

# ANÁLISIS DE CONTAMINACIÓN Y MODELAMIENTO DE O.D. Y MATERIA ORGÁNICA. RÍO PUYO

Leo Rodríguez Badillo<sup>1</sup>, Oliva Atiaga Franco<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Universidad Estatal Amazónica y Maestrante MSGA Escuela Politécnica del Ejército

<sup>2</sup>Escuela Politécnica del Ejército. Departamento de Ciencias de la Tierra

lmrodriguez@gmail.com, olatiaga@espe.edu.ec

## Resumen

Se realizó un estudio de la calidad del agua en el curso medio-alto del Río Puyo, Provincia de Pastaza en el cual se determinaron parámetros físico-químicos como pH, temperatura, oxígeno disuelto (OD) y materia orgánica (DBO). Los objetivos específicos plantearon identificar los principales afluentes que incorporan materia orgánica al río, determinar el caudal en ocho puntos de muestreo, evaluar la calidad del agua del río con base a los parámetros mencionados y finalmente, realizar un modelamiento de la variación de OD y DBO. Para llevar a cabo el trabajo se posicionaron los puntos de muestreo y afluentes, se determinó el caudal del río en los ocho puntos mediante la fórmula de Manning, se realizaron análisis fisicoquímicos de muestras compuestas y se aplicó el modelo de Streeter y Phelps. Los resultados de análisis y modelación de materia orgánica establecieron diferencias entre dos tramos del río, encontrándose en el primero condiciones aceptables para el desarrollo de biota acuática y uso humano recreativo, en tanto que en el segundo las mismas se mostraron notablemente afectadas, con procesos de autodepuración parcial al final del recorrido. Los resultados del análisis y modelación de oxígeno disuelto por su parte, demostraron una tendencia bastante uniforme en la cual el parámetro se mantiene dentro de niveles aceptables para uso recreativo y conservación de flora y fauna, sin que su concentración o saturación constituyan un factor crítico en las condiciones de calidad de agua.

**Palabras clave:** Ríos, calidad de agua, oxígeno, demanda bioquímica, modelo de Streeter-Phelps

## Abstract

A water quality study was carried out at the middle-high course of Puyo River, Pastaza province, including physical and chemical parameters determination, including pH, temperature, dissolved oxygen (DO) and organic matter (BOD), with performing a modeling for the last two. Specific objectives were to identify main tributaries that incorporate organic matter into the river, to determine river flow in eight points on five different dates, evaluating the water quality based on the two parameters mentioned and perform a variation modeling of them. To carry out the work identified the study area an tributaries by direct observation and georeferencing, determined the flow of the river in the eight points by Manning formula, performed physicochemical analyzes from composite samples, and applied the Streeter-Phelps model. Field and modeling organic matter results settled differences between two sections of the river in the first of which is determined acceptable conditions for the development of aquatic biota and human recreational use while the second was a considerable alteration of them, with partial self-purification processes at the end. The results of analysis and modeling of dissolved oxygen show a relatively uniform trend in which the parameter is kept within acceptable levels for recreational use and flora and fauna conservation, without its saturation or concentration constitutes a critical factor in water quality conditions.

**Keywords:** Rivers, water quality, oxygen, biochemical demand, Streeter-Phelps model

## **I. INTRODUCCIÓN**

El río Puyo es un cauce hídrico permanente, tributario de la margen izquierda del río Pastaza. Alcanza una longitud de aproximadamente 37 km y conforma una subcuenca que abarca aproximadamente 370 km<sup>2</sup> y en sus márgenes se asientan la ciudad de Puyo y otros centros poblados cuyas descargas líquidas han deteriorado la aptitud del recurso para consumo humano, pecuario y recreativo, así como las condiciones necesarias para la preservación de flora y fauna. Este problema se ha incrementado debido a una rápida expansión urbanística y a la falta de adopción de medidas de tratamiento de las aguas residuales generadas. Por estos motivos, se justifica la realización de estudios que contribuyan al diagnóstico y caracterización de la problemática que faciliten la implementación de estrategias de recuperación y aprovechamiento racional del río.

El análisis y modelamiento de la calidad del agua en un medio receptor es una práctica de ingeniería ambiental muy común en los últimos años debido a la necesidad que reviste para la sociedad moderna la preservación de los recursos hídricos (PETRONI, 2000). Uno de los primeros modelos desarrollados para predecir los efectos de la descarga de material orgánico biodegradable sobre el oxígeno disuelto de un río o corriente de agua fue el modelo matemático de Streeter-Phelps (VALDEZ y VAZQUEZ, 2003), el mismo que se ha aplicado en varios estudios relacionados con la calidad de agua de cursos hídricos, como los desarrollados por CARRERA y ATIAGA (2011) y DOMÍNGUEZ (2005). Adicionalmente, ha dado origen además a algunos modelos derivados.

El modelo de Streeter-Phelps determina la evolución que sufre la materia orgánica biodegradable vertida en un punto de un río y la concentración de oxígeno disuelto que se deriva de ello. El modelo se desarrolla en estado estacionario, por lo que se asume que todas las características del vertido y del río permanecen constantes con el tiempo. Se trata de un modelo básico porque la materia orgánica es considerada como un único elemento y el oxígeno disuelto sólo depende de la reaireación superficial y del consumo bacteriano derivado de la degradación de dicha materia orgánica (UNIVERSITAT POLITECNICA DE VALENCIA. 2009).

Tomando como base el Modelo de Streeter-Phelps se desarrolló el presente trabajo, proponiéndose como objetivo general, el realizar un análisis de la contaminación del agua en el curso medio-alto del Río Puyo (entre las poblaciones de Fátima y Unión Base, provincia de Pastaza) mediante el modelamiento de dos parámetros físico químicos y, como objetivos específicos, planteó identificar los principales afluentes que incorporan materia orgánica contaminante al segmento, determinar el caudal del Río Puyo en ocho puntos en cinco fechas distintas, evaluar la calidad del agua en los mismos en base a dos parámetros físico-químicos y realizar un modelamiento de la variación de la calidad de agua considerando el aporte de los afluentes identificados.

## **II. METODOLOGÍA**

El estudio se realizó en un tramo del río Puyo de 15.8 km, comprendido entre la parroquia Fátima y la población de Unión Base, el mismo que fue elegido para su análisis por encontrarse sometido a mayor densidad de población y por consiguiente a un mayor impacto ambiental. El trabajo comprendió una recopilación de información secundaria respecto a indicadores demográficos, urbanísticos, meteorológicos y

socioeconómicos, identificación de aspectos físicos, afluentes y actividades humanas desarrolladas en las márgenes, medición de parámetros hidrológicos y análisis y modelación de parámetros de calidad de agua.

Las actividades de campo partieron de la selección de ocho puntos de muestreo a lo largo del río y en la desembocadura de los afluentes identificados. En ellos se midió el ancho, profundidades y pendientes. Con la información obtenida, se estimó los caudales mediante la fórmula de Manning, eligiéndose este método de acuerdo a la rugosidad relativa del cauce (DOCAMPO 1999). El caudal en cada punto se determinó mediante el producto entre el área transversal y la velocidad superficial del fluido.

En los puntos de muestreo seleccionados, se realizó un análisis de 40 muestras combinadas, a razón de cinco por punto del río y una por afluente. Las muestras fueron extraídas en cinco fechas distintas entre el 16 de mayo y el 17 de agosto de 2012 e incluyeron 10 sub-muestras por muestra combinada. Las muestras fueron enviadas para su análisis al Centro de Estudios, Servicios y Transferencia Tecnológica Ambiental (CESTTA) en la ciudad de Riobamba. En el análisis de laboratorio se determinó la concentración de Oxígeno Disuelto (OD) y de Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO<sub>5</sub>) mediante las normas APHA 4500-O C y 46 APHA 5210 B, respectivamente. Los valores promedio obtenidos, además de ser analizados individualmente, permitieron el modelamiento de materia orgánica y oxígeno disuelto para el tramo estudiado. Las ecuaciones aplicadas para la modelación de cada parámetro se presentan a continuación:

#### a. Materia Orgánica

Se consideró un modelo de reacción que supone la variación de la concentración de materia orgánica en función del tiempo. Para el efecto, fue necesario determinar la constante cinética “k” mediante la ecuación de primer orden (2), despejada a su vez de la Ecuación (1), la misma que además permitió determinar la DBO<sub>U</sub> en cada punto.

$$DBO_U = \frac{DBO_t}{(1 - e^{-kt})} \quad (1)$$

$$C = C_0 (e^{-k \cdot x/v}) \quad (2)$$

Dónde: DBO<sub>t</sub> = Materia orgánica en un punto establecido (mg/L); DBO<sub>U</sub> = DBO carbonácea última o total (mg/L); k = Constante cinética (días<sup>-1</sup>); t = tiempo (días); C = DBO<sub>5</sub> en un punto establecido (mg/L); C<sub>0</sub> = Materia orgánica en un punto inicial anterior (mg/L); x = Recorrido o desplazamiento desde el punto inicial (km); v = velocidad del fluido (km/día)

Con los datos obtenidos en los procedimientos previos, se procedió a la modelación de la concentración de materia orgánica mediante la Ecuación (2) considerando balances de masa en cada afluente con la Ecuación (3), tomada de CRITES y TCHOBANOGLIOUS (2000)

$$C = \frac{C_r Q_r + C_a Q_a}{Q_r + Q_a} \quad (3)$$

Donde: C = Concentración resultante (mg/L); Cr = Concentración en el río principal (mg/L); Ca = Concentración en el afluente (mg/L); Qr = Caudal del río principal (mg/L); Qa = Caudal del afluente (mg/L).

## b. Oxígeno Disuelto

Para realizar la modelación del consumo de oxígeno se determinó previamente la concentración de saturación del oxígeno disuelto en el agua para lo cual se utilizó las ecuaciones 4, 5 y 6 (ROMERO, 2010). Con los valores obtenidos, se calculó el déficit de oxígeno inicial con el que se aplicaría el modelo en cada punto (Ecuación 7), donde:  $OD_{S,1atm}$  = Oxígeno Disuelto de saturación a 1 Atm (mg/L);  $OD_S$  = oxígeno Disuelto de saturación corregido (mg/L); OD = Oxígeno Disuelto medido en cada punto (mg/L); E = Elevación (m.s.n.m.); P = Presión (mmHg); T = Temperatura (en °C);  $D_o$  = Déficit inicial de oxígeno disuelto (mg/L).

$$OD_{S,1atm} = 14.652 - 0.41T + 0.008 T^2 - 0.000078 T^3 \quad (4)$$

$$P = 760 e^{-E/8.005} \quad (5)$$

$$OD_{SC} = OD_S (P/760) \quad (6)$$

$$D_o = OD_S - OD \quad (7)$$

La constante de reaireación ( $k_a$ ) necesaria para medir la velocidad a la que el oxígeno presente en la atmósfera es transferido a los cuerpos de agua, se obtuvo mediante la ecuación empírica (8), propuesta por O'Connor y Dobbins y citada en CHIN (2013), donde:  $K_a$  = Constante de reaireación (días<sup>-1</sup>); V = Velocidad (m/s) H = Profundidad media (m)

$$K_a = 3.93 \times \frac{V^{1/2}}{H^{3/2}} \quad (8)$$

Con los resultados anteriores, valores de campo y valores obtenidos de la modelación de materia orgánica, se desarrolló el modelo para Oxígeno Disuelto expresado en función del déficit (Ecuación 9) y la concentración modelada (Ecuación 10), donde: C = Concentración de OD modelado (mg/L);  $D_o$  = Déficit Inicial (mg/L); D = Déficit modelado (mg/L); kd = Constante cinética de primer orden (días<sup>-1</sup>);  $k_a$  = Constante de reaireación (días<sup>-1</sup>);  $L_o$  = Concentración inicial de materia orgánica (mg/L);  $OD_S$  = Oxígeno Disuelto de saturación corregido (mg/L)

$$D = \frac{k}{K_a - k} (e^{-k} - e^{-k_a}) L_o + D_o \times e^{-k_a t} \quad (9)$$

$$C = OD_S - D \quad (10)$$

Adicionalmente, en la modelación se consideraron ajustes debido a la acción de los afluentes, para lo cual se realizaron balances de masa en cada desembocadura, considerando al igual que para materia orgánica, la Ecuación (3) considerando los déficit modelados del río y los déficit medidos de los afluentes, llevando a cabo un proceso de tipo “modelación-balance-modelación”.

### III. RESULTADOS

En la Tabla 1 y Figura 1 se presentan los puntos de control elegidos a lo largo del cauce del río Puyo en los cuales se recolectó la información de campo y se realizó la modelación de oxígeno y materia orgánica, así como los seis principales afluentes identificados en este tramo.

**TABLA 1.** Ubicación Geográfica de los puntos de control en el Río Puyo. 2012.

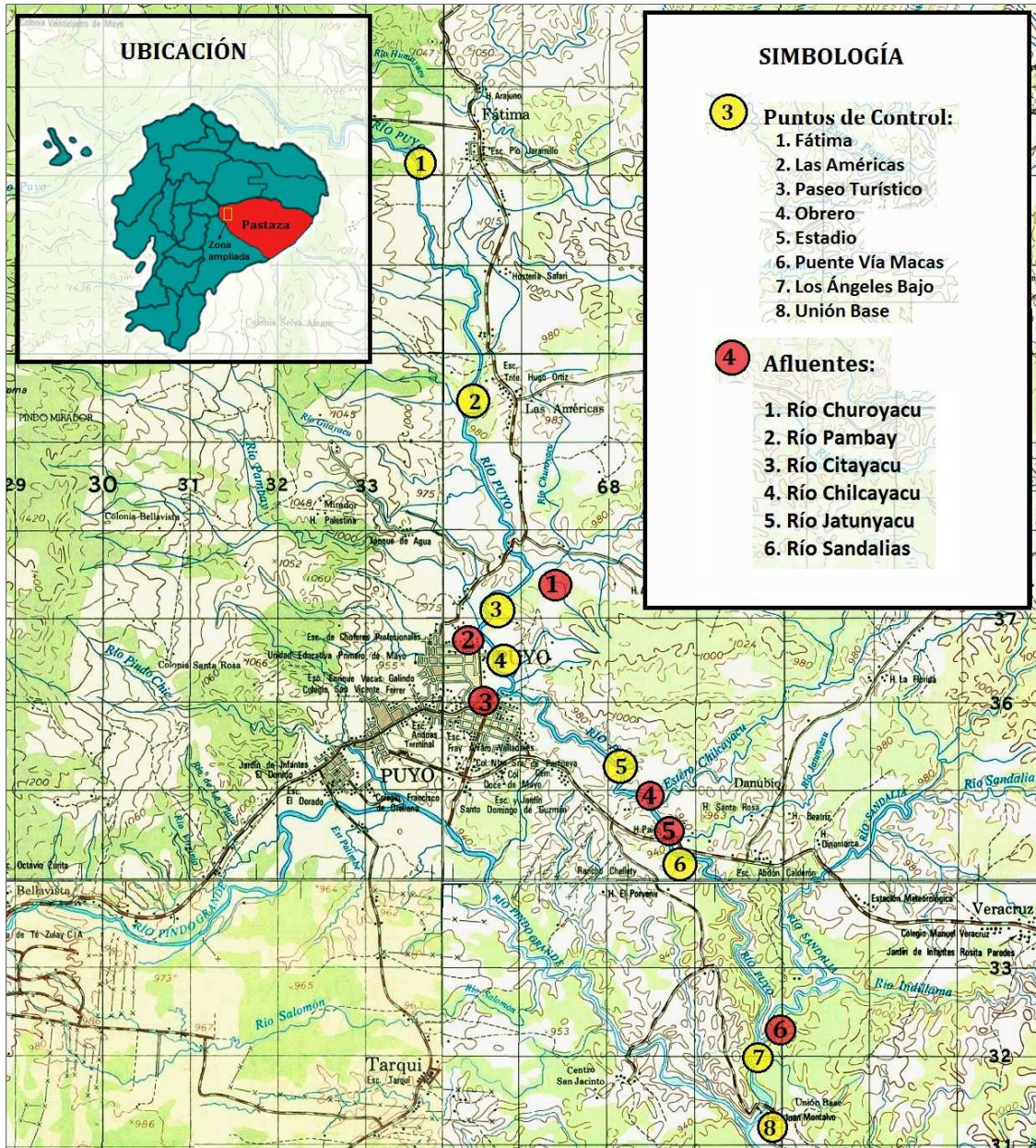
Punto Nº	Denominación	COORDENADAS		Altitud (m.s.n.m.)	Recorrido en km
		E	N		
<b>Puntos de control en el Río Puyo</b>					
1	Fátima	833358	9842296	1003.0	0.0
2	Puente Las Américas	166511	9839750	948.5	3.3
3	Paseo Turístico	166585	9837094	930.4	7.0
4	Malecón (B. Obrero)	166589	9836762	928.3	7.6
5	Estadio	167791	9835504	925.5	9.7
6	Puente Vía Macas	168713	9834426	923.5	12.0
7	Sandalias	169651	9832038	895.2	15.1
8	Unión Base Bajo	169758	9831392	885.1	15.8
<b>Puntos de control afluentes</b>					
a1	Río Churoyacu	166525	9840064	935	6.7
a2	Río Pambay	166910	9837185	929	7.2
a3	Río Citayacu	166309	9837659	927	7.9
a4	Río Chilcayacu	166476	9835867	924	11.6
a5	Río Jatunyacu	168493	9834112	924	11.9
a6	Río Sandalias	168493	9834135	896	15.0

#### A. Aspectos climáticos, demográficos y de vivienda

El área de estudio presenta temperaturas máximas de 31.0 °C y las mínimas 8,6 °C, registrándose un promedio de 20,3 °C con una humedad atmosférica promedio anual del 89%. INAMHI (2012). Geográficamente, el área de estudio se encuentra situada a lo largo de tres parroquias del cantón Pastaza en la provincia del mismo nombre. De acuerdo al INEC (2010), estas parroquias abarcaban una población de 39280 habitantes en ese año, de las cuales 36.659 personas habitaban en la ciudad de Puyo, mientras que los 2621 restantes residían en las otras dos parroquias.

En el año 2010 existían 10 190 viviendas habitadas en las parroquias señaladas, de las cuales el 94 % se encontraba en la parroquia urbana (INEC, 2010). En ellas, el abastecimiento de agua para consumo humano es obtenido a partir de tomas de captación situadas en las áreas altas y no intervenidas de la subcuenca con una cobertura del 85 – 90% de la urbe (EMAPAST, 2012). El servicio de alcantarillado por su parte, cubre el 74.47% del área urbana y el 25% del área rural. En estas, la eliminación de aguas residuales se dirige a pozos sépticos, pozos ciegos y en un porcentaje importante (8,5%) a los cursos hídricos, (INEC, 2010).





**Figura 1.** Ubicación de los puntos de control en el Río Puyo y afluentes. 2012.  
Fuente cartográfica: IGM (2011)

## B. Caudales y parámetros hidrológicos

Los caudales y otros parámetros hidrológicos del Río Puyo y afluentes, se presentan en la Tabla 2, en la que puede observarse que a lo largo de los 16 km de recorrido, el caudal aumenta aproximadamente en 18 m<sup>3</sup>/s. Este incremento se debe al aporte de los afluentes naturales y a la infiltración de aguas subterráneas.

**TABLA 2.** Parámetros hidrológicos en los puntos de control del Río Puyo y sus principales afluentes. 2012

Punto N°	Denominación	Ancho (m)	Profundidad media (m)	Área Mojada (m <sup>2</sup> )	Velocidad media (m/s)	Caudal (m <sup>3</sup> /s)
1	Fátima	13.31	0.71	4.67	0.69	3.26
2	Puente Las Américas	12.66	0.71	5.33	0.70	3.77
3	Paseo Turístico	17.76	0.91	7.83	0.78	6.13
4	Malecón (B. Obrero)	18.00	0.76	7.50	1.17	8.92
5	Estadio	18.61	1.07	9.39	1.12	10.67
6	Puente Vía Macas	35.90	0.79	13.62	0.91	12.51
7	Sandalias	47.75	0.85	20.48	0.88	18.08
8	Unión Base	37.91	1.06	22.99	0.82	21.10
a1	Río Churoyacu	9.4	1.24	4.56	0.29	1.33
a2	Río Pambay	11.7	0.92	7.00	0.30	2.10
a3	Río Citayacu	6.87	1.27	5.74	0.15	0.86
a4	Río Chilcayacu	13.4	1.14	3.60	0.46	1.65
a5	Río Sandalias	18.8	1.05	10.11	0.48	4.82

### C. Calidad de agua (OD y DBO<sub>5</sub>)

Los valores promedio obtenidos para los parámetros Oxígeno Disuelto (OD) y Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO<sub>5</sub>) se presentan en la Tabla 3. En el parámetro OD los valores presentan una tendencia irregular sin superar los 7.08 mg/l en promedio. El mayor valor promedio se presenta entre el km. 12.5 y el km. 16 del recorrido (7.55 mg/L) posiblemente a causa de dilución originada por afluentes provenientes de áreas poco pobladas y a las condiciones de autodepuración del río.

En los valores de DBO<sub>5</sub> puede observarse una tendencia prácticamente estable entre las poblaciones de Fátima y el puente del km 2 1/2 de la vía a Napo. La tendencia empieza a crecer a partir de este punto hasta llegar al punto de control N°5 “Estadio” (3.6 mg/L) a causa del aporte de descargas líquidas por algunos afluentes. Posterior a este punto, la tendencia decrece hasta los 3 mg/l en la población de Unión Base.

En el caso de los afluentes, destaca el río Citayacu, ya que a pesar de su bajo caudal aporta a las aguas del cuerpo receptor concentraciones elevadas de OD y DBO<sub>5</sub> y significativamente diferentes a las presentes en aquellas. Es así que en este cuerpo hídrico se observan promedios de 19 mg/L para DBO<sub>5</sub> y 1 mg/L de Oxígeno Disuelto, los cuales ocurren a causa de las descargas provenientes de viviendas y lavadoras de vehículos que van hacia el afluente. Tal es así que la apariencia de las aguas en el Río Puyo cambia de una manera significativamente visible en un recorrido de aproximadamente 100 m luego de la desembocadura del Citayacu.

**TABLA 3.** Concentraciones promedio de Temperatura, pH, Oxígeno Disuelto y Demanda Bioquímica de oxígeno en los puntos de control del Río Puyo y sus principales afluentes. 2012

Punto N°	Denominación	Recorrido Acumulado (km)	Temperatura promedio (°C)	pH promedio	OD promedio (mg/L)	DBO <sub>5</sub> promedio (mg/L)
1	Fátima	0.0	19.37	6.94	7.01	2.68
2	P. Las Américas	3.3	19.55	6.98	6.90	3.00
3	Paseo Turístico	7.0	20.35	7.16	6.89	3.40
4	Malecón B. Obrero	7.6	19.88	7.06	6.82	3.04
5	Estadio	9.7	20.73	6.94	7.08	3.60
6	Puente Vía Macas	12.0	20.55	6.96	6.90	3.12
7	Sandalías	15.1	20.45	7.01	7.55	3.00
8	Unión Base Bajo	15.8	20.82	6.61	7.06	2.60
a1	Río Churoyacu	6.4	20.70	6.48	7.44	4.00
a2	Río Pambay	7.2	19.80	6.40	5.79	2.50
a3	Río Citayacu	7.9	22.80	6.68	1.00	19.00
a4	Río Chilcayacu	11.4	20.40	6.70	7.92	3.00
a5	Río Jatunyacu	11.8	21.40	6.72	7.28	4.00
a6	Río Sandalias	14.9	20.30	6.82	8.57	3.00

#### D. Modelación de materia orgánica

Los resultados del cálculo de la DBO<sub>U</sub>, previos a la modelación de materia orgánica en cada punto se presentan en la Tabla 4, a partir de información recopilada para el parámetro DBO<sub>5</sub>. Para el cálculo se debió establecer inicialmente una constante k de 0.96 días<sup>-1</sup> determinada a partir de la aplicación de la Ecuación 2 en los distintos puntos de control del río y eligiendo el valor más representativo para las condiciones del mismo, de la siguiente manera:

$$C = C_0 (e^{-k \cdot x/v})$$

$$k = \frac{\ln(C_0/C)}{x/v}$$

$$k = \frac{\ln(3.0/3.12)}{3.1 \text{ km} / (76.03 \text{ km/día})}$$

$$k = 0.96 \text{ días}^{-1} \text{ (para el Punto 7: Sandalias)}$$

La aplicación del modelo para materia orgánica y balance de masa en desembocadura de afluentes conforme a las Ecuaciones (2) y (3) se presenta en la Tabla 5 y su tendencia se representa en la Figura 2.



**TABLA 4.** Resultados promedio de la DBO<sub>5</sub> medida y de la DBO<sub>U</sub>(L) calculada en 8 puntos del Río Puyo y sus afluentes

Punto N°	Denominación	DBO <sub>5</sub> (promedio) (mg/L)	L (DBO <sub>U</sub> ) (mg/L)
1	Fátima	2.68	2.70
2	Puente Las Américas	3.00	3.03
3	Paseo Turístico	3.40	3.43
4	Malecón (Barrio Obrero)	3.04	3.07
5	Estadio	3.60	3.63
6	Puente Vía Macas	3.12	3.15
7	Sandalías bajo	3.00	3.03
8	Unión Base Bajo	2.60	2.62
a1	Río Churoyacu	4.00	4.04
a2	Río Pambay	4.00	4.04
a3	Río Citayacu	19.00	21.97
a4	Río Chilcayacu	3.00	3.03
a5	Río Sandalias	3.00	3.03

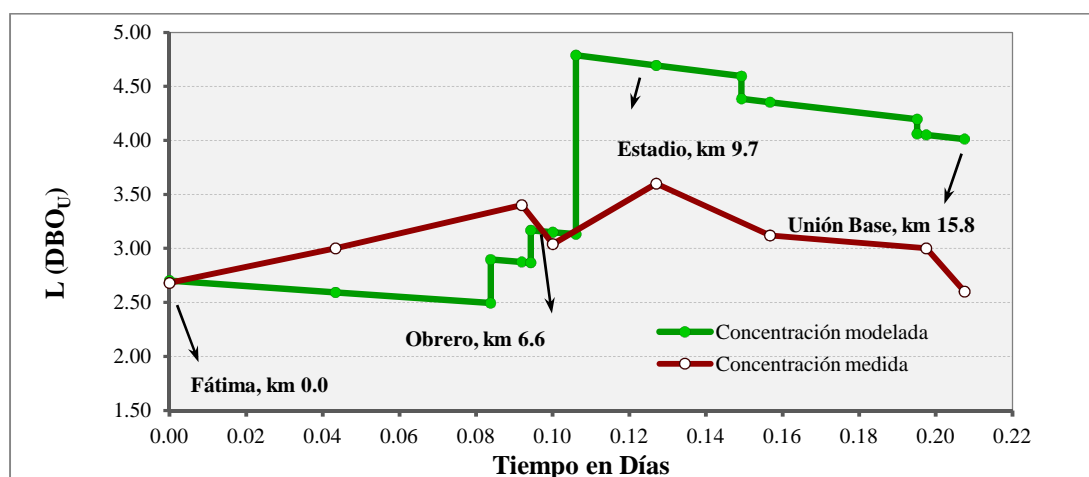
Los valores modelados para la concentración de materia orgánica oscilan entre 2.49 y 4.79 mg/L, variando por consiguiente, la calidad de agua. De acuerdo a la clasificación del sistema sapróbico citada en ROMERO (2010) y fundamentada en la medida de la materia orgánica biodegradable remanente en determinado punto de un río y su influencia en la biota acuática existente, se puede inferir la existencia de una zona *oligosapróbica* (con escasa materia saprobica), comprendida entre los km 1 y 6.4 (Puntos 1 y 3) en las cuales la baja concentración de materia orgánica favorece el desarrollo de vida acuática (además del uso humano recreativo) y una zona de *β-mesosapróbica* (con contenido moderado de materia saprobica), comprendida entre los 6.4 km y el fin del tramo estudiado, en la que vida acuática puede desarrollarse con ciertos desequilibrios y cuenta con importante presencia de bacterias y hongos.

La conformación física del río, con abundancia de puntos de flujo acelerado permite asumir que existirán condiciones de oxigenación capaces de degradar la materia orgánica de manera que mientras la concentración de L alcanza su mayor valor luego de la desembocadura del Río Citayacu con 4.79 mg/L, en el punto final (Unión Base, km. 15.8) esta concentración disminuiría teóricamente hasta un valor de 4.01 mg/L. A pesar de esto, la materia orgánica aportada por los afluentes de la zona urbana no podría ser degradada en su totalidad hasta el final del tramo estudiado.

Al comparar los resultados de la modelación con los valores de DBO<sub>5</sub> medidos en el terreno (Figura 2) se encuentran diferencias en torno a las concentraciones a partir de la segunda mitad del tramo estudiado. Esto puede deberse a factores de dilución como pequeños afluentes, percolados del suelo o precipitaciones no consideradas en el proceso de modelamiento. Sin embargo su tendencia decreciente se asemeja en términos de pendiente.

**TABLA 5.** Resultados de la L modelada en función de la distancia recorrida

Puntos N°	Denominación	Operación	Recorrido Acumulado (km)	Tiempo (días)	Lo Terreno (mg/L)	L Modelada (DBO <sub>5</sub> ) (mg/L)
1	Fátima		0.0	0.000	2.70	2.70
2	Puente Las Américas	Degradación	3.3	0.043	3.03	2.59
r1	Río Puyo	Degradación	6.4	0.084		2.49
a1	Río Churoyacu	Balance	6.4	0.084	4.04	2.90
3	Paseo Turístico	Degradación	7.0	0.092	3.43	2.87
r2	Río Puyo	Degradación	7.2	0.094		2.87
a2	Río Pambay	Balance	7.2	0.094	4.04	3.17
4	Malecón (B. Obrero)	Degradación	7.6	0.100	3.07	3.15
r3	Río Puyo	Degradación	8.1	0.106		3.13
a3	Río Citayacu	Balance	8.1	0.106	21.97	4.79
5	Estadio	Degradación	9.7	0.127	3.63	4.69
r4	Río Puyo	Degradación	11.4	0.149		4.59
a4	Río Chilcayacu	Balance	11.4	0.149	3.03	4.39
6	Puente Vía Macas	Degradación	12.0	0.157	3.15	4.35
r5	Río Puyo	Degradación	14.9	0.195		4.20
a5	Río Sandalias	Balance	14.9	0.195	3.03	4.06
7	Sandalías Bajo	Degradación	15.1	0.198	3.03	4.05
8	Unión Base	Degradación	15.8	0.208	2.62	4.01
V =	<b>0.88 m/s</b>	* En fondo blanco (1, 2, 3...): Puntos de muestreo en el Río Puyo; En fondo verde (r1, r2, r3): Estimaciones en puntos previos a desembocaduras de afluentes; En fondo café (a1, a2, a3): Afluentes				
k =	<b>0.96 días<sup>-1</sup></b>					



**Figura 2.** Concentración de materia orgánica modelada y medida (DBO<sub>5</sub>), en el tramo medio del Río Puyo

### E. Modelación de Oxígeno Disuelto

Los valores determinados para oxígeno de saturación (Ecuaciones 4,5 y 6), así como el déficit inicial de oxígeno (determinado mediante la Ecuación 7), se presentan en la Tabla 6. Estos valores precedieron a la aplicación del modelo de oxígeno disuelto (Tabla 7 y Figura 3) para el cual se consideró una constante de reaireación ( $k_a$ ) de 4.80 días<sup>-1</sup>, obtenida como promedio de la aplicación de la Ecuación 8 en cada punto.

Los valores modelados presentan una tendencia uniforme y casi invariable en la cual la concentración de OD se incrementa desde 7.1 mg/L hasta 9.42 mg/L en el punto final del tramo modelado, incremento que puede deberse a la relativa disminución en la aportación de materia orgánica oxidable mientras continúan los procesos de oxigenación en el río. Adicionalmente, la concentración de oxígeno nunca decae por debajo de los 5.5 mg/L manteniéndose dentro de los límites asumidos por el TULAS (2004) como admisibles para la preservación de la flora y fauna en aguas dulces.

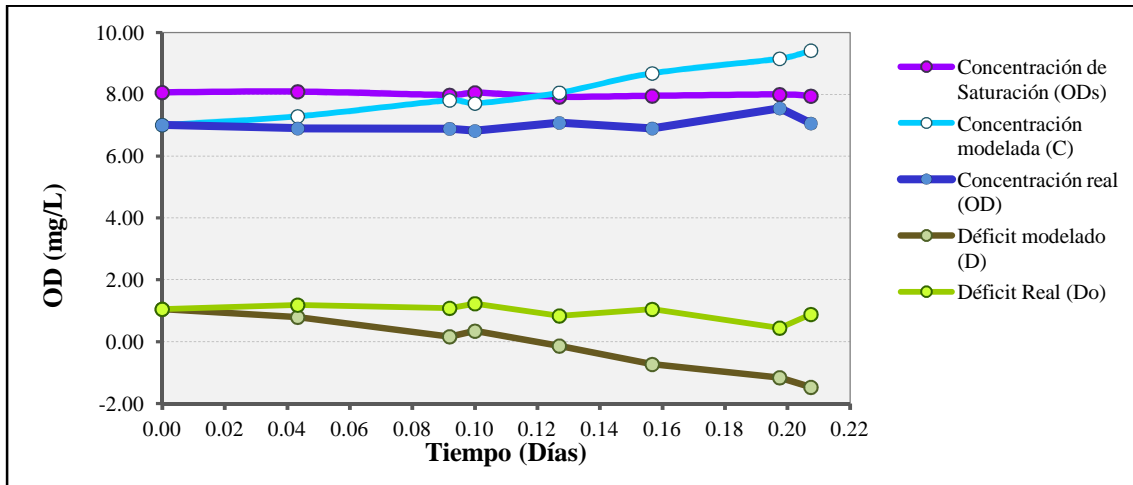
**TABLA 6.** Resultados de concentraciones de saturación ( $OD_s$ ) y déficit inicial en ocho puntos del río Puyo y cinco afluentes.

Punto N°	Denominación	Altitud (m.s.n.m)	Temperatura promedio (°C)	ODS•1atm (mg/L)	Presión (mmHg)	OD <sub>s</sub> (mg/L)	OD (mg/L)	D <sub>o</sub> (mg/L)
1	Fátima	1003	19.37	9.14	670.50	8.06	7.01	1.05
2	P. Las Américas	948.5	19.55	9.11	675.08	8.09	6.90	1.19
3	Paseo Turístico	930.4	20.35	8.96	676.61	7.97	6.89	1.08
4	Malecón	928.3	19.88	9.04	676.78	8.05	6.82	1.23
5	Estadio	925.5	20.73	8.89	677.02	7.92	7.08	0.84
6	Puente Vía Macas	923.5	20.55	8.92	677.19	7.95	6.90	1.05
7	Sandalías bajo	895.2	20.45	8.94	679.59	7.99	7.55	0.44
8	Unión Base Bajo	885.1	20.82	8.87	680.45	7.94	7.06	0.88
a1	Río Churoyacu	935	20.70	8.89	676.22	7.91	7.44	0.47
a2	Río Pambay	929	19.80	9.06	676.73	8.07	5.79	2.28
a3	Río Citayacu	927	22.80	8.53	676.89	7.60	1.00	6.60
a4	Río Chilcayacu	924	20.40	8.95	677.15	7.97	7.92	0.05
a5	Río Sandalias	896	20.30	8.97	679.52	8.02	7.28	0.45

**TABLA 7.** Resultados del déficit y concentración modelados de Oxígeno Disuelto en función de la distancia recorrida.

Puntos N°	Denominación	Operación	Recorrido Acumulado* (km)	Tiempo** (días)	Déficit Modelado (mg/L)	C. modelada (mg/L)
1	Fátima		0.0	0.000	<b>1,05</b>	<b>7,01</b>
2	Puente Las Américas	Modelo	3.3	0.043	<b>0,80</b>	<b>7,29</b>
r1	Río Puyo	Modelo	6.4	0.084	<b>0,56</b>	<b>7,54</b>
a1	Río Churoyacu	Balance	6.4	0.084	<b>0,40</b>	<b>7,52</b>
3	Paseo Turístico	Modelo	7.0	0.092	<b>0,17</b>	<b>7,81</b>
r2	Río Puyo	Modelo	7.2	0.094	<b>-0,06</b>	<b>8,04</b>
a2	Río Pambay	Balance	7.2	0.094	<b>0,60</b>	<b>7,47</b>
4	Malecón (B. Obrero)	Modelo	7.6	0.100	<b>0,35</b>	<b>7,71</b>
r3	Río Puyo	Modelo	8.1	0.106	<b>0,09</b>	<b>7,96</b>
a3	Río Citayacu	Balance	8.1	0.106	<b>0,25</b>	<b>7,35</b>
5	Estadio	Modelo	9.7	0.127	<b>-0,14</b>	<b>8,05</b>
r4	Río Puyo	Modelo	11.4	0.149	<b>-0,51</b>	<b>8,43</b>
a4	Río Chilcayacu	Balance	11.4	0.149	<b>-0,39</b>	<b>8,36</b>
6	Puente Vía Macas	Modelo	12.0	0.157	<b>-0,73</b>	<b>8,68</b>
r5	Río Puyo	Modelo	14.9	0.195	<b>-1,05</b>	<b>9,03</b>
a5	Río Sandalias	Balance	14.9	0.195	<b>-0,84</b>	<b>8,86</b>
7	Sandalías Bajo	Modelo	15.1	0.198	<b>-1,16</b>	<b>9,15</b>
8	Unión Base	Modelo	15.8	0.208	<b>-1,47</b>	<b>9,42</b>
k =	<b>0.96 días<sup>-1</sup></b>					
Ka =	<b>4.80 días<sup>-1</sup></b>					

Si se compara los resultados de la modelación de OD con los datos de campo (Figura 3) se encuentran ligeras diferencias en torno a las concentraciones en la parte final del tramo estudiado. Esto puede deberse a la existencia de procesos de reducción de la disponibilidad de oxígeno por descargas difusas u otros factores. Otra razón para estas diferencias puede ser la presencia de un mayor índice de reaireación para la sección comprendida entre el km 7 y el km 9.7, superior al utilizado para la modelación. A pesar de esto la tendencia modelada se presenta bastante cercana a los datos reales.



**Figura 3.** Modelación del déficit y concentración de Oxígeno Disuelto a lo largo del tramo medio del Río Puyo.

#### IV. CONCLUSIONES

Se identificaron seis afluentes principales en el tramo medio del río Puyo, de los cuales dos de ellos aportan materia orgánica de manera importante (Pambay y Citayacu) en caudales de 2.10 y 0.86 m<sup>3</sup>/s respectivamente.

Se determinó el caudal en ocho puntos del tramo medio del río, observándose valores de entre 3.26 m<sup>3</sup>/s (Fátima) y 21.10 m<sup>3</sup>/s (Unión Base), a lo largo de 15.8 km de recorrido.

En la evaluación de DBO<sub>5</sub> se establecieron diferencias entre el tramo comprendido entre los km 1 y 6.7, con condiciones aceptables para el desarrollo de biota acuática y uso humano recreativo, y el tramo comprendido entre los km 6.7 y 15.8, donde existe alteración de las mismas. En la aplicación del modelo para materia orgánica a partir de estos datos, se infirió que a pesar del aporte de aguas residuales las condiciones del río hacen que su autodepuración sea parcialmente posible. La comparación entre el modelo realizado y los datos medidos confirman la tendencia.

En la determinación de Oxígeno Disuelto se identificó una tendencia relativamente uniforme en la cual el parámetro se mantiene dentro de niveles aceptables para uso recreativo y conservación de flora y fauna. La aplicación del modelo para este parámetro confirma esta situación, destacando que la concentración y saturación de oxígeno no constituye un factor crítico en las condiciones de calidad de agua del río.

## AGRADECIMIENTOS

Se extiende un sincero agradecimiento a la Universidad Estatal Amazónica por el apoyo económico, logístico y académico brindado para la consecución del trabajo.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- CARRERA G. y ATIAGA O. 2011. Modelación de oxígeno disuelto y materia orgánica y su influencia en la distribución y diversidad de indicadores bentónicos de la cuenca del río San Pedro en el tramo Amaguaña - Guangopolo. Proyecto de Grado. Escuela Politécnica del Ejército. Carrera de Ingeniería Geográfica y del Medio Ambiente. Sangolquí (Ecuador)
- CHIN, D. (2013). Water-Quality Engineering in Natural Systems: Fate and Transport Processes. Second Edition Ed. Wiley. New Jersey (E.U.)
- CRITES R. y TCHOBANOGLIOUS G. (2000). Tratamiento de aguas residuales en pequeñas poblaciones. Traducido por Camargo M. McGraw-Hill. Bogotá, Colombia.
- DOCAMPO L. (1999). Modelización hidráulica de caudales ecológicos. En Revista "Ingeniería Civil". CEDEX, Centro de Estudios de Técnicas Aplicadas. N° 113/1999. Madrid (España).
- DOMENECH, x. Y PERAL, J. (2006). Química Ambiental de Sistemas Terrestres. Editorial Reverté. Barcelona (Esp).
- DOMINGUEZ J. et. al. 2005. Empleo del Modelo de Streeter y Phelps modificado para la planificación de estrategias de saneamiento del Río Almendares. Instituto Superior de Ciencias y Tecnologías Aplicadas. Departamento de Radioquímica. En Revista CENIC Ciencias Químicas, Vol. 36, No. Especial, 2005
- INEC, 2010. Censo Nacional de Población y Vivienda.
- TEXTO ÚNICO DE LEGISLACIÓN AMBIENTAL SECUNDARIA, TULAS (2004). Libro 6, Anexo1: Norma de Calidad Ambiental y de Descarga de Efluentes: Recurso Agua. República del Ecuador. Ministerio del Ambiente
- PETRONI R. 2000 Desarrollo y aplicación de un modelo bidimensional de calidad de agua. Buenos Aires (Argentina). En Congreso Argentino de Saneamiento y Medio Ambiente, 11; Mendoza, 10-12 may. 2000.
- ROMERO J. (2010) Tratamiento de Aguas Residuales. Teoría y Principios de Diseño. Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería. Bogotá.
- UNIVERSITAT POLITECNICA DE VALENCIA. (2009). Modelo Básico de Streeter-Phelps. En <http://riunet.upv.es/handle/10251/5348>
- VALDEZ E. y VÁSQUEZ A. 2003. Ingeniería de los sistemas de tratamiento y disposición de aguas residuales. Fundación ICA. Disponible en: [http://www.capac.org/web/Portals/0/biblioteca\\_virtual/doc003/](http://www.capac.org/web/Portals/0/biblioteca_virtual/doc003/)