

# TRANSFORMACIÓN QUÍMICA DE LA MATERIA ORGÁNICA EN LA ENSENADA DE TUMACO

Betancourt Portela, J.M; Casanova Rosero, R.F; Castro Suarez, L.A.

Centro Control Contaminación del Pacífico. Tumaco, Nariño, Colombia

## ABSTRACT

The present study has as objective to know the process of biochemical oxidation of the organic matter (MO) and nitrification in the waters of the Bay of Tumaco. This process is described by reactions of first order; each kinetic equation that is generated obeys the balance of the parameter that is wanted to model which possesses a kinetic constant (also called reaction velocity, rat or velocity of change). In laboratory tests the constants were determined for two places of the Bay; the obtained values for  $K_{DBO}$  were between  $0.08$  and  $0.14\text{day}^{-1}$ ;  $K_{NH_4}$   $0.08-0.14\text{day}^{-1}$ ;  $K_{NO_2}$   $0.14-0.30\text{day}^{-1}$  and  $K_{NO_3}$   $0.02-0.07\text{day}^{-1}$ ; presenting correlation with data obtained in the theoretical formulation.

## RESUMEN

El presente estudio tiene como objetivo conocer el proceso de oxidación bioquímica de la materia orgánica (MO) y nitrificación en las aguas de la Ensenada de Tumaco. Este proceso es descrito por reacciones de primer orden; cada ecuación cinética que se genera obedece al balance del parámetro que se desea modelar y posee una constante cinética

(También llamada velocidad de reacción, rata o velocidad de cambio). Mediante ensayos de laboratorio se determinaron las constantes para dos sitios de la Ensenada; los valores encontrados para  $K_{DBO}$  estuvieron entre  $0.08$  y  $0.14\text{día}^{-1}$ ,  $K_{NH_4}$   $0.08-0.14\text{día}^{-1}$ ;  $K_{NO_2}$   $0.14-0.30\text{día}^{-1}$  y  $K_{NO_3}$   $0.02-0.07\text{día}^{-1}$ ; presentando correlación con los datos obtenidos en la formulación teórica.

## INTRODUCCIÓN

La Ensenada de Tumaco corresponde a un ecosistema estuarino complejo, debido a la interacción de procesos de mezcla de agua dulce y oceánica ligado al régimen mareal; en donde la materia introducida a través de ríos, aguas residuales domésticas e industriales, escorrentías, entre otras, sufre una serie de transformaciones químicas. La nitrificación es uno de estos procesos, e implica la oxidación del amonio ( $NH_4^+$ ) a nitrito ( $NO_2^-$ ) y subsecuentemente a nitrato ( $NO_3^-$ ). Estas transformaciones a estados más oxidados, inducen un consumo de oxígeno, representando una fracción de la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO).

Los nutrientes están presentes en diferentes formas en los sistemas acuáticos y solamente las formas inorgánicas disueltas están disponibles para la productividad primaria, además son importantes en la modelación de la calidad del agua que generalmente describe sus tendencias y transformaciones bajo cinéticas de primer orden.

Las sales nutritivas solubles (formas del nitrógeno y fósforo), son removidas de la columna de agua por las algas durante el proceso de la fotosíntesis y son transferidas hacia otros organismos acuáticos a través de la cadena alimenticia para después retornar nuevamente al agua por medio de las excreciones solubles de todos los organismos, la descomposición de detritos orgánicos y sedimentos y la hidrólisis de nutrientes orgánicos; procesos que se conocen como ciclos biogeoquímicos. Todos estos flujos son representados a través de relaciones matemáticas y ecuaciones de balances.

Por lo anterior con este estudio se pretende conocer el proceso de oxidación bioquímica de la materia orgánica y nitrificación en las aguas de la Ensenada de

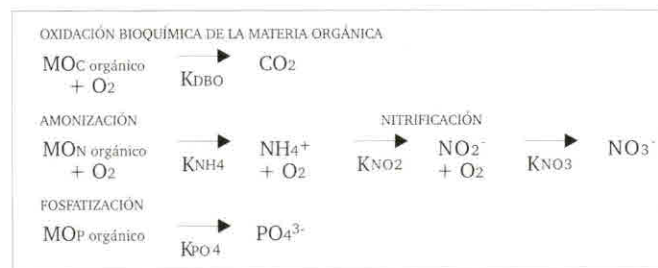
Tumaco; que como se dijo anteriormente son descritos por reacciones de primer orden; cada ecuación cinética posee una constante cinética (también llamada velocidad de reacción, rata o velocidad de cambio), que caracteriza el comportamiento del ecosistema. El verdadero conocimiento radica entonces, en poder determinar dichas constantes cinéticas que representen de forma correcta y permitan la futura modelación del ecosistema acuático ( $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NO}_2^-$ ,  $\text{NH}_4^+$  y  $\text{PO}_4^{3-}$  y OD, en nuestro caso).

## Descripción Teórica

La formulación de modelos matemáticos involucra un alto conocimiento del proceso objeto de modelación, este conocimiento requiere de la habilidad del investigador para poder representar el proceso como una expresión matemática (una ecuación o un grupo de ecuaciones). Los nutrientes son modelados usando un sistema de ecuaciones de balances de materia acoplados, cada ecuación que se genera obedece al balance del parámetro que se desea modelar, así en forma general:

$$\frac{d[S]}{dt} = \sum E_{\text{Entradas}} - \sum S_{\text{Salidas}} + \sum G_{\text{Generado}} - \sum C_{\text{Consumido}} \quad (1)$$

Donde S es cualquier constituyente no conservativo que se pretende balancear (OD,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NO}_2^-$ ,  $\text{NH}_4^+$  y  $\text{PO}_4^{3-}$  en nuestro caso). En el diagrama siguiente (fig 1), se representa el proceso de oxidación para la materia orgánica (MO).



**Figura 1**

Procesos de la oxidación bioquímica de la materia orgánica (MO). MON<sub>org</sub> y MOP<sub>org</sub> representan la MO, en forma de nitrógeno orgánico y de fósforo orgánico respectivamente.

La determinación de los parámetros cinéticos involucrados en el proceso de la oxidación bioquímica, se constituye en el objetivo principal de esta investigación.

Los resultados obtenidos permitirán contar con información necesaria para una futura modelación matemática de la calidad del agua en la Ensenada de Tumaco.

La cinética de la DBO es formulada como una ecuación de primer orden según la relación:

$$\frac{d[\text{DBO}_{\text{REM}}]}{dt} = -K_{\text{DBO}} [\text{DBO}_{\text{REM}}] \quad (2)$$

DBO<sub>REM</sub> = cantidad de DBO remanente, (materia orgánica no oxidada, mg/l)  
t = tiempo (días)  
K<sub>DBO</sub> = constante de desoxygenación (día<sup>-1</sup>) o velocidad de la DBO

Integrando se obtiene la ecuación para la DBO remanente:

$$\text{DBO}_{\text{REM}} = \text{DBO}_0 e^{-(K_{\text{DBO}} t)}; \text{DBO}_0 = \text{DBO última (materia orgánica total, mg/l)}.$$

En términos de la DBO ejercida;  $\text{DBO} = \text{DBO}_0 - \text{DBO}_{\text{REM}}$ .

$$\text{Entonces: } \text{DBO} = \text{DBO}_0 (1 - e^{-K_{\text{DBO}} t}) \quad (3)$$

Existen varios métodos para el cálculo de la constante cinética de la DBO, la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (US. EPA) enuncia nueve, de los cuales se escogieron dos por su facilidad y grado de exactitud, estos métodos seleccionados fueron: El método gráfico de Thomas, y el método logarítmico.

La cinética de los procesos de fosfatización y de amonización análogamente al de la oxidación bioquímica son descritos satisfactoriamente por una reacción de primer orden. Puesto que la fosfatización y la amonización de la materia orgánica son resultado de su oxidación bioquímica; puede establecerse como primera aproximación, que las velocidades de estos procesos deben ser próximas entre sí, es decir,  $K_{\text{NH}_4} \cong K_{\text{PO}_4} \cong K_{\text{DBO}}$ ; siempre y cuando los momentos de máximos valores para amonio y fósforo coincidan. Las velocidades de estos procesos pueden ser evaluadas como reacciones de primer orden con la formula:

$$C_t = C_0 \cdot e^{-K \cdot t} \quad (4)$$

Donde,

C<sub>0</sub> = concentración inicial de la especie química (N o P).

C<sub>t</sub> = concentración en el tiempo t.

K = velocidad específica del proceso bioquímico (día<sup>-1</sup>).

El proceso de nitrificación consiste en la oxidación del amoníaco a nitrato e involucra dos estadios de oxidación (fig 1); el cálculo de los parámetros cinéticos ( $K_{NO_2}$ ,  $K_{NO_3}$ ), envuelve expresiones más complejas, la solución simultánea de las ecuaciones del balance de materia (Ecuación N° 1), para cada una de las especies involucradas (Lonin, 1999); bajo condiciones experimentales y considerando que no hay asimilación o consumo por parte del fitoplancton en el proceso de fotosíntesis, se tiene:

$$\frac{d[MO_{NORG}]}{dt} = -K_{NH_4} [MO_{NORG}] \quad (5a)$$

$$\frac{d[NH_4^+]}{dt} = +K_{NH_4} [MO_{NORG}] - K_{NO_2} [NH_4^+] \quad (5b)$$

$$\frac{d[NO_2^-]}{dt} = +K_{NO_2} [NH_4^+] - K_{NO_3} [NO_2^-] \quad (5c)$$

$$\frac{d[NO_2^-]}{dt} = +K_{NO_2} [NH_4^+] - K_{NO_3} [NO_2^-] \quad (5d)$$

$$\frac{d[NO_3^-]}{dt} = K_{NO_3} [NO_2^-]$$

donde: [ ] : Representa la concentración de la especie,  
 $K_{NH_4}$ : Velocidad de regeneración del amonio (o cte. de amonización)  
 $K_{NO_2}$ : Velocidad de regeneración de los nitritos  
 $K_{NO_3}$ : Velocidad de regeneración de los nitratos

Como la solución de este sistema de ecuaciones es algo dispendioso para encontrar los valores de  $K_{NO_2}$  y  $K_{NO_3}$  a partir de los datos surgidos de la experimentación. Torres y Piermattey (1999) utilizaron ecuaciones más confortables para el cálculo de estas constantes, basándose en la información de los puntos máximos en las curvas cinéticas de los compuestos intermedios. Para esto se relacionan las concentraciones máximas alcanzadas por las sustancias con las constantes de velocidad:

$$K_{NO_3} = K_{NO_2} \frac{[NH_4^+]_{max NO_2}}{[NO_2^-]_{max}} \quad (6)$$

$$t_{max\_NH_4} = \frac{\ln(K_{NO_2}/K_{NH_4})}{K_{NO_2} - K_{NH_4}} \quad (7)$$

Donde:  
 $[NH_4^+]_{max NO_2}$  : Concentración del amonio en el momento de la máxima concentración de nitritos.  
 $[NO_2^-]_{max}$ : Máxima concentración de los nitritos.  
 $t_{max\_NH_4}$  : Tiempo en el que se alcanza la primera concentración máxima de amonio.

## Metodología

Se realizaron dos muestreos, el primero en marea alta y otro en marea baja, en dos estaciones de la Ensenada de Tumaco (La Caleta y Punta Laura, fig 2). La estación La Caleta está caracterizada por tener altas concentraciones de nutrientes y sólidos en suspensión; y la estación Punta Laura por tener concentraciones medias, (CCCP, Informe Final Ecopetrol 2000). Las muestras recolectadas en campo fueron transportadas al laboratorio donde se incubaron submuestras a una temperatura de 25°C y diariamente se hicieron determinaciones de nutrientes ( $NO_3^-$ ,  $NO_2^-$ ,  $NH_4^+$  y  $PO_4^{3-}$ ) y de DBO.

### Análisis de parámetros fisicoquímicos:

Los análisis de parámetros fisicoquímicos, se determinaron por métodos estandarizados (recopilados por STANDARD METHODS), que utilizan técnicas espectrofotométricas en el análisis de nutrientes, conductimétrica en el análisis de salinidad y potenciométrica para el pH. La transparencia se midió con el disco Secchi; los análisis de DBO se realizaron de acuerdo con la metodología aplicada en "STANDARD METHODS" determinando las concentraciones de OD por el método Winkler.

### Cálculo de las constantes cinéticas:

Método de Thomas para el cálculo de  $K_{DBO}$ :

El método de Thomas o método gráfico publicado por H. A. Thomas en 1950; aproxima la ecuación de la DBO, a la ecuación 8. La expansión en series de Tylor de las dos ecuaciones siguientes y su similitud hacen que la ecuación de la DBO (ecuación 2) pueda reescribirse como (8).

$$1 - e^{-K_{DBO}t} = K_{DBO}t \left[ 1 - \frac{K_{DBO}t}{2} + \frac{(K_{DBO}t)^2}{6} + \frac{(K_{DBO}t)^3}{24} + \dots \right]$$

$$\left[ 1 + \frac{K_{DBO}t}{6} \right]^{-3} = K_{DBO}t \left[ 1 - \frac{K_{DBO}t}{2} + \frac{(K_{DBO}t)^2}{6} + \frac{(K_{DBO}t)^3}{22} + \dots \right]$$

$$DBO = DBO_0 K_{DBO}t \left[ 1 + \frac{K_{DBO}t}{6} \right]^{-3} \quad (8)$$

Entonces si se tienen varios registros de DBO, medidos en diferentes días (t), podemos hacer una gráfica de  $(t/DBO)^{1/3}$  Vs (t) y obtener como intercepto  $(K_{DBO} DBO_0)^{-1/3}$  y como pendiente  $K_{DBO}^{2/3} / 6.DBO_0^{1/3}$ . Si estos dos términos se resuelven simultáneamente se pueden determinar los valores  $K_{DBO}$  y  $DBO_0$ . Fig 3.

Este método también ha sido usado por algunos investigadores norteamericanos para definir las constantes de nitrificación en el estuario de Potomac (Slayton y Trovato, 1978-1979).

**Método logarítmico para el cálculo de  $K_{DBO}$ :**

Este método propuesto por Orford e Ingram (1941) produce en algunos casos buenas aproximaciones del valor de  $K_{DBO}$ , pero en otros los resultados pueden diferir de los obtenidos por otros métodos (AINSA, 1986). El método logarítmico parte de la ecuación 3 que se deriva a:

$$\ln(r) = \ln(DBO_0 \cdot K_{DBO}) - K_{DBO} \cdot t$$

$$r = d(DBO)/dt \tag{9}$$

Graficando la ecuación anterior podemos obtener los valores de  $K_{DBO}$  y  $DBO_0$ . Fig 3

**Constantes de amonización y fosfatización:** puesto que estos procesos son resultado de la oxigenación bioquímica de la MO puede establecerse como primera aproximación, que las velocidades cinéticas deben ser similares entre sí, es decir,  $K_{NH4} \cong K_{PO4} \cong K_{DBO}$ . Además, la figura 4 muestra los momentos en que ocurrieron los máximos de fosfatos, concordando con los de amonio. Entonces para la muestra de agua de la Caleta del segundo muestreo,  $K_{DBO} = 0.08 = K_{NH4} = K_{PO4}$ .

**Constantes del proceso de nitrificación:**

El cálculo de estas velocidades cinéticas se realizó a partir de los datos experimentales, se utilizaron las ecuaciones 6 y 7; empleando los datos obtenidos en los análisis de nutrientes ( $NO_3^-$ ,  $NO_2^-$ ,  $NH_4^+$  y  $PO_4^{3-}$ ), se graficaron Concentraciones Vs. Tiempo con el fin de encontrar los puntos máximos y el momento en que estos ocurren. La figura 6 muestra la variación de estos parámetros con el tiempo.

Siguiendo con los cálculos para la muestra de la Caleta (2do muestreo), de la Tabla N° 1 se obtiene:

$$[NH_4^+]_{max\ NO_2} = 0.95 \text{ ug. at N/l}$$

$$[NO_2^-]_{max} = 3.76 \text{ ug. at N/l}$$

$$T_{max\_NH4} = 6 \text{ días.}$$

La ecuación 7 permite el cálculo de  $K_{NO_2}$ :

$$6 = \frac{\ln\left(\frac{K_{NO_2}}{0.08}\right)}{K_{NO_2} - 0.08}$$

La solución de esta ecuación se puede llevar a cabo por algún método numérico: bisección, Newton-Raphson o en forma más simple por el método gráfico; organizando la función en términos de  $K_{NO_2}$  y hallando los ceros, es decir, donde  $f(K_{NO_2})=0$ . (Fig5)

Determinado el valor de  $K_{NO_2}$  se utiliza la ecuación 6 para hallar el valor de  $K_{NO_3}$ .  $K_{NO_3} = 0.30 (0.95/3.76) = 0.075 \text{ día}^{-1}$ .

De forma análoga se determinan las constantes cinéticas para las muestras restantes de agua, empleando los datos de la tabla N° 1.

Muestra	$[NH_4^+]_{max\ NO_2}$	$[NO_2^-]_{max}$	$t_{max\_NH4}$
Pta. Laura (1er. Muestreo)	0.89	3.71	6
La Caleta (1er. Muestreo)	1.36	2.93	7
Pta. Laura (2do. Muestreo)	0.30	3.15	6
La Caleta (2do. Muestreo)	0.95	3.76	6

**Tabla 1**

Valores de  $[NH_4^+]_{max\ NO_2}$  en ug. at N/l;  $[NO_2^-]_{max}$  en ug. at N/l. y  $t_{max\_NH4}$  en días para las muestras de agua analizadas.

**Resultados**

A las muestras de agua recolectadas se les determinaron las constantes cinéticas para los procesos descritos siguiendo la metodología anteriormente enunciada, los valores obtenidos para las constantes cinéticas son presentados en la tabla siguiente.

Adicionalmente se muestran valores de parámetros fisicoquímicos como transparencia, pH y salinidad; para que los resultados aquí obtenidos puedan ser comparados con otros estudios, ya que continuamente las características del agua cambian a consecuencia de la marea o la época climática.

Para corroborar el grado de acercamiento a la realidad en la determinación de las constantes, se resolvió el conjunto de ecuaciones diferenciales obtenidos del balance de materia para cada componente analizado, así, la ecuación 2 describe el comportamiento teórico de la DBO y su solución analítica junto a los datos experimentales se muestran en la figura 6.

Los valores para la constante cinética de la DBO estuvieron entre 0.08 y 0.14 día<sup>-1</sup>, mostrando mayor diferencia entre estaciones para el primer muestreo (marea alta). Un estudio anterior realizado para las mismas estaciones (CCCP, Informe Calidad de Aguas, 1999), arrojó valores de  $K_{DBO}$  de 0,27 y 0,14 día<sup>-1</sup> y una  $DBO_0$  de 5,57 y 2,23 mg/l para la Caleta y Punta Laura respectivamente.

Estos procesos bioquímicos y sus velocidades cinéticas están estrechamente relacionados con la actividad bacteriana, es por eso, que factores como el pH y la salinidad juegan un papel importante en las variaciones de estas constantes. El aumento de la biomasa bacteriana está limitado a valores de pH favorables, en zonas como la desembocadura de los ríos este parámetro puede cambiar hora a hora con la marea, al igual que la salinidad, como consecuencia de la entrada de aguas oceánicas y al represamiento de las aguas de los ríos.

Es necesario adelantar nuevos estudios para entender las variaciones de estas constantes cinéticas en un mismo sitio de muestreo, además del pH y la salinidad, los sólidos suspendidos (SS) y el contenido de MO juegan otro papel, las altas concentraciones de SS (en especial durante los períodos de marea baja), proporcionan una buena condición para la vida de las bacterias (la parte orgánica como alimento y la inorgánica como soporte para la reproducción), de igual forma altas concentraciones de MO favorecen el aumento de bacterias hasta las concentraciones máximas posibles.

El agua de mar contiene poca concentración de MO y de bacterias, las aguas de ríos tienen mucha MO y SS por esta razón la biomasa de bacterias se encuentra cercana a su máximo. Cuando mucha materia orgánica entra al mar las bacterias se reproducen rápidamente lo que conduce a un cambio en la velocidad del proceso de oxidación de la materia orgánica.

En lo que respecta al proceso de nitrificación, el comportamiento teórico de las especies del nitrógeno supone un grado mayor de complejidad, es necesario resolver el sistema de ecuaciones provenientes del balance de materia (ecuaciones 5a-5d). La solución de este sistema de ecuaciones diferenciales de primer orden y de condiciones iniciales se realizó utilizando el método de Runge-Kutta de cuarto orden,

que se considera el de uso más popular (Nakamura, 1992), este método fue ejecutado a través de un programa en Basic, y sus resultados permitieron escribir el comportamiento teórico del proceso de nitrificación para las muestras de la Ensenada, los resultados se muestran en la figura 7.

Los valores obtenidos para la constante de regeneración de los nitritos,  $K_{NO_2}$ , estuvieron entre 0.14 y 0.30 día<sup>-1</sup>; y para la constante de regeneración de los nitratos,  $K_{NO_3}$ , entre 0.02 y 0.07 día<sup>-1</sup>. Este estudio sobre el proceso de nitrificación es nuevo para el Pacífico Colombiano, por lo cual se carece de información con que comparar.

En la Costa Atlántica para la Ciénaga de la Virgen se realizó un experimento similar, obteniendo valores de: 0.23, 0.09, y 0.44 día<sup>-1</sup> para las constantes  $K_{DBO}$ ,  $K_{NO_2}$  y  $K_{NO_3}$  respectivamente (Torres y Piermattey, 1999). Pero con la diferencia de ser un medio menos dinámico y con concentraciones mucho más altas de nutrientes y DBO en sus aguas.

Estudios realizados en latitudes superiores brindan valores de referencia; Slayton y Trovato (1978) encontraron velocidades de nitrificación entre 0.10-0.14 día<sup>-1</sup> para el estuario de Potomac; Bansal (1978) reportó valores para el estuario del río Delaware de: 0.09-0.054 día<sup>-1</sup>. Entre los pocos estudios en los cuales se determinan las velocidades de  $K_{NO_2}$  y  $K_{NO_3}$  para un estuario es el realizado por Brandes (1976) para la bahía de Texas los resultados estuvieron entre 0.05-0.2 y 0.2-0.5 respectivamente. Esto muestra que una constante cinética puede tener una gran variación de un sitio a otro, e incluso para una misma zona.

Por lo anterior, siendo la Ensenada de Tumaco un medio tan cambiante, para poder definir relaciones con estas constantes cinéticas, es necesario obtener mayor información, tratando de cubrir todos los tipos de aguas que se encuentran en la Ensenada (aguas salobres en el sector oriental, aguas con características oceánicas en la parte occidental, y toda la gama intermedia producto de las mezclas).

## Conclusiones

Los nutrientes como el nitrógeno y el fósforo son los mayores limitantes para el crecimiento del plancton, incluidos en los modelos de calidad de aguas; el nitrógeno es importante además, por el efecto que tiene la nitrificación sobre la dinámica del oxígeno disuelto y por el carácter tóxico que posee el amonio (no ionizado). Típicamente este proceso de nitrificación es simulado por una cinética de primer orden, como una simple etapa o una aproximación a dos etapas.

El OD también es una de los principales indicadores de la calidad del agua y por consiguiente uno de los módulos fundamentales de un modelo; así mismo, la oxidación de la MO y el consumo de DBO también se representa como reacción de primer orden, donde cada proceso posee sus constantes cinéticas específicas.

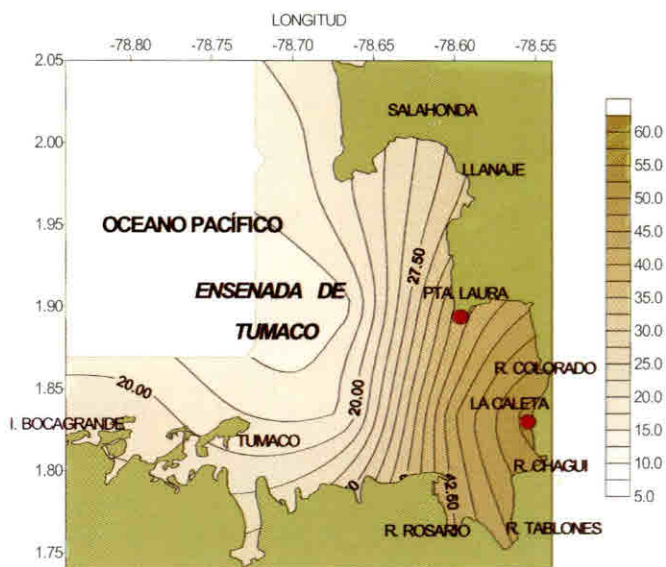
Para la evaluación de las constantes se hizo un seguimiento diario en submuestras incubadas a 25°C. Los experimentos arrojaron valores de  $K_{DBO}$  entre 0.08 y 0.14 día<sup>-1</sup>, que al ser comparados con resultados de un estudio anterior se encuentra que dicha velocidad varía como consecuencia de factores del medio marino (el pH y la salinidad) y el contenido de biomasa bacteriana.

Los valores obtenidos para  $K_{NO_2}$ , estuvieron entre 0.14 y 0.30 día<sup>-1</sup>; y para  $K_{NO_3}$ , entre 0.02 y 0.07 día<sup>-1</sup>. Estudios como este, sobre el proceso de nitrificación es nuevo para el Pacífico Colombiano, careciendo de información con la cual comparar, por esta razón, es necesario obtener más información tratando de cubrir todos los tipos de aguas que se encuentran en la Ensenada (aguas salobres en el sector oriental, aguas con características oceánicas en la parte occidental, y toda la gama intermedia producto de las mezclas).

Los resultados encontrados muestran correlación de los datos experimentales con las ecuaciones matemáticas sugeridas para la representación de los procesos de oxidación bioquímica de la MO y la nitrificación. La información generada en este estudio sirve como base para la futura modelación de la calidad del agua de la Ensenada, a través, de un modelo con parámetros experimentales que se ajustan al medio real.

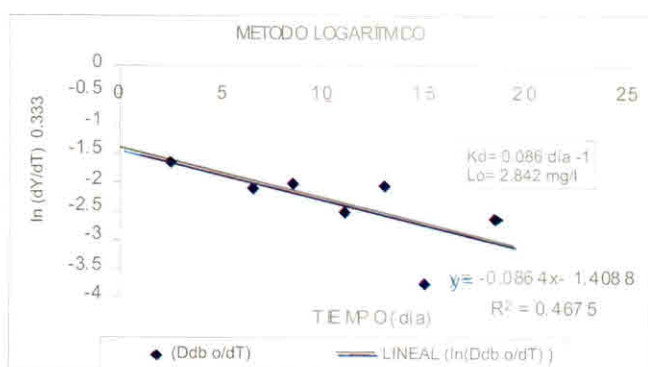
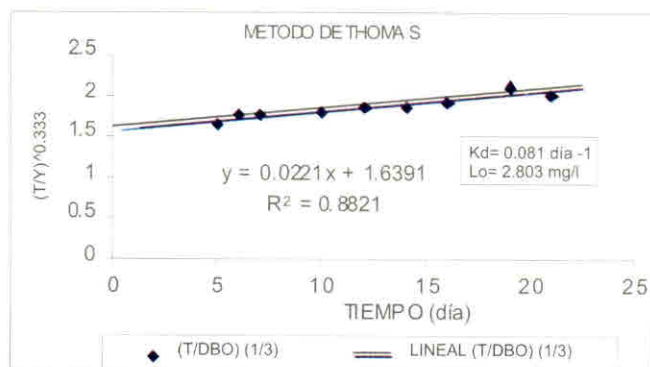
## Referencias

- AINSA. Caracterización y Pretratamiento de la Aguas Residuales Industriales. Medellín Colombia 1986
- INDERNA. Curso "Calidad del Agua y Modelación Matemática". Ambientec. Bogotá 1987.
- CARPENTER, EJ and CAPONE, D.G. Nitrogen in the Marine Environment. Academic Press Inc. New York, 1983.
- CCCP. Informe Proyecto Calidad de Aguas, CCCP, Tumaco. 1999.
- KIELY, G. Ingeniería Ambiental: Fundamentos, Entornos, Tecnologías y Sistemas de Gestión. Mc Graw-Hill, España. 1999.
- LONIN S.A. Modelo Hidrodinámico del CIOH y Cálculo de la Transparencia del agua en la Bahía de Cartagena, Boletín Científico CIOH, 1998.
- LONIN S.A, TUCHKOVENKO, y, GARAY. J. Utilización de los Métodos de Modelación Matemática para la Solución del problema de Eutroficación en la Bahía de Cartagena. Cartagena, CIOH, 1999.
- NAKAMURA, S. Métodos Numéricos Aplicados con Software. Prentice-Hall Hispanoamericana SA. México. 1992.
- STANDARD METHODS. For the Examination of Water and Wastewater. 15 ed. Donnelley & Sons Co. Boston, 1981.
- TORRES, L.E. y PIERMATTEY, J.H. Cinética de Procesos Químicos en la Ciénaga de La Virgen. Cartagena, CIOH 1999.
- US. EPA. Rates, Constans, and Kinetics Formulations in Surface Water Quality Modeling. 2 ed. Georgia. 1985.
- VOLLENWEIDER, R.A. Marine Coastal Eutrophication. Elsevier Science Publishers B. V. Netherlands, 1992.



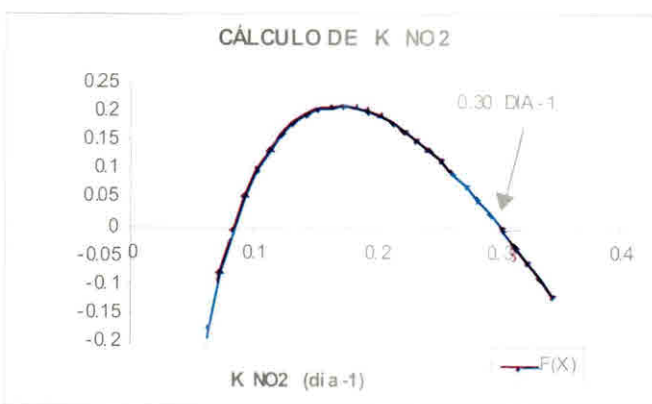
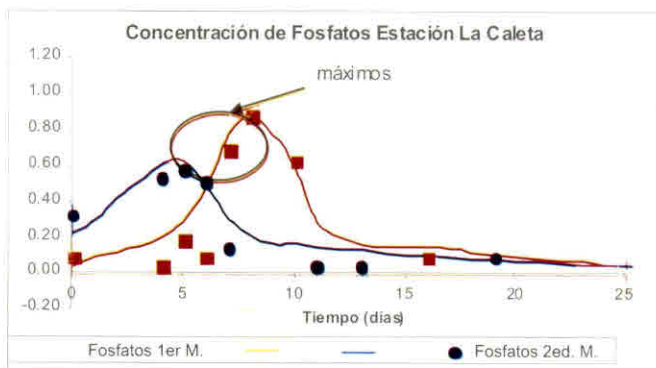
**Figura 2**

*Ubicación de las estaciones de muestreo. Las isolíneas representan la distribución espacial promedio de los sólidos suspendidos en aguas superficiales de la ensenada*



**Figura 3**

Aplicación del método de Thomas y Logarítmico para la muestra de agua de la Caleta recolectada durante el segundo muestreo



**Figura 4**

Proceso de fosfatización para las muestras de agua provenientes de la Caleta

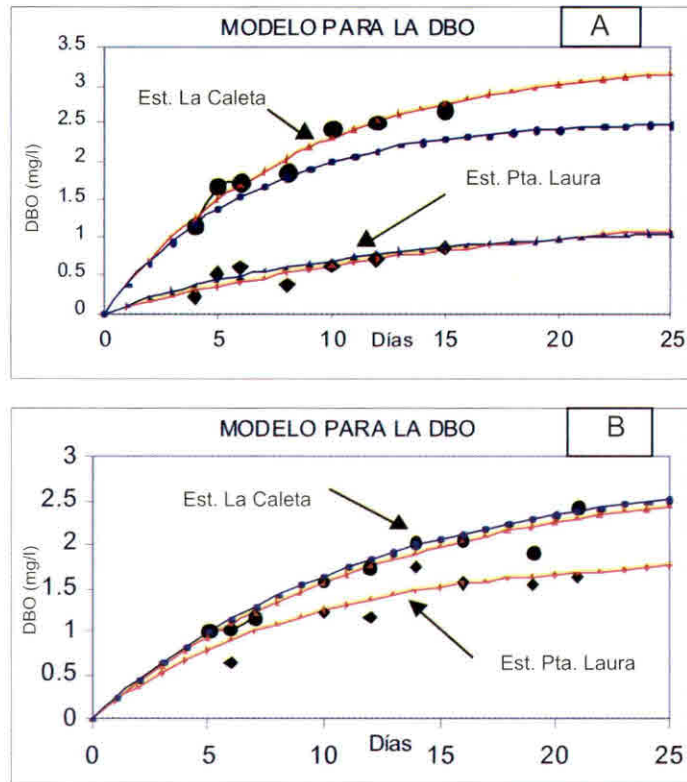
**Figura 5**

Cálculo de la constante de regeneración de los nitritos ( $K_{NO2}$ )

Muestra	Transparencia (cm)	pH	Salinidad (ups)	$K_{DBO}$ (día <sup>-1</sup> )	DBO última	$K_{PO4}$ (día <sup>-1</sup> )	$K_{NH4}$ (día <sup>-1</sup> )	$K_{NO2}$ (día <sup>-1</sup> )	$K_{NO3}$ (día <sup>-1</sup> )
Pta. Laura (1er. Muestreo)	50	8.05	-	0.08	1.30	0.08	0.08	0.30	0.07
La Caleta (1er. Muestreo)	30	7.98	-	0.14	2.94	0.14	0.14	0.145	0.07
Pta. Laura (2do. Muestreo)	40	7.99	29.2	0.11	1.86	0.11	0.11	0.24	0.02
La Caleta (2do. Muestreo)	27	7.21	19.9	0.08	2.82	0.08	0.08	0.30	0.075

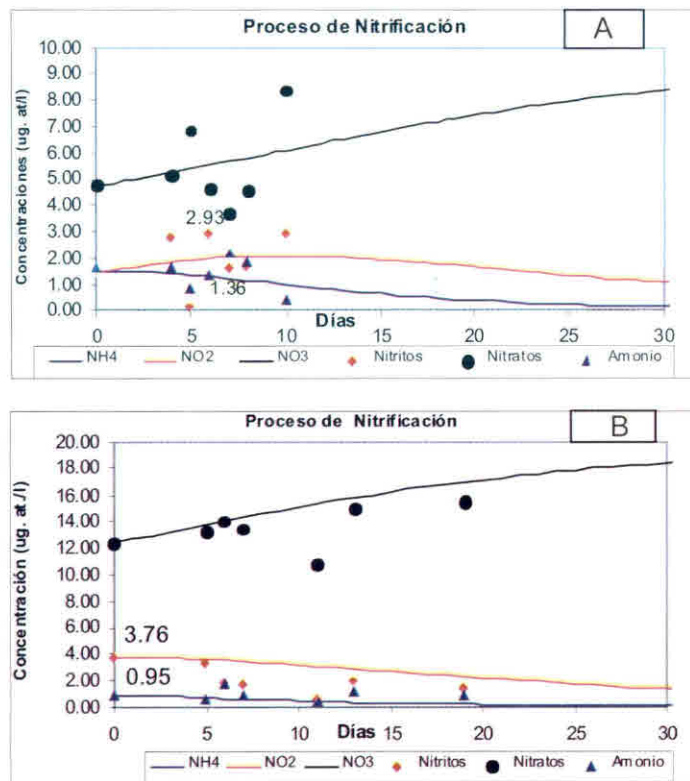
**Tabla 2**

Valores de constantes cinéticas para los procesos de oxidación bioquímica de la materia orgánica



**Figura 6**

Representación gráfica para el modelo de la DBO en la estación la Caleta  
 A) Marea alta (1er muestreo)  
 b) Marea baja (2do muestreo)  
 En rojo los resultados para el método de Thomas y en azul para el método logarítmico



**Figura 7**

Representación gráfica para el proceso de Nitrificación en la estación La Caleta,  
 A) Marea alta (1er muestreo) b) Marea baja (2do muestreo)