

Modelo fenomenológico para describir la capacidad de autodepuración de corrientes superficiales

Luis Santiago Quiroz Fernández

lquiroz@utm.edu.ec

Universidad Técnica de Manabí, Ecuador

Artículo Original

Elena Izquierdo Kulich

elenaik@fq.uh.edu.cu

Universidad de La Habana, Cuba

Carlos Menéndez Gutiérrez

carlosm@tesla.cujae.edu.cu

Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, Cujae, La Habana, Cuba

RESUMEN

En la actualidad, la conservación del medio ambiente es una necesidad y una obligación legal. Los ríos son unos de los recursos naturales más afectados por el crecimiento poblacional y el desarrollo industrial. En este contexto, es propuesto un modelo fenomenológico para estudiar la capacidad de autodepuración de los ríos. El modelo es un sistema de ecuaciones diferenciales, el cual describe el comportamiento del contaminante y las concentraciones de oxígeno con respecto a la distancia desde el punto de la descarga contaminante. La capacidad de autodepuración es identificada con la distancia donde la concentración contaminante puede considerarse despreciable y es predecible que esta capacidad decrezca con el flujo de agua del río y la carga contaminante.

Palabras claves: modelo matemático, fenomenológico, autodepuración, contaminante, corrientes superficiales

Recibido: 10 de junio del 2014 Aprobado: 17 de noviembre del 2014

INTRODUCCIÓN

La contaminación ambiental y sus efectos sobre la naturaleza y salud de los seres vivos es hoy, más que nunca, tema de atención prioritaria.

Los asentamientos humanos se han desarrollado históricamente en regiones cercanas a los ríos, con el objetivo de aprovechar el agua para consumo doméstico, industrial y agrícola [1,2]. Por otra parte, los ríos también han sido usados como vía de transportación y destino de los desechos orgánicos e inorgánicos generados por la población, lo que puede conllevar a grandes problemas de contaminación de estos. Por esta razón, en la actualidad,

se llevan a cabo numerosos estudios ambientales en busca de soluciones que permitan proteger en unos casos y recuperar en otros, estos recursos hídricos [3].

Al establecer las soluciones de protección o de saneamiento se debe tomar en cuenta la capacidad de autodepuración natural de la corriente receptora, para que esta pueda asimilar la carga contaminante y restituir la calidad del agua [4] utilizando la capacidad de recuperación de las propiedades iniciales o en condiciones cercanas a estas. En este contexto, se han desarrollado modelos matemáticos tales como el de Streeter- Phelps, Explore I, Qual2E, SWRRBQ (Simulator

for Water Resources in Rural Basins Water Quality), entre otros, que de acuerdo con su aplicación en los ríos objeto de estudio para estos modelos, permiten predecir el comportamiento de la concentración de contaminantes, tomando en consideración los mecanismos principales de transporte de estos y de depuración natural [5,6,7]. Dichos modelos también resultan útiles para establecer acciones para reducir la contaminación, estimar el impacto en el medio ambiente, proponer mejoras tecnológicas, así como desarrollar métodos y mecanismos de monitoreo, entre otros [8,9].

El río Portoviejo, localizado en la región central de la provincia de Manabí en Ecuador, drena un área aproximada de 2 060 km². Nace en la cordillera costanera a una altitud de 420 m snm y fluye a lo largo de 132 km de longitud hasta su desembocadura en el océano Pacífico. Esta es la corriente natural más importante de la zona, abasteciendo de agua potable y para riego agrícola a la mayor parte de la población de la región.

Entre los problemas ambientales más importantes que se han detectado en la cuenca del río Portoviejo se encuentra el deterioro de la calidad del agua por descargas de aguas residuales y vertimiento de desechos sólidos en diferentes puntos a lo largo de su cauce, que en algunas ocasiones pueden favorecer la propagación de virus y enfermedades bacterianas. Por esta causa, se hace necesario realizar un estudio relacionado con la identificación de las principales fuentes contaminantes y la capacidad de autodepuración de este río.

El objetivo del presente trabajo es proponer un modelo fenomenológico para describir el comportamiento de la demanda bioquímica de oxígeno (DBO), los sólidos suspendidos volátiles (SSV) y la concentración de oxígeno disuelto en el agua con respecto a la distancia del punto de vertimiento de una corriente de agua residual, que permita predecir la capacidad de autodepuración de una corriente. Este ha sido estructurado presentando primero el formalismo matemático aplicado para la obtención del modelo que se propone, posteriormente se analizan y discuten los resultados predichos por el modelo y, por último, se presentan las conclusiones.

OBTENCIÓN DEL MODELO

El río puede ser considerado como un canal rectangular uniforme de profundidad D y ancho W , donde z representa la distancia cualquiera con respecto al punto de vertimiento de un agua residual, como se muestra en la figura 1.

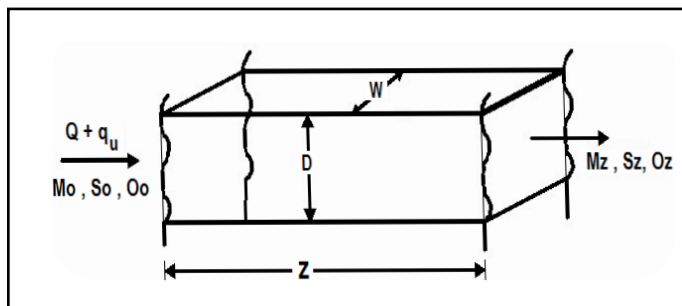


Fig. 1. Idealización de una sección de la corriente bajo estudio

Para describir este sistema se selecciona una distancia dz y se establecen las siguientes consideraciones:

1. La concentración total de biomasa en la sección se mide a través de los SSV, donde no se toma en cuenta el comportamiento de las especies individuales, ni de las interacciones que se establecen entre estas.

2. La concentración de contaminantes biodegradables se caracteriza de forma global a través de la DBO.

3. Existe un flux de entrada de oxígeno a través de la interface aire-agua.

4. La distancia dz es lo suficientemente pequeña como para considerar que existe mezcla completa de todos los componentes, de tal forma, que la concentración de cada especie dentro de esta región es igual a la concentración de salida de la misma.

5. La velocidad de reproducción de la biomasa (ν) se describe a través de la expresión cinética:

$$\nu = \mu \frac{S}{S + K_s} \frac{O}{O + K_o} \quad (1)$$

donde:

μ : Constante de velocidad de reproducción de los microorganismos [s^{-1}].

K_s : Constante de afinidad de los microorganismos por el sustrato [$kg\ m^{-3}$].

K_o : Constante de afinidad de los microorganismos por el oxígeno [$kg\ m^{-3}$].

S : Concentración de sustrato basada en DBO [$kg\ m^{-3}$].

O : Concentración de oxígeno disuelto en el agua [$kg\ m^{-3}$].

6. Se supone que $K_s \gg S$ y $K_o \gg O$, por lo tanto:

$$\mu = \nu / (K_s K_o) \quad (1.a)$$

A partir de las suposiciones establecidas y tomando en cuenta las leyes de conservación de la masa se obtiene el siguiente sistema de ecuaciones diferenciales temporales:

$$V \frac{dM_z}{dt} = \mu M_z S_z O_z V - b M_z V + Q M_0 - Q M_z$$

$$V \frac{dS_z}{dt} = -Y_s \mu M_z S_z O_z V + Q S_0 - Q S_z$$

$$V \frac{dO_z}{dt} = ha(O_0 - O_z) - Y_o \mu M_z S_z O_z V + Q O_0 - Q O_z$$

$$M_z(0) = M_{t=0}$$

$$S_z(0) = S_{t=0}$$

$$O_z(0) = O_{t=0} \quad (2)$$

donde:

Q : Caudal del río [$m^3\ s^{-1}$].

V : Volumen del sistema considerado ($DWdz$) [m^3].

b : Constante de velocidad de muerte endógena de los microorganismos [s^{-1}].

Y_s : Coeficiente de rendimiento sustrato/microorganismos [kgs /kgm].

Y_o : Coeficiente de rendimiento oxígeno/microorganismos [kgo /kgm].

M_z : Concentración de microorganismos (SSV) con respecto a la distancia [kgm⁻³].

S_z : Concentración de DBO con respecto a la distancia [kgm⁻³].

O_z : Concentración de oxígeno disuelto con respecto a la distancia [kgom⁻³].

h : Coeficiente de transferencia de masa del oxígeno en la interface aire-agua de área $a = Wdz$ [m s⁻¹].

Si se considera el estado estacionario, entonces las derivadas temporales que aparecen en el lado izquierdo de la ecuación (2) se hacen igual a cero, de tal forma que dividiendo por $DWdz$, se obtiene:

$$\begin{aligned} 0 &= \mu M_z S_z O_z - b M_z + \frac{Q}{DW} \frac{(M_0 - M_z)}{dz} \\ 0 &= -Y_s \mu M_z S_z O_z + \frac{Q}{DW} \frac{(S_0 - S_z)}{dz} \\ 0 &= \frac{h}{D} (O_0 - O_z) - Y_o \mu M_z S_z O_z + \frac{Q}{DW} \frac{(O_0 - O_z)}{dz} \end{aligned} \quad (3)$$

Aplicando el límite cuando $dz \rightarrow 0$ se obtiene el sistema de ecuaciones diferenciales con respecto a z :

$$\begin{aligned} \frac{Q}{DW} \frac{dM_z}{dz} &= \mu M_z S_z O_z - b M_z \\ \frac{Q}{DW} \frac{dS_z}{dz} &= -Y_s \mu M_z S_z O_z \\ \frac{Q}{DW} \frac{dO_z}{dz} &= \frac{h}{D} (O_0 - O_z) - Y_o \mu M_z S_z O_z \end{aligned} \quad (4)$$

Definiendo las variables adimensionales:

$$\alpha = \frac{M_z}{M_0}, \beta = \frac{S_z}{S_0}, \gamma = \frac{O_z}{O_0}, l = \frac{z}{L} \quad (5)$$

donde:

M_0 : Concentración de SSV en el punto de vertimiento del residual.

S_0 : Concentración de DBO en el punto de vertimiento del residual.

O_0 : Concentración de oxígeno en el punto de vertimiento del residual.

L : Longitud del río que se quiere evaluar.

Entonces la ecuación (4) puede ser reescrita como:

$$\frac{d\alpha}{dl} = \varphi_1 \alpha \beta \gamma - \varphi_2 \alpha$$

$$\frac{d\beta}{dl} = -\varphi_3 \alpha \beta \gamma$$

$$\frac{d\gamma}{dl} = \varphi_4 (1 - \gamma) - \varphi_5 \alpha \beta \gamma$$

$$\alpha(0) = 1$$

$$\beta(0) = 1$$

$$\gamma(0) = 1$$

(6)

donde se han definido los siguientes parámetros adimensionales:

$$\varphi_1 = \frac{\mu L D W O_0 S_0}{Q}; \varphi_2 = \frac{b L D W}{Q}$$

$$\varphi_3 = \frac{\mu L D W M_0 O_0 Y_s}{Q}$$

$$\varphi_4 = \frac{h L W}{Q}; \varphi_5 = \frac{\mu L D W M_0 S_0 Y_o}{Q} \quad (7)$$

Los valores de concentración de DBO y SSV, respectivamente, en el punto de vertimiento, se evalúan mediante un balance de masa en estado estacionario en el punto de mezcla del agua residual con el caudal del río, obteniéndose:

$$M_0 = \frac{m_v q_v}{Q + q_v}$$

$$S_0 = \frac{s_v q_v}{Q + q_v}$$

$$q = Q + q_v$$

(8)

donde:

q_v : Caudal de vertimiento del residual.

m_v : Concentración de SSV en el vertimiento del residual.

s_v : Concentración de DBO en el vertimiento del residual.

q : Caudal total.

El sistema de ecuaciones diferenciales no lineales (6) representa el modelo del sistema, y describe el comportamiento de la concentración de contaminantes y del oxígeno disuelto en función de la distancia, por lo que su solución permite predecir la capacidad de autodepuración del río, que en este trabajo se identifica con la distancia que existe entre el punto de vertimiento del residual y el punto en el cual se aprecia una concentración de contaminantes despreciable. El mismo no tiene solución analítica exacta, siendo necesaria la aplicación de métodos numéricos de solución. En este caso se empleó el método de Runge Kutta - Fehlberg de cuarto orden.

RESULTADOS PREDICHOS POR EL MODELO

Como se indicó inicialmente se contempla una corriente superficial en la que se transporta un caudal producido por sus cuencas y subcuencas aportantes, en este caso tomado como ejemplo el río Portoviejo y también considerando los caudales de aporte por vertimiento de aguas residuales. En las figuras 2a), b) y c) se muestran los resultados predichos por el modelo en relación con el comportamiento de la DBO (S_z/S_o), los SSV (M_z/M_o) y el O (O_z/O_o) con respecto a la distancia para dos valores de caudal del río. En este caso se aprecia que, a una misma distancia, el valor de la DBO, los SSV y el O es menor para el caudal más bajo, lo cual indica que la capacidad de autodepuración disminuye cuando se incrementa el caudal.

Suele considerarse que un incremento de caudal disminuye la contaminación, sin embargo, esto es cierto solo en el punto de mezcla de la corriente del río con la del vertimiento, ya que el tiempo de residencia de los microorganismos en el río disminuye y, por lo tanto, la acción biológica de estos es menos efectiva, conllevando un incremento de la distancia para la cual se aprecia una recuperación parcial del recurso hídrico [10]. Esto se evidencia en la vida diaria cuando, en las playas cercanas a la desembocadura de los ríos, se incrementa significativamente la turbidez en épocas de lluvia.

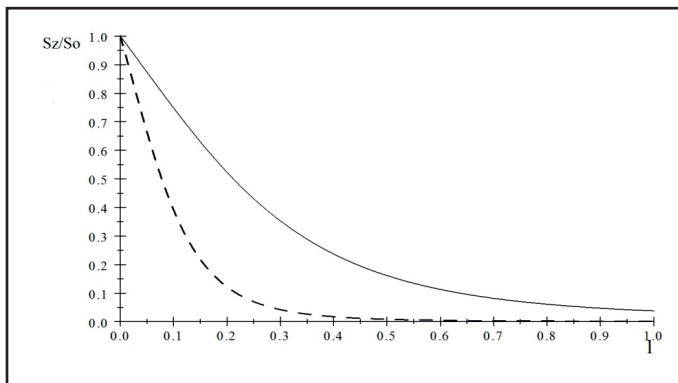


Fig. 2 a). Predicción del comportamiento de la concentración de S_z/S_o con respecto a la distancia. La línea sólida corresponde a un mayor caudal del río

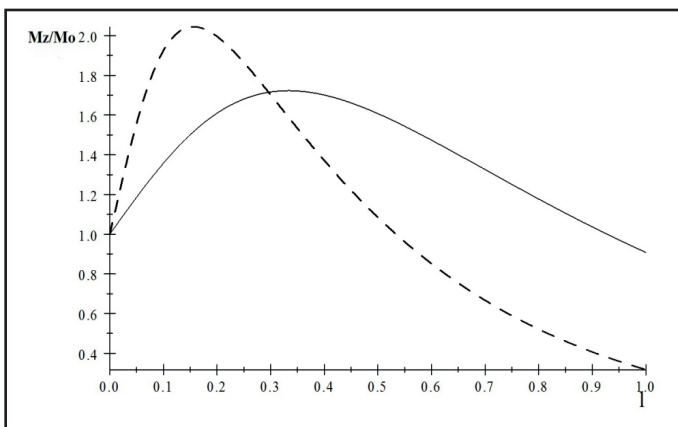


Fig. 2 b). Predicción del comportamiento de la concentración de M_z/M_o con respecto a la distancia. La línea sólida corresponde a un mayor caudal del río

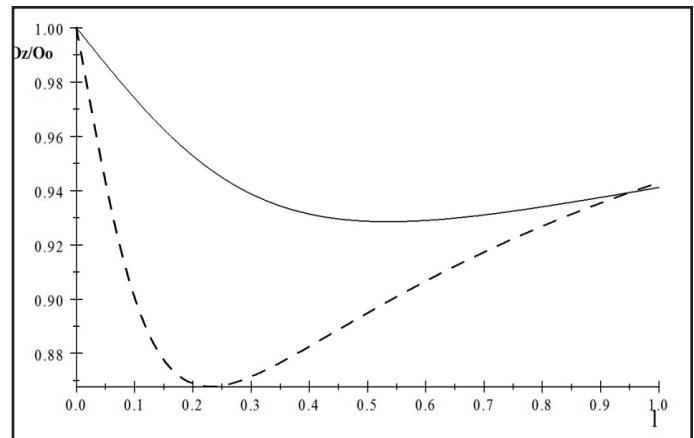


Fig. 2 c). Predicción del comportamiento de la concentración de O_z/O_o con respecto a la distancia. La línea sólida corresponde a un mayor caudal del río

En las figuras 3a), b) y c), se muestran los resultados predichos por el modelo en relación con el comportamiento de M_z/M_o , los S_z/S_o y O_z/O_o con respecto a la distancia para dos valores distintos de concentración de carga contaminante en el caudal de vertimiento. En este caso se observa que, a una misma distancia, el valor de los SSV es mayor para la concentración más alta, mientras que la DBO es menor. En relación con la concentración de oxígeno, se observa que esta también disminuye cuando se incrementa la carga, lo que indica una menor capacidad de autodepuración. En este caso la disminución de la concentración de DBO no compensa el incremento que existe en los SSV, los cuales también son considerados contaminantes.

Estos comportamientos predichos se corresponden con las observaciones experimentales, las cuales indican que el incremento en la carga de DBO del vertimiento incrementa la contaminación del río. Aunque no se encuentran argumentos para rechazar el modelo, es importante señalar que el mismo presenta limitaciones relacionadas con las suposiciones que fueron establecidas para su obtención.

En este sentido, no se toma en cuenta el comportamiento a altas concentraciones de DBO, para las cuales deja de cumplirse una relación lineal entre la velocidad de reproducción de los microorganismos y la concentración de sustrato, no se consideran las fluctuaciones que tienen lugar en el valor del caudal del río ni en el caudal y concentración del vertimiento y se requiere del conocimiento de parámetros tales como la velocidad de reproducción y muerte de los microorganismos, los coeficientes de rendimiento sustrato/microorganismo y otros para poder realizar predicciones dimensionales. Estas limitaciones, no obstante, pueden ser superadas en trabajos futuros.

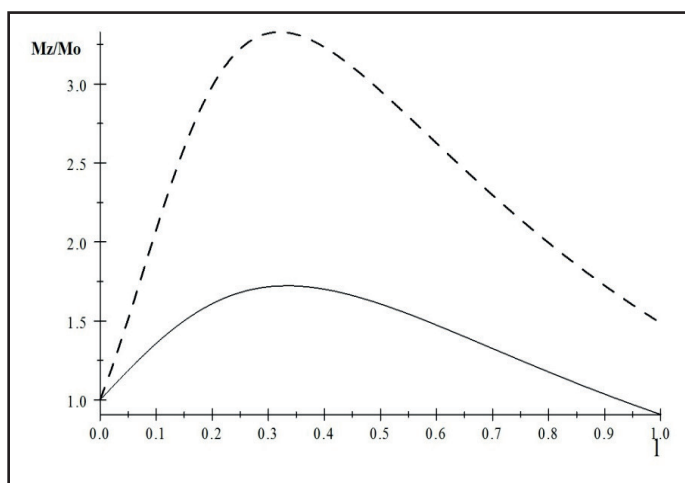


Fig. 3 a). Predicción del comportamiento de la concentración de M_z / M_o con respecto a la distancia. La línea sólida corresponde a una carga contaminante menor

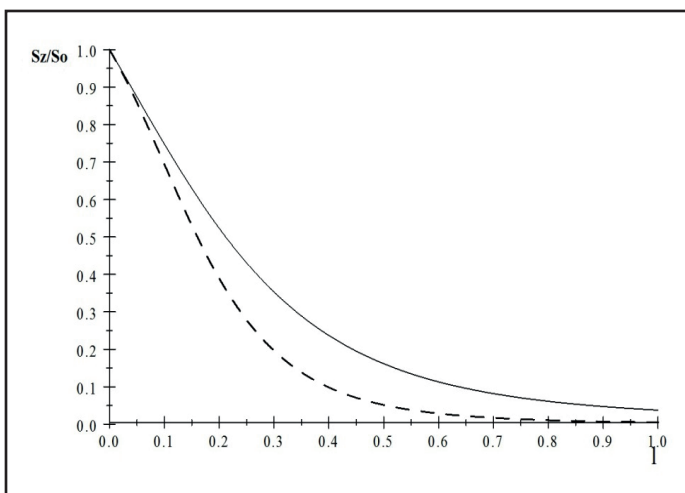


Fig. 3 b). Predicción del comportamiento de la concentración de S_z / S_o con respecto a la distancia. La línea sólida corresponde a una carga contaminante menor

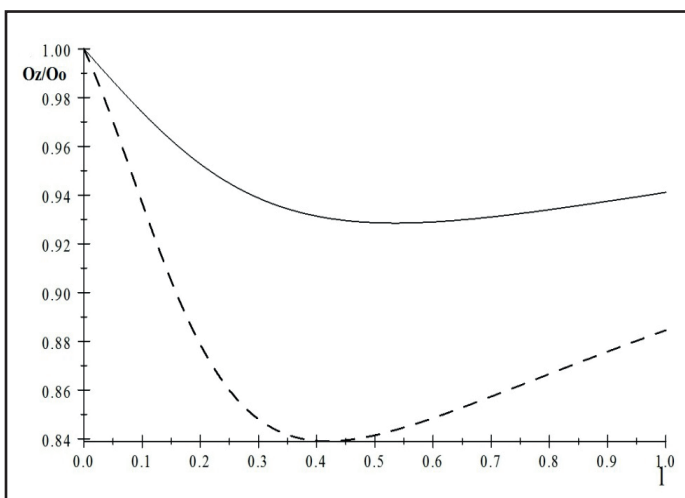


Fig. 3 c). Predicción del comportamiento de la concentración de O_z / O_o con respecto a la distancia. La línea sólida corresponde a una carga contaminante menor

CONCLUSIONES

A partir de visualizar el comportamiento ambiental de los recursos hídricos y las principales fuentes de contaminación de estos, se plantea un sistema de ecuaciones diferenciales espaciales que describen de acuerdo con los parámetros considerados la capacidad de autodepuración de los ríos, tomando como referencia la concentración de contaminantes y el oxígeno disuelto en función de la distancia.

Este formalismo matemático se puede aplicar para analizar la capacidad de autodepuración de los ríos de acuerdo con los distintos caudales de flujo, los caudales de vertimiento de los residuales y las variaciones de la concentración de carga contaminante, así como puede ser utilizado para identificar cuáles son los puntos de vertimiento que contribuyen más significativamente a su contaminación. En particular se recomienda su aplicación para el estudio del río Portoviejo.

En los resultados simulados por el modelo se puede observar el comportamiento de la DBO, los SSV y el O para, a través de estas variables, conocer la distancia con respecto al punto del vertimiento en que la corriente superficial se puede considerar prácticamente autodepurada y/o el nivel de recuperación que se puede alcanzar. Esta información puede ser utilizada para proponer alternativas de tratamiento a los residuales vertidos y establecer medidas para la reducción de la contaminación.

REFERENCIAS

1. SEIDELSON, Craig. "Commissioning an Industrial Waste Water Treatment System in China". *International Journal of Latest Research in Science and Technology*. Julio-agosto 2012, vol.1. núm.2, pp.76-79. ISSN: 2278-5299. Disponible en Web: http://www.mnkjournals.com/ijlrst_files/download/Vol%201%20Issue%202/3-325-2-Craig.pdf [consultado abril 2014].
2. HERNÁNDEZ ROSSIE, Armando; MACÍAS GONZÁLEZ, José. *Saneamiento ambiental y protección de corrientes*. La Habana, Cuba: Editorial Félix Varela, 2003, pp. 77-174 pp. ISBN: 959-258-475-3.
3. BAIG, Shams Ali; XINXUA, Xu; et al. "Pakistan's drinking water and environmental sanitation status in post 2010 flood scenario: Humanitarian response and community needs". *Journal of Applied Sciences in Environmental Sanitation*. Marzo 2012, vol.7. núm.1, pp. 49-54. ISSN: 0126-2807. Disponible en Web: <https://www.trisanita.org/jases/asespaper2012/ases07v7n1y2012.pdf> [consultado mayo 2014].
4. MARIUS, Daniel Roman; MIRCEA, Vlad Muresan. "Analysis of oxygen requirements and transfer efficiency in a wastewater treatment plant". *International Journal of Latest Research in Science and Technology*. Marzo-abril 2014, vol. 3. núm.2, pp.30-33. ISSN: 2278-5299. Disponible en Web: http://www.mnkjournals.com/ijlrst_files/Download/Vol%203%20Issue%202/6-

- 23-11042014%20ANALYSIS%20OF%20OXYGEN%20REQUIREMENTS%20AND%20TRANSFER%20EFFICIENCY%20IN%20A%20WASTEWATER%20TREATMENT%20PLANT.pdf [consultado junio 2014].
5. **KACHIASHVILI, K.; GORDEZIANI, D.; LAZAROV, R.; MELIKDZHANIAN, D.** "Modeling and simulation of pollutants transport in rivers". *Applied Mathematical Modelling*, 2007, vol. 31, núm. 7, pp.1371-1396. ISSN: 0307-904X. Disponible en Web: http://ac.els-cdn.com/S0307904X06001041/1-s2.0-S0307904X06001041-main.pdf?_tid=6b7c006c-6970-11e4-88b2-00000aab0f6b&acdnat=1415689408_c5987df16fa6058feaf230221bf6a46f [consultado mayo 2014].
6. **BORAH, D.; BERA, M.** "Watershed-scale hydrologic and nonpoint-source pollution models: Review of mathematical bases". *American Society of Agricultural Engineers*. 2003, vol. 46, pp. 1553- 1566. ISSN: 0001-2351. Disponible en Web: <http://www.isws.illinois.edu/iswsdocs/journals/TransASAE46-6-1553-1566.pdf> [consultado abril 2014].
7. **ABERA, Salomon; ZEYINUDIN, Ahmed et al.** "Bacteriological analysis of drinking water source". *African Journal of Microbiology Research*. Septiembre 2011, vol.5. núm. 8, pp. 2638-2641. ISSN: 1996-0808. Disponible en Web: <http://www.academicjournals.org/journal/AJMR/article-abstract/17535DA12621>[consultado mayo 2014].
8. **TRENTO, A.** "Reseña sobre modelos unidireccionales de calidad de aguas en ríos". *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*. Octubre–diciembre 2001, vol. 6. núm. 4, pp. 175- 183. ISSN 2318-0331. Disponible en Web: <https://www.abrh.org.br/sgc3/UserFiles/>
9. **FISCHER, Hugo; LIST, John.** "Mixing in inland and coastal waters", *Academic Press*, New York, 1979. ISBN: 978-0-08-051177-1.
10. **SUBARNA, Dadang; YANUAR, Purwanto; MURTILAKSONO, Kuku; WIWEKA.** "The relationship between monthly rainfall and elevation in the Cisangkuy Watershed Bandung Regency". *International Journal of Latest Research in Science and Technology*. Marzo-abril 2014, vol.3. núm.2, pp. 55-60. ISSN: 2278 - 5299 Disponible en Web: http://www.mnkjournals.com/ijlrst_files/download/Vol%203%20Issue%202/11-4-08032014%20The%20Relationship%20Between%20Monthly%20Rainfall%20and%20Elevation%20in%20the%20Cisangkuy%20Watershed%20Bandung%20Regency.pdf [consultado mayo 2014].

AUTORES

Luis Santiago Quiroz Fernández

Ingeniero Civil, Magíster en Administración Ambiental, Profesor, Escuela de Ingeniería Civil, Universidad Técnica de Manabí, Ecuador

Elena Izquierdo Kulich

Ingeniera Química, Doctora en Ciencias Técnicas, Profesora Titular, Facultad de Química, Universidad de La Habana, Cuba

Carlos Menéndez Gutiérrez

Ingeniero Químico, Especialidad en Ingeniería Bioquímica, Doctor en Ciencias Técnicas, Profesor Titular y Consultante, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, Cujae, La Habana, Cuba

Phenomenological Model to Describe the Self-Purification Capacity of Surface Currents

Abstract

Nowadays the environment conservation is a necessity and a legal obligation. Rivers are one of the most affected natural resources because of the growth in population and industrial development. In this context, a phenomenological model to study the self-purification capacity of rivers is proposed. The model is a system of differential equations, which describe the behavior of pollutant and oxygen concentrations with respect to the distance from the point of waste discharge. The capacity of self-purification is identified with the distance where the contaminant concentration can be considered neglected and it is predicted that this capacity decreased with the river water flow and contaminant load.

Key words: mathematical model, phenomenological, self-purification, pollutant, surface currents