 7 veces mayor a la inicial si entra un contaminante de 0.3 kg/(m<sup>2</sup>s). La masa del contaminante al final de 40 ciclos de marea es 32% de la inicial cuando no entra contaminante ( $P = 0$ ).

**Ejemplo 2:** Para disminuir la concentración de contaminante del ejemplo 1, cuando ingresa un contaminante con tasa de 0.1 kg/(m<sup>2</sup>s) se considera el bombeo de gasto de

agua limpia para las siguientes relaciones:

- a.  $Q_p = 0.5 \text{ m}^3/\text{s}$ ;
- b.  $Q_p = 1 \text{ m}^3/\text{s}$ ;
- c.  $Q_p = 1.5 \text{ m}^3/\text{s}$ ;
- d.  $Q_p = 2 \text{ m}^3/\text{s}$ ;

Obtener la concentración de la sustancia dentro de la marina después de 20 días.

Solución:

En la *Tabla 2* y *Figura 6* se muestran los valores encontrados con el modelo numérico basado en las ecuaciones (9) y (10) para los cuatro gastos de bombeo.

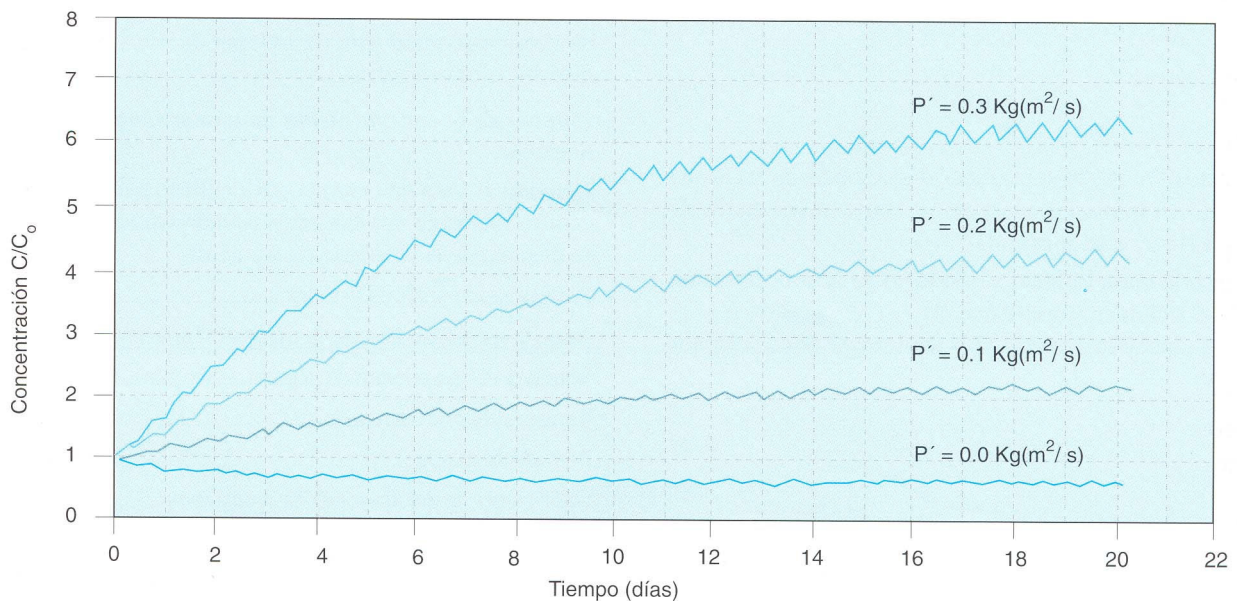
Se observa que es conveniente incluir un gasto  $Q_p$  de por lo menos 2 m<sup>3</sup>/s para mantener una pequeña concentración relativa (del 61%, casi igual a la que se tiene en el ejemplo para  $P = 0$ ; la masa del contaminante sería del 39% de la original, en vez de 139% que se presentó en el *Ejemplo 1*).

Q <sub>p</sub> (m <sup>3</sup> /s)	C/C <sub>0</sub>	C <sub>40</sub>
0.5	1.44	-0.14
1.0	0.87	0.13
1.5	0.72	0.28
2.0	0.61	0.39

**Tabla 2.** Concentración relativa después de 20 días, para diferentes gastos de bombeo.

**Cambio de la concentración de OD y DBO**

**Ejemplo 3:** La marina del *Ejemplo 1* tiene concentraciones de OD de 6.2 kg/m<sup>3</sup> (mg/1) y de DBO de 1 kg/m<sup>3</sup>. A este recinto marino se descarga continuamente un flujo de agua que tiene una concentración de DBO igual a 0.483 kg/m<sup>3</sup>. Determine las concentraciones de OD y DBO después de 20 días que ingresó el flujo con carga de DBO. Las tasas de decaimiento de OD y DBO son 2.315 x 10<sup>-6</sup>/s y 3.472 x 10<sup>-6</sup>/s respectivamente.



**Figura 5.** Variación de concentración de contaminante con  $Q_p$  y  $Q_R = 0$

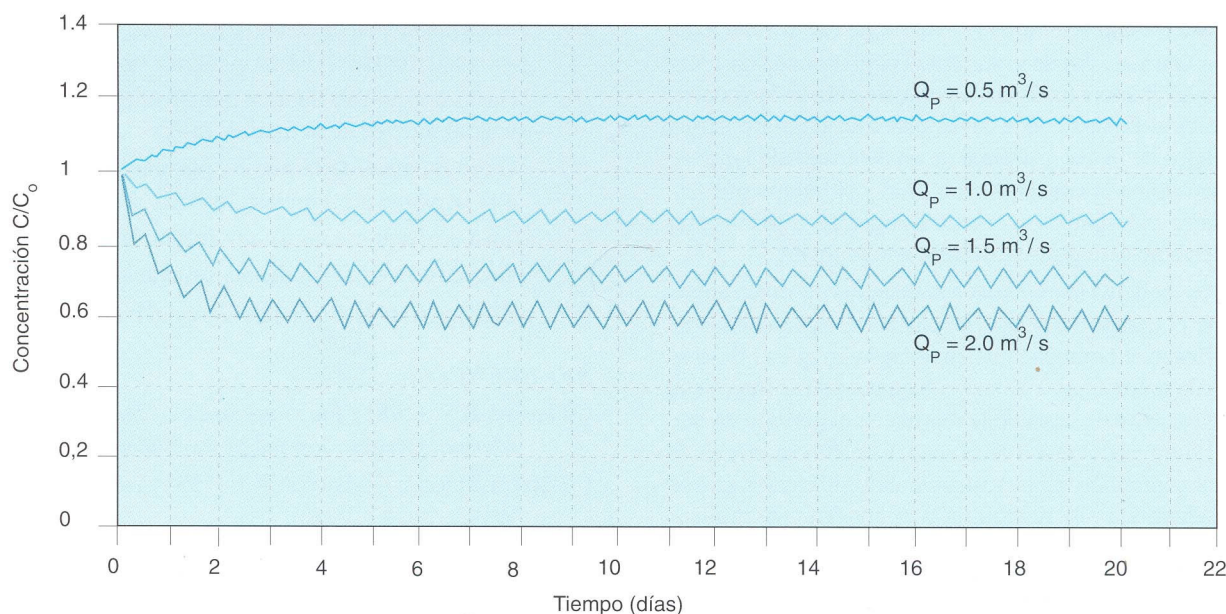


Figura 6. Variación de la concentración con  $P' = 0.1 \text{ kg}/(\text{m}^2/\text{s})$  y diferentes gastos de ingreso de agua limpia

La concentración de oxígeno disuelto de saturación es  $7.12 \text{ kg}/\text{m}^3$ . No existen gastos forzados ( $Q_P = Q_R = 0$ ).

**Solución:**

Con datos proporcionados se procedió a resolver con el método de Runge-Kutta de cuarto orden las ecuaciones (21), (22), (24) y (25).

Primero se determinó el tiempo necesario para alcanzar los valores de equilibrio de DBO y OD iniciales, encontrándose que esto sucede a partir del día 5, por lo que a partir de este momento se considera que ingresa el flujo con contaminante. Los resultados obtenidos mostrados en la Figura 7 muestran el cambio en el tiempo de las concentraciones de OD y DBO. Se nota que al final de 20 días, después de que entró el flujo con la concentra-

ción de DBO igual a  $0.483 \text{ kg}/\text{m}^3$ , la concentración de DBO es de  $4.98 \text{ kg}/\text{m}^3$ , y la OD de  $4.62 \text{ kg}/\text{m}^3$ . Como esta última es cercana al valor de 4 el agua es de muy buena calidad para una marina, ya que con esta concentración se garantiza un buen desarrollo de la vida acuática, y además se evitarán problemas de tipo sanitario y estético pues al presentarse malos olores y coloración verdosa en agua, implican contaminación, por lo que es capaz de admitir una carga de contaminante que demande cuando mucho  $0.428 \text{ kg}/\text{m}^3$ .

**CONCLUSIONES**

1. En los últimos años se han implantado acciones encaminadas a mejorar o preservar la calidad de distintos cuerpos de agua.

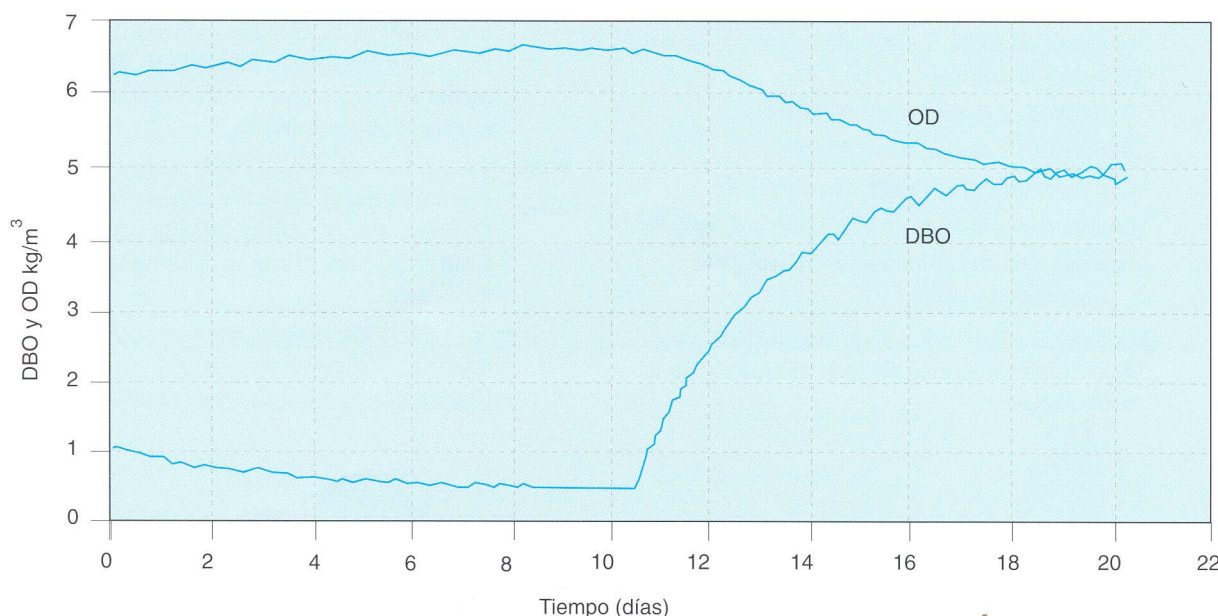


Figura 7. Variación de DBO y OD en la marina.

2. Este trabajo se enfoca al estudio de calidad del agua en marinas, donde la sustancia contaminante se mezcla de manera uniforme en ella. Se obtiene la concentración de una o dos sustancias a lo largo de varios ciclos de marea y al final de un determinado lapso se determina la concentración final y el tiempo que tardaría en limpiarse el cuerpo de agua ante un eventual derrame de alguna sustancia contaminante.
3. Los modelos matemáticos planteados permiten analizar el comportamiento del cuerpo de agua cuando se plantea el bombeo agua en el lapso en que el flujo es de la marina hacia el mar, o bien cuando se impone la extracción de agua de la marina en el período en que el flujo es del mar a la marina. Con ello se calcula la concentración de la sustancia ante diferentes gastos de bombeo y se determina si es conveniente implantarlos para mantener una calidad de agua aceptable.
4. Se calcula la variación de concentración de oxígeno disuelto (OD) y demanda bioquímica de oxígeno (DBO) ante una descarga de una sustancia contaminante que tiene una determinada cantidad DBO. A parte de ello se obtiene la carga máxima de un determinado contaminante que podría soportar la marina sin que se altere la calidad del agua de la misma.
5. Cabe hacer notar que la metodología propuesta se puede aplicar a otros cuerpos de agua conectados al mar, como lo pueden ser las lagunas costeras si es válida la hipótesis de un mezclado completo de la sustancia vertida en sus aguas.

**LISTA DE SIMBOLOS**

$A_m$	Área de la superficie libre de la marina al nivel medio del mar, $m^2$
$C$	Concentración de la sustancia, $kg/m^3$
$DBO$	Demanda bioquímica de oxígeno, $kg/m^3$
$d_s$	Concentración de oxígeno disuelto de saturación, $kg/m^3$
$h$	Profundidad del nivel medio del mar, $m$
$G_i$	Porcentaje de masa después de $i$ ciclos de marea respecto a la original
$k_1$	Coefficiente de decaimiento de DBO, $s^{-1}$
$k_2$	Coefficiente de decaimiento de OD, $s^{-1}$
$M_E$	Masa que entra al volumen de control, $kg$
$M_i$	Masa de contaminante en el instante $i$ , $kg$
$M_s$	Masa que sale del volumen de control, $kg$
OD	Oxígeno disuelto, $kg/m^3$
$P$	Masa por unidad de tiempo de una sustancia vertida en forma continua en toda el área $A_m$ de la marina, $kg/s$

$P'$	Masa por unidad de tiempo y unidad de área de una sustancia vertida en forma continua, $kg/(m^2 s)$
$Q_p$	Gasto por unidad de área que se requiere bombear al interior de la marina, $m^3/s$
$Q_R$	Gasto de agua de la marina por unidad de área que se extrae por bombeo, $m^3/s$
$r_d$	Tasa de decaimiento de una sustancia, $kg/(m^3 s)$
$r_s$	Tasa de recuperación de una sustancia, $kg/(m^3 s)$
$\zeta$	Elevación de la superficie libre del mar, $m$

**REFERENCIAS**

Callaway, R.S. (1981) *Flushing Study of South Beach Marina, Oregon*, Journal of the Waterway, Port, Coastal and Ocean Division ASCE (1981) Vol. 107, No. WW2, pp. 47-5858.

Chiang, W.L. and Lee, J.J. (1982) *Simulation of Large-Scale Circulation in Harbors*, Journal of the Waterway, Port, Coastal and Ocean Division, ASCE, Vol. 108, No. WW1, pp. 17-3.

Falconer, R. A. (January, 1986) *Water Quality Simulation Study of Natural Harbour*, Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Division, ASCE, Vol. 12, No. 1, pp. 15-34.

Falconer, R.A. y Mumford, J.M. (1989) *Numerical Model Study for a Furposed Marina Development in Portsmouth Harbour, U.K.*, Proceedings of the International Conference on Marinas, Southampton, U.K.

Falconer, R.A., Hakhwadeh, H., (1995) *Numerical Modelling of Secondary Tide Induced Circulation in Rectangular Harbours with Large Aspect Ratios*, Marina III Planning, Desing an Operation, Editor W.R. Blain, Wessex Institute of Technology, U.K, Computational Mechanics Publications.

Fuentes, M.O., Osnaya, R.J, Magaña, M.P, (1995) *Some Aspects of Numerical Modelling of Tidal Flows and Fushing in Marinas*, Marina III Planning, Desing an Operation, Editor W.R. Blain, Wessex instituto of Technology, U.K, Computational Mechanics Publications.

Nece, R.E., y Layton, J.A., (1989) *Mitigating Marina Environmental Impacts Through Hydraulic Design*, Proceedings of the International Conference on Marinas, Southampton, U.K., 435 - 449.

Ozhan, E., (1989) *Flushing of Marinas with Weak Tidal Motion*, Proceedings of the International Conference on Marinas, Southampton, U.K.