



**ESCUELA POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO**

**UNIDAD DE GESTIÓN DE POSTGRADO**

**ANÁLISIS DE LA CONTAMINACIÓN Y MODELAMIENTO DE  
PARÁMETROS FÍSICO QUÍMICOS EN EL CURSO MEDIO-  
ALTO DEL RÍO PUYO**

**POR:**

**ING. LEO MAXIMILIANO RODRÍGUEZ BADILLO**

**Proyecto de grado presentado como requisito parcial  
para la obtención del título de:**

**MAGISTER EN SISTEMAS DE GESTIÓN AMBIENTAL**

**2013**

## CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue realizado en su totalidad por el Ing. Leo Maximiliano Rodríguez Badillo como requerimiento parcial a la obtención del título de Magister en Sistemas de Gestión Ambiental.

Quito, 10 de septiembre de 2013

Ing. Oliva Atiaga Franco Ms. Sc.  
Directora

## **DECLARACION DE RESPONSABILIDAD**

Por medio de la presente yo: LEO MAXIMILIANO RODRIGUEZ BADILLO declaro ser responsable de la ejecución del presente proyecto de investigación en todas sus fases de campo, análisis de resultados y elaboración del documento final.

ATENTAMENTE

Ing. Leo Maximiliano Rodríguez Badillo

CC: 1714789987

## **AUTORIZACIÓN**

Autorizo a la ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL EJÉRCITO la publicación en la Biblioteca Virtual del proyecto de Maestría titulado “ANÁLISIS DE LA CONTAMINACIÓN Y MODELAMIENTO DE PARÁMETROS FÍSICO QUÍMICOS EN EL CURSO MEDIO-ALTO DEL RÍO PUYO” cuyo contenido, ideas y criterios son de mi exclusiva autoría.

**ATENTAMENTE**

Ing. Leo Maximiliano Rodríguez Badillo

**AUTOR**

## **DEDICATORIA**

Con todo cariño y dedicación para las personas humanas y no humanas a quienes intento brindar mis esfuerzos día a día y cuya felicidad es mi mayor propósito:

Mayra Alejandra, Bobi, Osa.

A mi madre, Ligia Lupe

A mí mismo y a la Naturaleza.

## AGRADECIMIENTOS

A mi esposa Mayra Alejandra, por su incondicional amor, comprensión y apoyo en los momentos más difíciles, sin los cuales hubiese sido imposible alcanzar este importante logro.

A mi madre Ligia Lupe y a mi padre Leo Max por su cariño y paciencia a lo largo de toda una vida y su invaluable apoyo en esta etapa de mi formación profesional

A los docentes de la Maestría en Sistemas de Gestión Ambiental de la ESPE, de manera especial a la Ing. Oliva Atiaga Franco por su valioso aporte profesional que enriqueció significativamente el nivel científico y relevancia del presente trabajo.

A la Universidad Estatal Amazónica por su confianza y respaldo, en especial a su Rector, Dr. Julio César Vargas Burgos y a los ingenieros Ricardo Abril, Pedro Cedeño, Alexandra Torres, Érika Bucaram, Federico Tsamaraint y Gianella Jiménez.

A la Naturaleza y casi todos los seres que habitan en ella, quienes permiten construirnos diariamente mediante su contemplación, estudio y cuidado.

# ÍNDICE GENERAL

<b>ÍNDICE GENERAL .....</b>	<b>vii</b>
<b>1. ANTECEDENTES.....</b>	<b>1</b>
1.1. Justificación e Importancia.....	2
1.2. Objetivo General .....	5
1.3. Objetivos Específicos .....	5
1.4. Metas .....	5
<b>2. MARCO TEÓRICO Y METODOLOGIA .....</b>	<b>7</b>
2.1. Marco Legal.....	7
2.2. Marco Teórico .....	8
2.2.1. Contaminación de los recursos hídricos.....	8
2.2.2. Modelamiento de parámetros físico químicos .....	10
2.2.3. Modelo Matemático de Streeter-Phelps .....	11
2.2.4. Conformación de un curso hídrico.....	13
2.3. Metodología.....	14
2.3.1. Recopilación de información secundaria .....	15
2.3.2. Identificación del área de estudio y selección puntos de muestreo.....	15
2.3.3. Levantamiento de línea de base hidrológica. ....	15
2.3.4. Determinación de calidad de agua .....	17
2.3.5. Modelamiento de calidad de agua.....	18
<b>3. RESULTADOS .....</b>	<b>21</b>
3.1. Identificación de la zona de estudio y puntos de control.....	21
3.1.1. Área de estudio.....	21
3.1.2. Puntos de control en el río Puyo .....	23
3.1.3. Puntos de control en afluentes .....	23
3.2. Aspectos socioeconómicos .....	26
3.2.1. Población.....	26
3.2.2. Salud Pública .....	28
3.2.3. Vivienda y Servicios Sanitarios .....	28
3.2.4. Agua Potable .....	29
3.3. Clima .....	31
3.4. Caudales y parámetros hidrológicos.....	32
3.5. Calidad de Agua .....	34
3.5.1. Oxígeno Disuelto (OD).....	34
3.5.2. Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) .....	37
3.6. Modelamiento de oxígeno disuelto y materia orgánica.....	41
3.6.1. Modelación de materia orgánica .....	41
3.6.1.1. Cálculo de k .....	41
3.6.1.2. Cálculo de la $DBO_U$ .....	43

3.6.1.3.	Desarrollo del modelo .....	45
3.6.2.	Modelación de Oxígeno Disuelto .....	54
3.6.2.1.	Calculo de la concentración de saturación .....	54
3.6.2.2.	Calculo del Déficit Inicial .....	56
3.6.2.3.	Cálculo de constante de reaireación ( $k_a$ ) .....	57
3.6.2.4.	Desarrollo del Modelo .....	59
<b>4.</b>	<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>	<b>66</b>
4.1.	Conclusiones.....	66
4.2.	Recomendaciones .....	67
<b>5.</b>	<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>69</b>
<b>6.</b>	<b>ANEXOS .....</b>	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
6.1.	Anexo 1. Hoja de Registro de datos.....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
6.2.	Anexo 2. Informes de análisis de aguas.....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
6.3.	Anexo 3. Criterios de Interpretación utilizados para el análisis de aguas	<b>¡Error! Marcador no del</b>
6.4.	Anexo 4: Fotografías.....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>



## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.	Ubicación Geográfica de los puntos de control en el Río Puyo. 2012.....	23
Tabla 2.	Coordenadas y altitudes de los principales afluentes del Río Puyo. 2012 .....	26
Tabla 3.	Población de las parroquias Puyo, Fátima y Veracruz, 2010.....	27
Tabla 4.	Viviendas con personas presentes en las parroquias Puyo, Fátima y Veracruz, 2010.....	28
Tabla 5.	Dotación de agua en las parroquias Puyo, Fátima y Veracruz, 2010.....	29
Tabla 6.	Saneamiento de aguas residuales en las parroquias Puyo, Fátima y Veracruz, 2010.....	31
Tabla 7.	Parámetros hidrológicos en los puntos de control del Río Puyo y sus principales afluentes. 2012.....	33
Tabla 8.	Concentración promedio y mínima de Oxígeno Disuelto en los puntos de control del Río Puyo y sus principales afluentes. 2012 .....	36
Tabla 9.	Concentración promedio y máxima de Demanda Bioquímica de Oxígeno a los 5 días (DBO5) en los puntos de control del Río Puyo y sus principales afluentes. 2012 .....	38
Tabla 10.	Resultados de la estimación de la constante de recuperación del río (k) .....	43
Tabla 11.	Cálculo de la DBOU en 8 puntos del Río Puyo y sus afluentes .....	45
Tabla 12.	Modelación de materia orgánica en ocho puntos del Río Puyo .....	48
Tabla 13.	Temperatura del agua en 8 puntos del Río Puyo y sus afluentes .....	55
Tabla 14.	Cálculo de concentraciones de saturación (ODS) .....	56
Tabla 15.	Cálculo de déficit inicial para 8 puntos del Río Puyo y desembocadura s .....	57
Tabla 16.	Cálculo para la constante de reaireación $k_a$ .....	58
Tabla 17.	Modelación del déficit y concentración de Oxígeno Disuelto (D) .....	62

## ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1. Población de las parroquias Puyo, Fátima y Veracruz, 2010.....	27
Gráfico 2. Dotación de agua en las parroquias Puyo, Fátima y Veracruz, 2010.....	30
Gráfico 3. Concentración de Oxígeno Disuelto a lo largo del Río Puyo .....	36
Gráfico 4. Concentración de Oxígeno Disuelto en los afluentes .....	37
Gráfico 5. Concentración de DBO5 a lo largo del Río Puyo en el tramo .....	39
Gráfico 6. Concentración de DBO5 en los afluentes del río Puyo .....	40
Gráfico 7. Variación de la concentración de materia orgánica a lo largo del tramo medio del Río Puyo, estimada mediante modelación de la DBO. ....	50
Gráfico 8 Comparación entre la concentración de materia orgánica modelada y el promedio de datos medidos (terreno) para la DBO5, en el tramo medio del Río Puyo, estimada mediante modelación de la DBO. ....	51
Gráfico 9. Variación de la concentración de materia orgánica posterior al tramo medio del Río Puyo, estimada mediante modelación de la DBO. ....	52
Gráfico 10. Modelación del déficit y concentración de oxígeno disuelto a lo largo del tramo medio del Río Puyo. ....	62
Gráfico 11. Comparación del déficit y concentración de oxígeno disuelto modelados con valores reales (terreno). ....	64

## ÍNDICE DE MAPAS

Mapa 1.	Ubicación de la cuenca hidrográfica del Río Puyo en el Ecuador y Pastaza .....	22
Mapa 2.	Ubicación del tramo del Río Puyo estudiado en la cuenca hidrográfica.....	22
Mapa 3.	Ubicación de los puntos de control en el Río Puyo. 2012. ....	24
Mapa 4.	Ubicación de puntos de control en los principales afluentes del Río Puyo. 2012. ....	25
Mapa 5.	Valores de L medida (terreno) y L modelada en puntos de control y principales afluentes (ubicación geográfica). 2012.....	53
Mapa 6.	Valores de concentración de OD medido (terreno) y modelado en puntos de control y principales afluentes (ubicación geográfica). 2012.....	65



## RESUMEN EJECUTIVO

El presente trabajo tuvo como propósito el 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 posicionó 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 disuelto, DBO, Streeter-Phelps

## SUMMARY

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 and 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, dissolved oxygen, BOD, Streeter-Phelps

# ANÁLISIS DE LA CONTAMINACIÓN Y MODELAMIENTO DE PARÁMETROS FÍSICO QUÍMICOS EN EL CURSO MEDIO-ALTO DEL RÍO PUYO

## 1. ANTECEDENTES

La necesidad de una adecuada gestión de los recursos naturales alcanza gran relevancia para toda sociedad humana. Sin embargo, las particularidades del medio natural en el cual las actividades humanas se desarrollan, crean la necesidad de plantear modelos de estudio y gestión conjunta de dichos recursos acordes con aquella. El análisis de la contaminación hídrica, mediante modelos que permitan la estimación de las consecuencias ambientales a mediano y largo plazo (como la modelación de parámetros relacionados con la contaminación por materia orgánica, como la  $DBO_5$ ), constituye una valiosa alternativa para la toma de decisiones relacionadas con el manejo y conservación del recurso.

El río Puyo es un cauce hídrico permanente y tributario de la margen izquierda del río Pastaza (Región Amazónica Ecuatoriana, provincia de Pastaza). Alcanza una longitud de 37 km y conforma una subcuenca del mencionado sistema hidrográfico, abarcando aproximadamente 370 km<sup>2</sup> desde su nacimiento hasta su desembocadura. Jurisdiccionalmente, se origina en el cantón Mera, ingresando poco después de su nacimiento al cantón Pastaza en el cual atraviesa las parroquias de Fátima, Puyo, Tarqui, Veracruz y Pomona.

El curso hídrico mencionado constituye un caso representativo en el cual la calidad ambiental sufre un creciente deterioro ocasionado por el aumento de la población y los procesos de urbanización desarrollados en su subcuenca, especialmente en torno a la ciudad de Puyo, asentada en sus márgenes. Es así que, a lo largo de la historia de la ciudad, las aguas residuales han sido vertidas directamente en el cauce del Río Puyo, o sus afluentes, deteriorando su calidad y afectando aguas abajo su uso para consumo humano, pecuario y recreativo así como las condiciones necesarias para la preservación de flora y fauna propias de la zona.

En relación a la problemática ambiental del Río Puyo, se han realizado estudios descriptivos a diferente nivel, pero no se han aplicado métodos de modelamiento de calidad de agua con sus consecuentes aplicaciones. Por otra parte, se han realizado estudios relacionados con la problemática en otras regiones del país, (Carrera y Atiaga, 2011) o (Domínguez, 2005)

De la revisión de estos trabajos se afirma la necesidad de establecer estudios de análisis y modelamiento de la contaminación a lo largo del cauce hídrico la cuenca a fin de obtener información precisa que puedan orientar programas de manejo sostenible del recurso.

### **1.1. Justificación e Importancia**

La ciudad de Puyo, capital de la provincia de Pastaza, se ha convertido en los últimos años en una de las poblaciones de mayor desarrollo económico de la Región



Amazónica, lo cual ha impulsado un acelerado incremento poblacional, a partir de los 25000 habitantes en el año 2001 a 39280 (INEC, 2010).

Esta situación ha dado lugar a importantes cambios en el uso de suelo en las áreas periféricas de la urbe, como en los márgenes de los ríos Pambay y Churoyacu, las áreas situadas al sur del río Pindo Grande y la margen oriental del Río Puyo en el segmento comprendido entre el Río Chilcayacu y la vía a Macas, destinándose terrenos anteriormente ocupados por pastizales y bosque secundario a la urbanización y edificación de establecimientos comerciales de diversos tipos. Al deteriorarse las características de estas superficies, y por tanto su función como zonas de protección natural de los cauces hídricos, se han generado problemas como la alteración del componente biótico de los ecosistemas fluviales y el arrastre de suelo por escorrentía.

La destrucción de las franjas de suelo y vegetación que resguardaban el cauce no ha sido el único problema derivado de la progresiva urbanización de la ciudad ya que asimismo, la contaminación derivada de las descargas resultantes de dichos emplazamientos ha originado el deterioro progresivo de la calidad del agua en tramos del río inicialmente ricos en biota y elementos naturales. Esto ha dado lugar a la transformación progresiva de un importante recurso hídrico, tradicionalmente empleado para la obtención de agua para uso humano, propósitos recreativos (balnearios) y elementos de paisaje, en una fuente de generación de malos olores y microorganismos patógenos causantes de enfermedades.

Respecto a la constitución de las descargas líquidas, la naturaleza de los establecimientos comerciales cuenta también con especial importancia en la contaminación generada. Al momento del estudio, en el área urbana destacan establecimientos de servicios como alimentación, hospedaje, mantenimiento vehicular y lavanderías de ropa. En 2012, de acuerdo al Registro de Actividades Comerciales del Gobierno Municipal de Pastaza, existían 178 establecimientos de alimentación, 84 de hospedaje, 32 lubricadoras de vehículos, 19 mecánicas, 13 establecimientos de servicios vehiculares varios y 34 lavanderías de ropa. A la fecha no existe un órgano legal municipal que regule de manera específica los aspectos ambientales de estos locales pero se ha formulado un Proyecto de Ordenanza denominada “Ordenanza Ambiental para el Manejo, Disposición y Tratamiento Adecuado de Aceites, Grasas, Lubricantes Usados y/o Solventes Hidrocarburos Saturados”

Estas consideraciones, justificaron la realización del presente proyecto, estableciendo una base de información científica de carácter hidrológico-ambiental lo cual, junto a la aplicación de modelos matemáticos orientados a la modelación de la calidad del agua, ha permitido predecir situaciones de deterioro ambiental y variación a futuro de las características del recurso a lo largo de la microcuenca. La consecución de estos propósitos constituye también una base para la implementación de estrategias de planificación y control que faciliten la recuperación y conservación del recurso, así como su aprovechamiento racional. En consecuencia, los resultados aportan a la consecución de un ambiente sano para la población, conforme a los propósitos de la Escuela Politécnica del Ejército relacionados con el mejoramiento de las condiciones de vida de la colectividad ecuatoriana.

## **1.2. Objetivo General**

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.

## **1.3. Objetivos Específicos**

- Identificar los principales afluentes que incorporan materia orgánica contaminante al Río Puyo en el curso comprendido entre las poblaciones de Fátima y Unión Base.
- Determinar el caudal del Río Puyo en ocho puntos establecidos a lo largo del curso comprendido entre las poblaciones de Fátima y Unión Base en tres fechas distintas.
- Evaluar la calidad del agua en ocho puntos del Río Puyo, en base a dos parámetros físico-químicos.
- Realizar un modelamiento de la variación de la calidad de agua a lo largo del curso medio-alto del Río Puyo respecto a los aportantes identificados.

## **1.4. Metas**

- Identificar las principales fuentes puntuales de descargas líquidas en el tramo estudiado hasta el mes de Julio de 2012.
- Realizar el levantamiento de información relacionada a caudales y calidad de agua en el curso medio del río Puyo hasta el mes de Julio 2012, en términos de

dos parámetros de calidad (Oxígeno Disuelto y  $\text{DBO}_5$ ) en 8 puntos de muestreo repartidos a lo largo del curso hídrico.

- Obtener los resultados de la modelación de dos parámetros físico-químicos a lo largo del curso medio-alto del Río Puyo respecto a las fuentes puntuales identificadas.

## 2. MARCO TEÓRICO Y METODOLOGIA

### 2.1. Marco Legal

El trabajo se desarrolló en el marco legal establecido por las siguientes normativas nacionales:

- Constitución Política de la República del Ecuador, aprobada por la Asamblea Nacional Constituyente y vigente desde Noviembre del 2008.
- Ley de Gestión Ambiental.- publicada en el Registro Oficial N° 245 de 30 de julio de 1999, en el Título III, Capítulo II, Art. 19 a 27, define la normativa para la Evaluación de Impacto Ambiental y del Control Ambiental.
- Ley de Prevención y Control de la Contaminación Ambiental. Registro Oficial No. 97 del 31 de mayo de 1976.
- Políticas Básicas Ambientales. Registro Oficial No. 456 del 7 de junio de 1994.
- Reglamento a la Ley de Gestión Ambiental para la Prevención y Control de la Contaminación Ambiental, 2003.
- Texto Unificado de Legislación Ambiental: Libro VI, Anexo I. Norma de Calidad Ambiental y de Descarga de Efluentes: Recurso Agua, Anexo II.

Adicionalmente se han considerado la normativa local:

- Ordenanza del Plan de Desarrollo Estratégico del Cantón Pastaza y los Códigos de Regulación Urbana y de Arquitectura y Urbanismo de la Ciudad de Puyo,

Período 2000- 2010, publicada en el Suplemento del Registro Oficial N°47, del 15 de octubre de 2009.

## **2.2. Marco Teórico**

### **2.2.1. Contaminación de los recursos hídricos**

De acuerdo a lo que expresaba el Consejo Nacional de Recursos Hídricos (2002), Un grave problema al desarrollo sostenible del Ecuador es la contaminación de los recursos hídricos y la degradación de los ecosistemas asociados a ellos, debido a la presión creciente de la demanda de agua, a la falta de normas y sanciones rigurosas contra los impactos ambientales y al hecho de que los causantes de dichos impactos no los asumen económicamente. Es determinante la contaminación de los cursos hídricos debido a la diversidad y agresividad de las fuentes de contaminación urbana, industrial, minera, hidrocarburífera, así como por la multiplicidad, ineficiencia y descoordinación de las instituciones públicas con funciones en la materia. La situación se halla agravada por la desarticulación de la organización institucional responsable de la protección de los recursos hídricos y por el desconocimiento de la situación real de los problemas existentes, tanto por lo que se refiere a las fuentes de contaminación y agresión ambiental como a sus efectos.

Entre los diferentes tipos de contaminación hídrica existentes en el área del proyecto cuentan con relevancia la contaminación por descargas domésticas, agrícolas e industriales. En términos de caudal, la primera de ellas, es quizá la más significativa. En el Ecuador solo el 57% de la población tiene servicio de

alcantarillado y el 74% de éste se encuentra en mal estado. Las aguas servidas no se tratan en casi ninguna población, ni existe ningún plan de actuación. El 27% de la población urbana y el 91% de la rural carecen de servicio de recolección de desechos sólidos. La disposición de desechos sólidos sólo se realiza en rellenos sanitarios en unas pocas ciudades del país, e incluso en estos casos, sin normas adecuadas de prevención de la contaminación

En el caso de descargas agrícolas, el abuso de productos fitosanitarios y fertilizantes, especialmente de productos nitrogenados, así como la presencia de establos, galpones y otros sistemas de producción pecuaria intensiva, contamina los recursos hídricos, particularmente los subterráneos. La inadecuada explotación de las camaroneras por otra parte, provoca la salinización de las aguas superficiales y subterráneas (problema agravado a veces por la sobreexplotación) y la destrucción de manglares. Por otra parte, en cuencas en las que se encuentran localizadas plantas industriales de cualquier tipo, la contaminación de los cuerpos de agua por descargas industriales es relevante. El problema se agrava por el hecho de que las descargas de este tipo suelen contener altas concentraciones de sustancias tóxicas o de elevada residualidad, como compuestos orgánicos, metales pesados, hidrocarburos, etc. De acuerdo al CNRH el tratamiento de los desechos industriales líquidos y sólidos en el país es prácticamente inexistente, enviándose a los mismos al alcantarillado, las quebradas y cursos de agua.

### 2.2.2. Modelamiento de parámetros físico químicos

Petroni (2000) señala que el 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 se le ha planteado a la sociedad moderna de preservar el medio ambiente y, en particular, los recursos hídricos. Por tal razón han proliferado numerosos modelos de diverso desarrollo, alcance y complejidad que abarcan toda la gama de necesidades generales desde el mero balance de masas hasta complejos modelos tridimensionales.

Monerri & Domenech (s.f.) mencionan que la base fundamental de los modelos de calidad de aguas son los balances de materia. Los balances se aplican a cada una de las sustancias objeto de interés. Pueden ser contaminantes químicos, oxígeno disuelto, microorganismos, etc., según el tipo de problema en estudio. Dichas sustancias constituyen los "componentes del modelo"

La concentración de cualquier sustancia en un punto cualquiera de un sistema natural ha de cumplir la ecuación fundamental de conservación de la materia. Así, la ecuación diferencial que representa la variación de concentración de un contaminante al cabo de un tiempo, que se encuentra disuelto en un elemento diferencial de volumen es:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial x}(u_x C) - \frac{\partial}{\partial y}(u_y C) - \frac{\partial}{\partial z}(u_z C) + \frac{\partial}{\partial x}\left(E_x \frac{\partial C}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(E_y \frac{\partial C}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(E_z \frac{\partial C}{\partial z}\right) + S_k$$



Donde:

- C:** Concentración del contaminante (mg/L o mol/L)
- t:** Tiempo (s)
- ux, uy, uz:** Componentes del vector velocidad real del agua; velocidad longitudinal, transversal y vertical (m/s).
- Ex, Ey, Ez:** Componentes del tensor de dispersión en el seno del fluido; coeficientes de dispersión longitudinal, transversal y vertical (m<sup>2</sup>/s).
- SK:** Fuente o sumidero del contaminante, por unidad de volumen de fluido y de tiempo (mg/(L/s) ó mol/(L/s)).

Esta ecuación muestra que en un sistema completamente mezclado, la acumulación de un contaminante equivale a:

$$\textit{Acumulación} = \textit{Entradas} - \textit{Salidas} \pm \textit{Generación}$$

### 2.2.3. Modelo Matemático de Streeter-Phelps

El Modelo Matemático de Streeter-Phelps fue 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 formulado por Streeter y Phelps bajo condiciones del estudio de la polución y purificación natural del río Ohio en 1925 (Valdez & Vazquez, 2003). Este modelo, denominado comúnmente modelo de disminución de oxígeno, se ha aplicado en cientos de

estudios hasta la fecha, como los desarrollados por Carrera & Atiaga (2011) y Domínguez (2005) y dado origen además a algunos modelos derivados.

El Modelo de Streeter-Phelps es un modelo matemático mediante el cual se determina la evolución, a lo largo de un río, de la materia orgánica biodegradable que se vierte en un punto del mismo 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 del modelo básico porque la materia orgánica es considerada como un único elemento, el oxígeno disuelto sólo depende de la reaireación superficial y del consumo bacteriano derivado de la degradación de dicha materia orgánica (Universitat Politècnica De Valencia, 2009)

Las Ecuaciones que definen el modelo de Streeter-Phelps son las siguientes:

$$\begin{array}{ll}
 \text{DBO} & V \frac{dL}{dt} = -k_d VL - k_s VL = -k_r VL \\
 \text{OD} & V \frac{do}{dt} = -k_d VL + k_a V \underbrace{(o_s - o)}_{D = \text{déficit de OD}} \\
 \text{D} & V \frac{dD}{dt} = k_d VL - k_a VD \leftarrow \text{---}
 \end{array}$$

En donde:

DBO: Demanda bioquímica de oxígeno

OD Oxígeno disuelto

D: Déficit de oxígeno

L DBO última en un tiempo t

V: Velocidad en la que cambia la concentración del parámetro dado

$k_a$ : Constante de reaireación.

$K_s$ : Constante de sedimentación

$k_d$ : Constante de degradación de primero orden

Al derivar la ecuación de OD, se tiene la llamada Ecuación de Streeter Phelps, que permite el desarrollo del modelo. Esta ecuación es la siguiente (Domenech y Peral, 2006):

$$DO = DO_0 e^{-k_{re}t} + \frac{k_{ox}[MD]_0}{k_{re} - k_{ox}} (e^{-k_{ox}t} - e^{-k_{re}t})$$

En donde:

DO: Demanda de oxígeno

DO<sub>0</sub>: Demanda de oxígeno inicial

MD: Materia degradable (oxidable)

$K_{re}$ : Constante cinética de reaireación

$K_{ox}$ : Constante cinética de oxidación

#### 2.2.4. Conformación de un curso hídrico

Un río principal suele ser definido como el curso con mayor caudal de agua (medio o máximo) o bien con mayor longitud o mayor área de drenaje. Tanto el concepto de río principal como el de nacimiento del río son arbitrarios, como también lo es la distinción entre río principal y afluente. Sin embargo, la mayoría de cuencas de drenaje presentan un río principal bien definido desde la desembocadura hasta cerca de la divisoria de aguas. El río principal tiene un curso, que es la distancia entre su origen y su desembocadura (Catie, 2006).

En el curso de un río se pueden distinguir tres partes:

- El curso superior, ubicado en lo más elevado del relieve, caracterizado por caudales pequeños y velocidades elevadas que suelen dar lugar a procesos de erosión en sentido vertical lo que en ocasiones origina la profundización del cauce.
- El curso medio, en donde el río empieza a zigzaguear, ensanchando el valle.
- El curso inferior, situado en las partes más bajas de la cuenca. Allí, el caudal del río pierde fuerza y los materiales sólidos que lleva se sedimentan, formando las llanuras aluviales o valles.

### **2.3. Metodología**

Se desarrollaron actividades de campo y gabinete para el desarrollo del presente trabajo en las cuales participaron el autor de la presente investigación junto a un equipo conformado por egresados y estudiantes de la carrera de Ingeniería Ambiental de la Universidad Estatal Amazónica. El proceso metodológico empleado para el desarrollo del proyecto comprendió cinco etapas:

- a) Recopilación de información secundaria
- b) Identificación del área de estudio y puntos de muestreo
- c) Levantamiento de línea de base hidrológica.
- d) Determinación de calidad de agua
- e) Modelamiento de calidad de agua

### **2.3.1. Recopilación de información secundaria**

Se recolectó información secundaria de la zona de estudio respecto a indicadores demográficos, urbanísticos y meteorológicos, así como a componentes socioeconómicos a fin de reforzar la interpretación de la información primaria que se levantaría posteriormente. Esta información se presenta en los Capítulos 3.2 y 3.3

### **2.3.2. Identificación del área de estudio y selección puntos de muestreo**

El reconocimiento del área en la que se desarrollaría el estudio se basó en la realización de visitas al área de estudio, en las cuales se identificó mediante observación directa, georeferenciación, registro fotográfico y registro cartográfico las principales descargas líquidas puntuales al curso del río. Se emplearon como instrumento de registro las hojas de datos expuestas en el Anexo 1. La información generada se presenta en los Capítulos 3.1.2 y 3.1.3

Tras la identificación y reconocimiento previo se seleccionaron 8 puntos de muestreo a lo largo del río y seis afluentes los mismos que servirían para la toma de muestras de agua con fines de análisis. En cada punto se identificaron tramos uniformes, con flujo libre de agua y facilidades de acceso. Estos puntos se encuentran representados en los Mapas 3 y 4 de los Capítulos 3.1.2 y 3.1.3

### **2.3.3. Levantamiento de línea de base hidrológica.**

Para la caracterización hidrológica del río en cada uno de los 8 puntos seleccionados y los afluentes, se utilizaron técnicas manuales que contribuyeron al

levantamiento de información necesaria para la estimación de los caudales mediante la fórmula de Manning. Se eligió este método en función de la carencia de algunos materiales de campo (como molinetes) que podrían haber servido para la medición de velocidades y aplicación de otros métodos de estimación. A pesar de no ser la ecuación de Manning la más apropiada para la determinación de caudales en ríos, algunos autores como Docampo (1999), manifiestan que su aplicación es viable cuando el coeficiente de rugosidad relativa del cauce ( $n$ ) cuenta con valores comprendidos en un rango entre 0.001 y 0.05. Al respecto, debe señalarse que para la estimación realizada, se han utilizado coeficientes de 0.035 y 0.040 correspondientes a “ríos de meseta con curvas, piedras y vegetación” y “ríos de montaña” propuestos por MUÑOZ-MATO (2012). Estos valores (conforme a lo mencionado) permiten la aplicación de dicha ecuación.

Las actividades desarrolladas en esta etapa del estudio fueron:

- Caracterización del cauce del río: Se tomó información en campo respecto a variables como: ancho (m), longitud de la sección (m), profundidad (m) y la velocidad de flujo (m/s). Para el efecto, se midió el ancho de la sección transversal del río en el tramo seleccionado con la ayuda de cintas métricas y se determinó la profundidad a intervalos regulares mediante regletas y miras. Los datos permitieron el cálculo del área transversal ( $A$ ), así como el área y el perímetro mojado
- Medición de pendientes: Esta actividad fue necesaria levantar información necesaria para la aplicación de la fórmula de Manning en la cual, mediante el uso

de un medidor laser de distancias y ángulos, piola y cinta métrica, se midió el desnivel existente respecto a una distancia longitudinal de 20 metros a lo largo del río, con el punto de muestreo en su punto medio.

- Registro de la velocidad del curso hídrico: En algunos puntos en donde la pendiente fue mínima ( $< 1\%$ ) se hizo una medición complementaria de la velocidad del fluido mediante el método del flotador tomando en cuenta la misma distancia utilizada para la medición de pendientes (20 m). Con los datos obtenidos se procedió a calcular el caudal del río mediante la siguiente ecuación:

$$Q = A * V$$

Donde:

Q = Caudal

A = Área transversal (área mojada)

V = Velocidad superficial del fluido.

#### **2.3.4. Determinación de calidad de agua**

Se determinó la calidad de agua a través de la realización de análisis físico-químicos para lo cual se colectaron 40 muestras combinadas en los puntos de control del Río Puyo (Tabla 1 y Mapa 3), a razón de cinco muestras por punto tomadas en fechas distintas y una muestra combinada para cada afluente (Tabla 2 y Mapa 4). Cada muestra combinada fue obtenida a partir de 10 sub-muestras extraídas con intervalos de 5 minutos. Las fechas de toma de las muestras fueron las siguientes:

- a) Puntos de muestreo en el Río Puyo, primera toma: 2012-05-16

- b) Puntos de muestreo en el Río Puyo, segunda toma: 2012-05-18
- c) Puntos de muestreo en el Río Puyo, tercera toma: 2012-05-23
- d) Puntos de muestreo en el Río Puyo, cuarta toma; Muestreo en afluentes: 2012-06-08
- e) Puntos de muestreo en el Río Puyo, quinta toma: 2012-08-17

Las muestras obtenidas fueron enviadas para su análisis al Laboratorio de Aguas y Suelos del Centro de Estudios, Servicios y Transferencia Tecnológica Ambiental (CESTTA) de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo (ESPOCH) 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 PEE/LAB-CESTTA/45 APHA 4500-O C y PEE/LAB-CESTTA/46 APHA 5210 B, respectivamente.

Para la interpretación individual de los resultados se tomó en cuenta los límites máximos permisibles establecidos en el Texto Unificado de Legislación Ambiental Secundaria (TULAS, 2004), Libro VI de Calidad Ambiental, Anexo I (Calidad de Aguas), considerando criterios para uso recreacional, conservación de flora y fauna y uso humano (Anexo 3).

### **2.3.5. Modelamiento de calidad de agua**

Se utilizó el modelo matemático de Streeter-Phelps considerando para el mismo la información obtenida para los 8 puntos de muestreo (Tabla 1 y Mapa 3) y los aportes provenientes de los 6 afluentes (Tabla 2 y Mapa 4) respecto a los valores promedio



de DBO<sub>5</sub> y Oxígeno Disuelto obtenidos en los análisis de aguas. Estos parámetros se definen a continuación:

- **Oxígeno Disuelto (OD):** De Acuerdo al TULAS (2004), el oxígeno disuelto es el oxígeno libre que se encuentra en el agua, vital para las formas de vida acuática y para la prevención de olores. Romero (2010), expresa que la solubilidad del oxígeno disuelto en aguas dulces oscila entre 7 mg/L a 35°C y 14.6 mg/L a 0°C para presión de una atmósfera. La baja disponibilidad de oxígeno disuelto limita la capacidad autodepuradora de cuerpos de agua y hace necesario el tratamiento de aguas residuales para su disposición en ríos y embalses. La concentración de saturación de OD es función de la temperatura, de la presión atmosférica y la salinidad del agua.
- Adicionalmente, el Oxígeno Disuelto constituye el fundamento del cálculo de la DBO y de la valoración de las condiciones de aerobividad de un agua. En general todo proceso aerobio requiere una concentración de OD mayor de 0,5 mg/L. El suministro de oxígeno y las concentraciones de OD en tratamientos biológicos aerobios y aguas receptoras de aguas residuales son también aspectos de gran importancia en el diseño, operación y evaluación de plantas de tratamiento de aguas residuales. La cantidad de oxígeno que se transfiere al agua residual, en un tanque de aireación de un proceso de lodos activados, debe ser suficiente para satisfacer la demanda de la masa microbiana existente en el sistema de tratamiento y para mantener un residual de OD generalmente del orden de 2 mg/L (Romero, 2010).

- **Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO<sub>5</sub>):** De acuerdo a Romero (2010), la demanda bioquímica de oxígeno es la cantidad de oxígeno que requieren los microorganismos para oxidar (estabilizar) la materia orgánica biodegradable en condiciones aerobias. La DBO puede establecerse en función de la concentración degradada en un término de tiempo estándar. Usualmente este término es de 5 días (DBO<sub>5</sub>) y ha sido el empleado para el análisis del parámetro en la presente investigación.
- La DBO permite obtener una idea clara de la calidad del agua desde el punto de vista de la materia orgánica presente y permite prever cuanto oxígeno será necesario para la depuración de esas aguas.

### **3. RESULTADOS**

#### **3.1. Identificación de la zona de estudio y puntos de control**

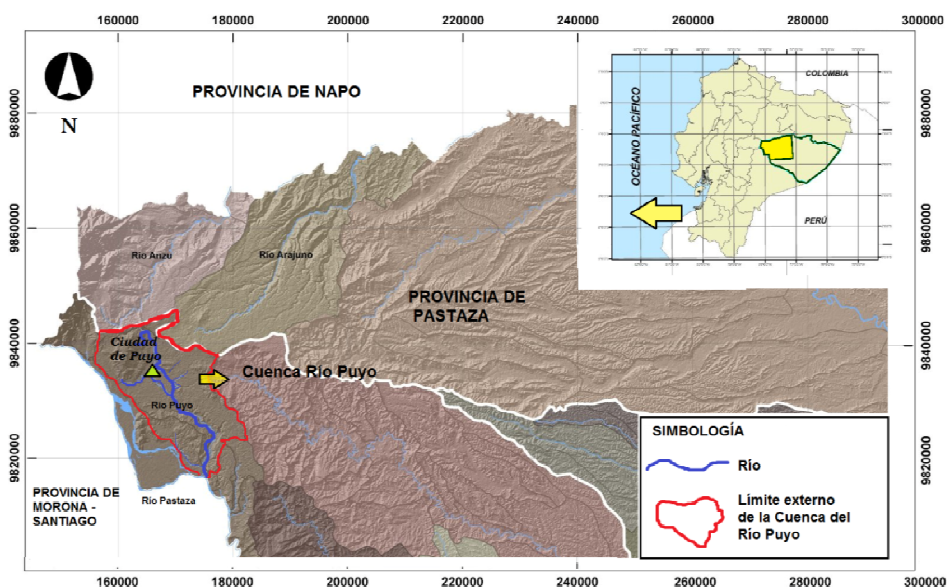
##### **3.1.1. Área de estudio**

La Provincia de Pastaza, en la Región Amazónica Ecuatoriana, está cubierta por los sistemas hidrográficos del Napo, Pastaza y Tigre, conformados por ríos caudalosos con frecuentes crecidas, navegables para pequeñas embarcaciones en su curso bajo, lo que es de vital importancia en el transporte de personas y recursos a estos lugares poco accesibles por otros medios.

El Río Puyo, objeto de este estudio, es un curso hídrico de aproximadamente 50 km de recorrido, Su cuenca hidrográfica se encuentra circunscrita al sistema hidrográfico del Pastaza, al ser afluente del río del mismo nombre, en la vertiente amazónica. En el Mapa 1 puede observarse la ubicación espacial de la cuenca del río

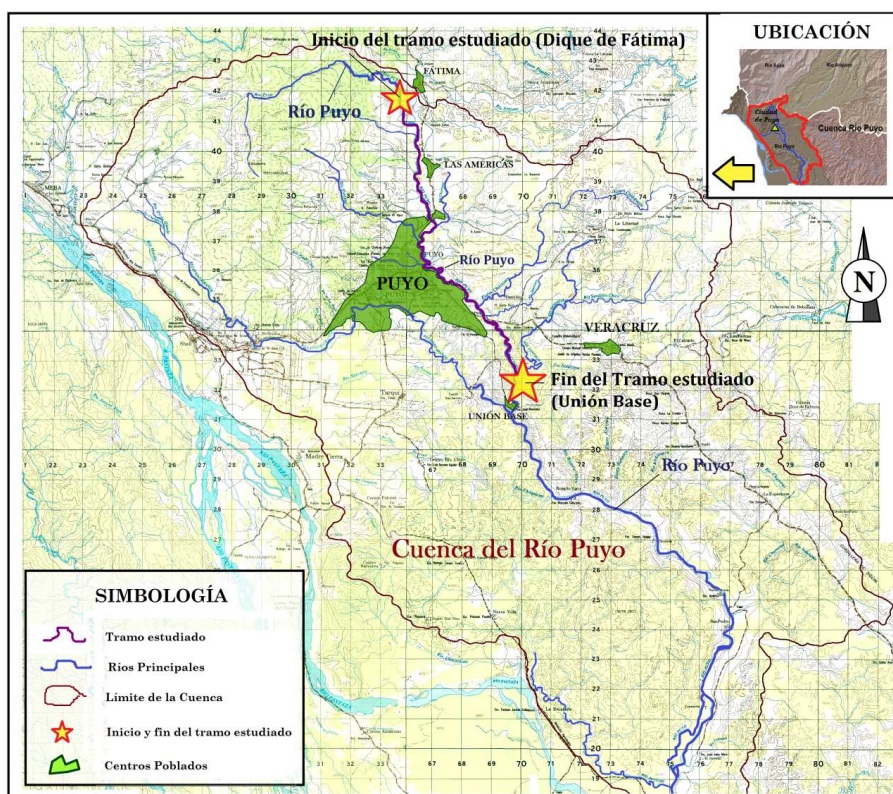
El trabajo realizado se focalizó en un tramo del río Puyo de 15.8 km, comprendidos entre el dique ubicado en la parroquia Fátima (Coordenadas 9842296 N y 833358 E) y la población de Unión Base, perteneciente la parroquia Puyo (Límite con la parroquia Veracruz, coordenadas 9831392 N y 169758 E) y los principales afluentes del cuerpo hídrico en este segmento. Este segmento fue elegido ya que al encontrarse sometido a mayor presión humana (especialmente por discurrir junto a la ciudad de Puyo), está sujeto también a un mayor impacto ambiental,

alcanzando relevancia su análisis con propósitos ambientales. En el Mapa 2 se representa el tramo del río estudiado, dentro de la cuenca hidrográfica.



**Mapa 1.** Ubicación de la cuenca hidrográfica del Río Puyo

Fuente: GADP Pastaza (2011) Adaptación: Autor



**Mapa 2.** Ubicación del tramo estudiado en la cuenca hidrográfica.

Fuente cartográfica: IGM (2011)

Adaptación: Autor

### 3.1.2. Puntos de control en el río Puyo

El estudio fue desarrollado a partir de información referente a 8 puntos de control dispuestos a lo largo del cauce del río Puyo y en la desembocadura de los principales afluentes en este tramo. En la Tabla 1 se presentan las referencias de ubicación geográfica de los mismos, mientras que en el Mapa 3 se despliega su ubicación espacial.

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

Punto N°	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 (Barrio 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	Sandalías	169651	9832038	895.2	15.1
8	Unión Base Bajo	169758	9831392	885.1	15.8

\* **Fuente:** Georeferenciación en campo

\*\* **Fuente:** Medición cartográfica. El recorrido hace referencia al Punto de partida (Punto de control N° 1),

**Elaboración:** Autor

### 3.1.3. Puntos de control en afluentes

A lo largo del curso hídrico estudiado se identificaron 6 principales afluentes en función de su caudal y afectación por presencia humana: Cuatro en la margen izquierda y dos en la margen derecha. Estos dos últimos (Pambay y Citayacu), son los que revisten mayor afectación o riesgo ambiental de ese tipo, dado que atraviesan la ciudad de Puyo con el consecuente acarreo de aguas domésticas, por lo cual se

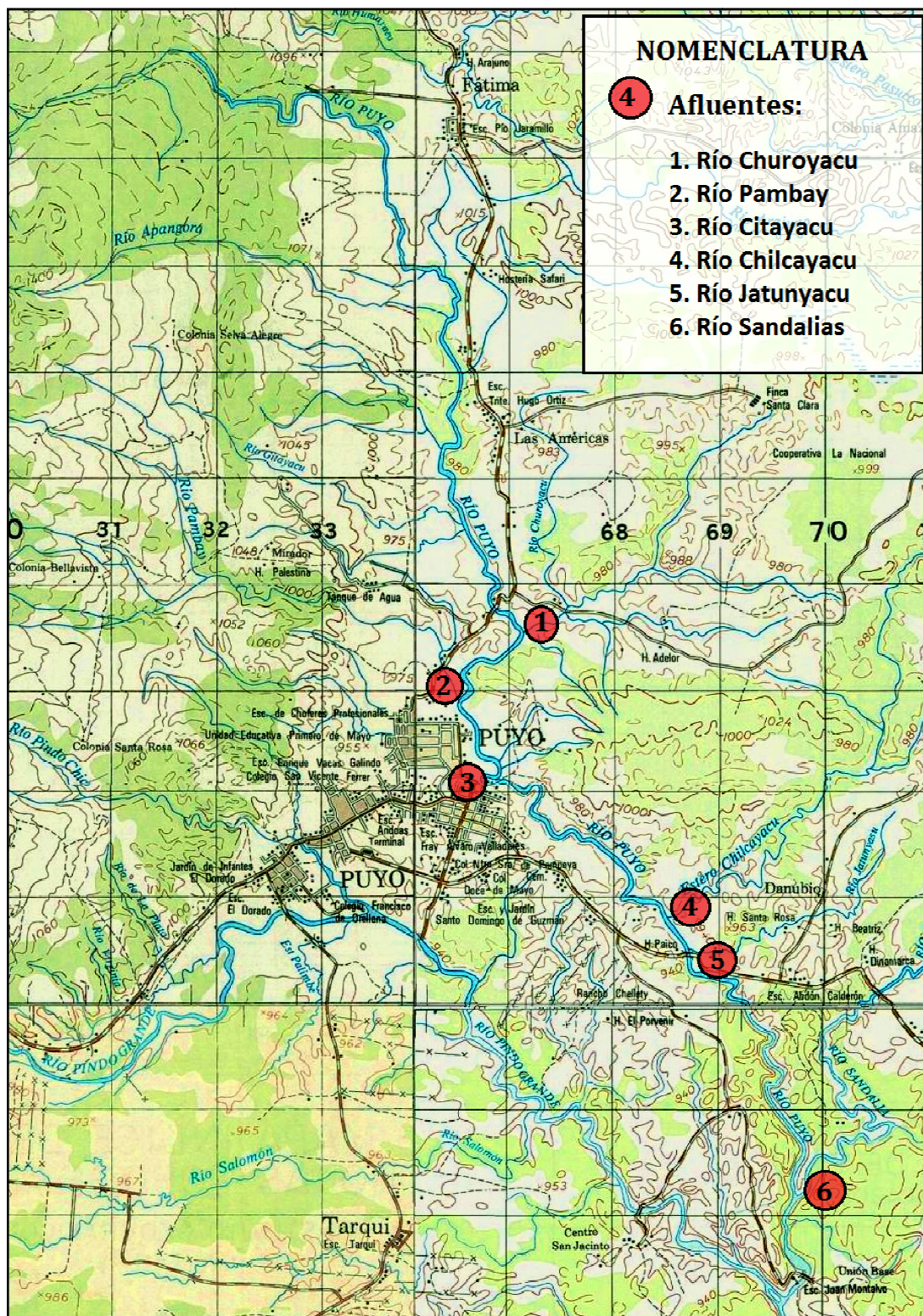
priorizó a estos dos cuerpos hídricos para la modelación de materia orgánica. La Identificación de estos afluentes se presenta en la Tabla 2.



**Mapa 3.** Ubicación de los puntos de control en el Río Puyo. 2012.

Fuente cartográfica: IGM (2011)

Adaptación: Autor



**Mapa 4.** Ubicación de puntos de control en los principales afluentes. 2012.

Fuente cartográfica: IGM (2011)

Adaptación: Autor

**Tabla 2.** Coordenadas y altitudes de los principales afluentes. 2012

Punto N°	Denominación	Margen	COORDENADAS*		Altitud** (m.s.n.m.)	Posición desembocadura (km)**
			E	N		
<b>Puntos de control afluentes</b>						
a1	Río Churoyacu	Izquierda	166525	9840064	935	6.7
a2	Río Pambay	Derecha	166910	9837185	929	7.2
a3	Río Citayacu	Derecha	166309	9837659	927	7.9
a4	Río Chilcayacu	Izquierda	166476	9835867	924	11.6
a5	Río Jatunyacu	Izquierda	168493	9834112	924	11.9
a6	Río Sandalias	Izquierda	168493	9834135	896	15.0
<b>Descargas Puntuales</b>						
d1	Colector Central	Derecha	166523	9836412	926	8.7

\* **Fuente:** Georeferenciación en campo

\*\* **Fuente:** Medición cartográfica. La posición de la desembocadura hace referencia al recorrido del río Puyo a partir del punto de control N°1

**Elaboración:** Autor

En cuanto a las descargas puntuales se identificó una prioritaria, correspondiente a la desembocadura del colector situado en el Barrio La Isla, el cual envía al río el mayor caudal de aguas descargadas en el sistema de alcantarillado público de la Ciudad de Puyo. El mismo se ubica en las coordenadas 166523 (E) y 9836412 (N).

## 3.2. Aspectos socioeconómicos

### 3.2.1. Población

De acuerdo al último censo poblacional del INEC (2010), en el Cantón Pastaza se contabilizaban 62.602 habitantes (0,43% de la población total del Ecuador). El 59% de estos habitantes se concentran en la parroquia de Puyo y 41% distribuidos en las 13 parroquias restantes. Este cantón puede dividirse para su análisis en 3 zonas: Zona Rural-Oriental que incluye las parroquias de Simón Bolívar, Río Tigre,



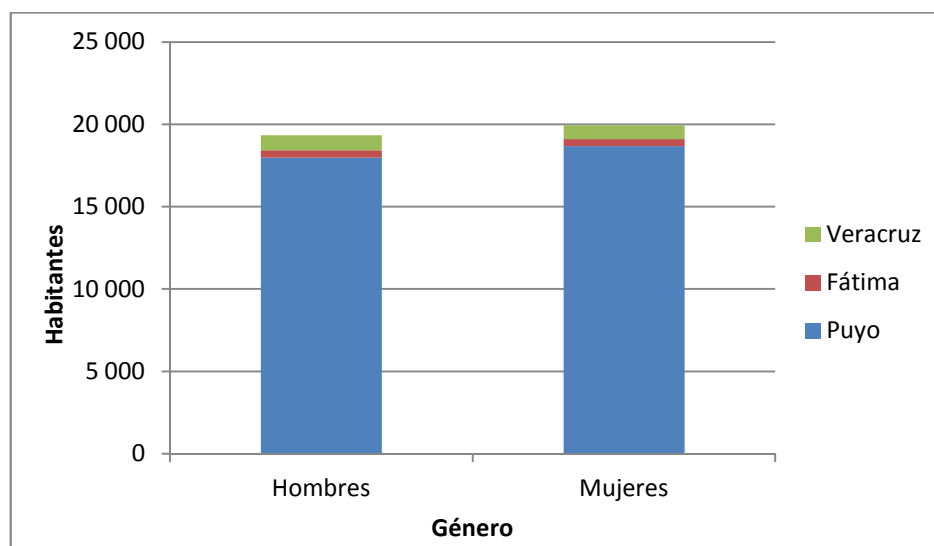
Río Corrientes, Montalvo y Sarayacu; la Zona Rural-Occidental que incluye las parroquias de Canelos, 10 de Agosto, Fátima, Pomona, Tarqui, Teniente Hugo Ortiz, Veracruz y El Triunfo, y la Zona Urbana, con la parroquia Puyo.

El área de estudio del presente proyecto abarca tres parroquias de las mencionadas anteriormente, las cuales contienen una población de 39280 habitantes, de las cuales 36.659 personas habitan en la ciudad de Puyo, mientras que los 2621 restantes residen en las otras dos parroquias (Tabla 3).

**Tabla 3.** Población de las parroquias Puyo, Fátima y Veracruz, 2010

Parroquia	Hombres	Mujeres	Total
Puyo	17 979	18 680	36 659
Fátima	447	416	863
Veracruz	906	852	1 758
<b>TOTAL</b>	<b>19 332</b>	<b>19 948</b>	<b>39 280</b>

Fuente: INEC (2010)      Elaboración: Autor



**Gráfico 1.** Población de las parroquias Puyo, Fátima y Veracruz, 2010

Fuente: INEC (2010)      Elaboración: Autor

### 3.2.2. Salud Pública

De acuerdo a la Subsecretaria de Salud de Pastaza (2010), entre las enfermedades más reportadas en la provincia prevalecen las infecciones respiratorias, diarrea aguda, trastornos psicológicos y dengue. Esta fuente destaca además la importancia de afecciones relacionadas con la contaminación del agua y mala disposición de residuos sólidos como enfermedades transmitidas por vectores (vg. malaria y dengue) y trastornos intestinales, las mismas que se encuentran asociadas a niveles de pobreza.

### 3.2.3. Vivienda y Servicios Sanitarios

De acuerdo al INEC (2010), (Tabla 4) en las tres parroquias en las que se circunscribe la Subcuenca Media del río Puyo, existen 10 190 viviendas con personas presentes. De estas, el 94 % se encuentran presentes en la parroquia urbana. En el Capítulo 3.5 (Calidad de agua) se analiza la implicación de esta distribución de viviendas en la calidad del agua del río.

**Tabla 4.** Viviendas con personas presentes en las parroquias Puyo, Fátima y Veracruz, 2010

Parroquia	Total	Porcentaje (%)
Puyo	9 556	94
Fátima	214	2
Veracruz	420	4
<b>TOTAL</b>	<b>10 190</b>	<b>100</b>

Fuente: INEC (2010)

Elaboración: Autor

### 3.2.4. Agua Potable

El abastecimiento de agua para consumo humano en la ciudad de Puyo y las parroquias Fátima y Veracruz, es obtenida a partir de tomas de captación situadas en las áreas altas y no intervenidas de la subcuenca, particularmente en los ríos Puyo, Pambay y Pindo Grande. En todos estos casos, el tratamiento que reciben estas es insuficiente, realizándose únicamente procesos básicos de filtración y adición de hipoclorito de sodio. El servicio abastece a aproximadamente a 7900 viviendas (con sus respectivos medidores), cubriendo un 85 – 90% de la urbe (EMAPAST, 2012).

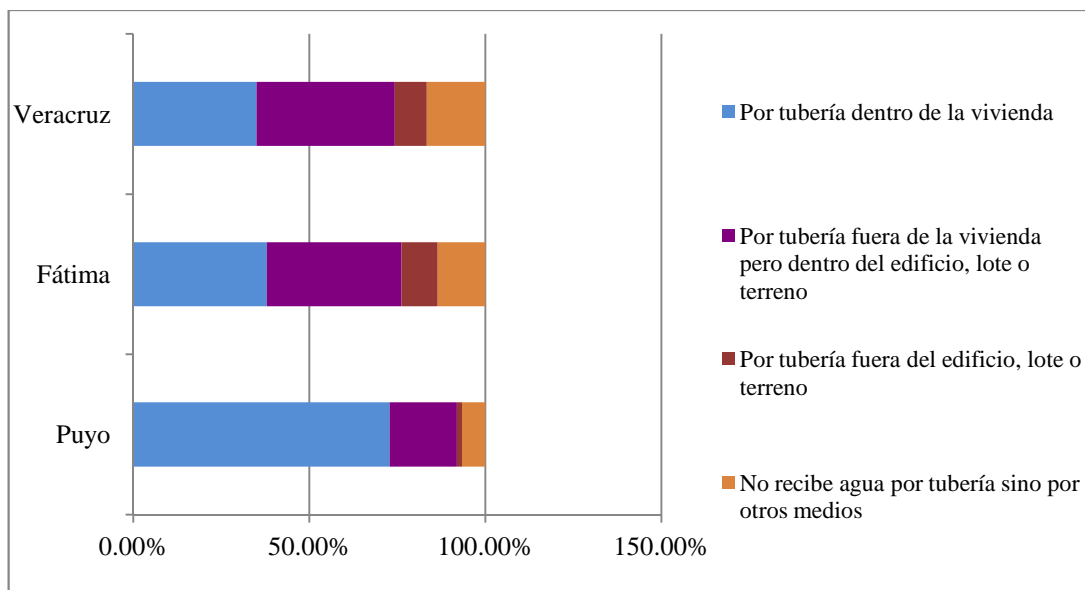
De acuerdo al INEC (2010), en la parroquia urbana, la mayor parte de las viviendas reciben el servicio mediante conexiones domiciliarias dentro de la vivienda (Tabla 5 y Gráfico 2). En las parroquias rurales predomina en cambio la dotación externa a la vivienda. Esto tiene también relación con el sistema de eliminación de aguas residuales.

**Tabla 5.** Dotación de agua en las parroquias Puyo, Fátima y Veracruz, 2010

Parroquia	Por conexiones domiciliarias	Por tubería fuera del edificio, lote o terreno	No recibe agua por tubería sino por otros medios	Total
Puyo	91.90%	1.45%	6.65%	<b>100.00%</b>
Fátima	76.17%	10.28%	13.55%	<b>100.00%</b>
Veracruz	74.29%	9.05%	16.67%	<b>100.00%</b>

Fuente: INEC (2010)

Elaboración: Autor



**Gráfico 2.** Dotación de agua (en porcentaje) en las parroquias Puyo, Fátima y Veracruz, 2010

Fuente: INEC (2010)

Elaboración: Autor

### 3.2.5. Saneamiento

La ciudad del Puyo tiene sistema de alcantarillado en su mayoría, la zona rural posee alcantarillado en las cabeceras parroquiales, las comunidades más alejadas no poseen este servicio. En la mayoría de casos, el descargue de aguas servidas se da directamente a los ríos y quebradas causando un alto grado de contaminación. Estos valores se observan en la Tabla 6

Con respecto al alcantarillado, su cobertura alcanza el 74.47% del área urbana, mientras que en las parroquias rurales consideradas no supera el 25%. En estas, la eliminación de aguas residuales se da hacia pozos sépticos y en menor medida, en pozos ciegos. A pesar de esto, existe un porcentaje importante de viviendas que

descargan directamente a los cursos hídricos (más del 9% de las viviendas en el área urbana) (INEC, 2010).

Respecto a la cobertura de servicios de saneamiento en el área urbana, las viviendas que no cuentan con dotación alguna de servicios de alcantarillado se encuentran principalmente en las zonas de expansión urbana reciente, como el área drenada del Río Churoyacu, el margen norte del Río Pambay y el margen oriental del Río Puyo a partir de la desembocadura del Río Chilcayacu. En ellas, la eliminación de las descargas se dirige hacia pozos sépticos y en buena parte hacia el río Puyo o esteros afluentes. Debe señalarse además que las aguas de las viviendas colectadas a redes de alcantarillado no son sometidas a tratamiento alguno y son descargadas igualmente en el río o sus afluentes (Citayacu, Pindo Grande) en puntos situados en la periferia del área Urbana.

**Tabla 6.** Saneamiento de aguas residuales en las parroquias Puyo, Fátima y Veracruz, 2010

Parroquia	Conectado a red pública de alcantarillado	Conectado a pozo séptico	Conectado a pozo ciego	Con descarga directa al mar, río, lago o quebrada	Letrina	No tiene	Total
Puyo	74.47%	9.45%	3.91%	9.55%	0.64%	1.98%	<b>100.00%</b>
Fátima	24.77%	29.91%	10.28%	7.94%	5.61%	21.50%	<b>100.00%</b>
Veracruz	22.62%	34.05%	19.29%	6.67%	1.67%	15.71%	<b>100.00%</b>
<b>TOTAL</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>3</b>

Fuente: INEC (2010)

Elaboración: Autor

### 3.3. Clima

La provincia de Pastaza presenta un clima subtropical en la parte occidental y ecuatorial en la zona oriental. Debido a su altitud de 950 metros sobre el nivel del

mar y su abundante vegetación cuenta con un clima templado húmedo. Las temperaturas máximas registradas alcanzan los 31.0 °C y las mínimas 8,6 °C, registrándose un promedio de 20,3 °C. La evapotranspiración potencial es menor que la precipitación por lo cual no existen meses secos, teniendo una humedad atmosférica promedio anual del 89%. La variación de temperatura también es producida por las diferentes alturas del terreno y la capa vegetal que las cubre.

Por las condiciones climáticas existe una gran presencia de nubes por lo que la heliofanía promedio es del 23%.

#### **3.4. Caudales y parámetros hidrológicos**

Los caudales (determinados conforme a lo señalado en el Capítulo 2.3.3) y otros parámetros hidrológicos del Río Puyo en cada uno de los puntos de control, así como de los principales afluentes, se presentan en la Tabla 7. En este puede observarse que a lo largo de los 16 km que abarca el tramo estudiado, el caudal aumenta aproximadamente en 18 m<sup>3</sup>/s en este tramo, desde los 3.26 m<sup>3</sup>/s en la población de Fátima hasta 21.1 m<sup>3</sup>/s en Unión Base. Este incremento se debe al aporte de los afluentes naturales (Aproximadamente 11.6 m<sup>3</sup> por parte de los seis principales afluentes, presentados en la misma tabla) y a la infiltración de aguas subterráneas.

En los valores presentados en la Tabla 7, puede verse que el ancho del río varió entre 12.66 m en el punto más estrecho (Puente Las Américas, Punto 2) y 47.55 m en el punto más ancho (bajo la desembocadura del Río Sandalias, Punto 7). La profundidad media por su parte, osciló entre los 0.71 m en los puntos Fátima y

Puente Las Américas y 1.07 m en el Punto 5 (Estadio). Debe considerarse sin embargo, que los puntos donde se tomaron las mediciones fueron establecidos de preferencia en segmentos lóticos (rápidos), estimándose que en algunas pozas y segmentos lénticos (Como la desembocadura del río Churoyacu), la profundidad máxima del río supera los 5m. Estas variaciones en diámetro y profundidad guardan relación con las características físicas del cauce y la irregular topografía del terreno.

**Tabla 7.** Parámetros hidrológicos en los puntos de control del Río Puyo y sus principales afluentes. 2012

Punto N°	Denominación	Diámetro (m)	Profundidad media (m)	Área Mojada (m <sup>2</sup> )	Velocidad media (m/s)	Velocidad media (km/día)	Caudal (m <sup>3</sup> /s)
<b>Puntos de control en el Río Puyo</b>							
1	Fátima	13.31	0.71	4.67	0.69	59.62	3.26
2	Puente Las Américas	12.66	0.71	5.33	0.70	60.48	3.77
3	Paseo Turístico	17.76	0.91	7.83	0.78	67.39	6.13
4	Malecón	18.00	0.76	7.50	1.17	101.09	8.92
5	Estadio	18.61	1.07	9.39	1.12	96.77	10.67
6	Puente Vía Macas	35.90	0.79	13.62	0.91	78.62	12.51
7	Sandalias	47.75	0.85	20.48	0.88	76.03	18.08
8	Unión Base	37.91	1.06	22.99	0.82	70.85	21.10
<b>Puntos de control en desembocaduras de afluentes</b>							
a1	Río Churoyacu	9.4	1.24	4.56	0.29	25.06	1.33
a2	Río Pambay	11.7	0.92	7.00	0.30	25.92	2.10
a3	Río Citayacu	6.87	1.27	5.74	0.15	12.96	0.86
a4	Río Chilcayacu	13.4	1.14	3.60	0.46	39.74	1.65
a5	Río Sandalias	18.8	1.05	10.11	0.48	41.47	4.82

**Fuente:** Información de campo

**Elaboración:** Autor

En relación al caudal del río, pudo determinarse que a lo largo de los 16 km que abarca el tramo estudiado, aumenta aproximadamente en 18 m<sup>3</sup>/s, desde los 3.26 m<sup>3</sup>/s en la población de Fátima (Punto 1) hasta 21.1 m<sup>3</sup>/s en Unión Base (Punto 8). Este incremento se debe al aporte de los afluentes naturales (Aproximadamente 11.6

m<sup>3</sup> por parte de los seis principales afluentes, presentados en la misma tabla) y a la infiltración de aguas subterráneas. En cuanto a la velocidad media del agua, esta osciló entre los 0.69 m/s antes del dique de Fátima (Punto 1) y los 1.17 m/s frente al malecón del Barrio Obrero (Punto 2).

### **3.5. Calidad de Agua**

A lo largo del tramo del río estudiado, los parámetros de calidad de agua arrojaron valores que varían a lo largo de sus casi 16 km. En los dos parámetros estudiados (DBO<sub>5</sub>, OD) puede observarse una tendencia creciente en términos de polución (decreciente en calidad) desde la parroquia Fátima hasta el área urbana de la ciudad de Puyo, en tanto que la misma se invierte desde esta última hasta la población de Unión Base.

#### **3.5.1. Oxígeno Disuelto (OD)**

El parámetro Oxígeno Disuelto, como indicador de la calidad de agua en relación directa a su concentración en el agua en mg/l, experimenta cambios a lo largo del tramo hídrico estudiado (Tabla 8 y Gráfico 3), describiendo una tendencia caracterizada de la siguiente manera:

El oxígeno disuelto decrece desde el km. 0 (Fátima) hasta el km. 7 (Paseo Turístico), lo cual puede deberse al aumento progresivo en la existencia de descargas líquidas domésticas y a la progresivamente menor presencia de rápidos y puntos turbulentos capaces de oxigenar el agua.



Entre el km 7 (Paseo Turístico) y el km 12.5 (Vía Macas), tramo caracterizado por la mayor densidad poblacional, se observa una tendencia irregular en la concentración del parámetro que puede deberse tanto a la mayor presencia de descargas líquidas que aumenta la concentración de materia orgánica (y por ende la disminución de oxígeno) como a los patrones físicos del cauce que contribuyen ligeramente a la oxigenación de las aguas. De todas maneras, los niveles de OD en este tramo no superan los 7.08 mg/l en promedio.

Entre el km. 12.5 y el km. 16, la concentración del parámetro experimenta un ascenso gradual hasta poco antes de la población de Unión Base, alcanzando los 7.55 mg/L, lo cual es atribuible a la mayor presencia de afluentes provenientes de áreas poco pobladas que diluyen la materia orgánica de las aguas y al grado de autodepuración del río favorecido por la presencia de rápidos. De todas maneras, hacia el final del tramo en estudio, el parámetro desciende nuevamente hasta los 7.30 mg/L, tendencia que puede deberse a las descargas generadas en el asentamiento urbano antes mencionado.

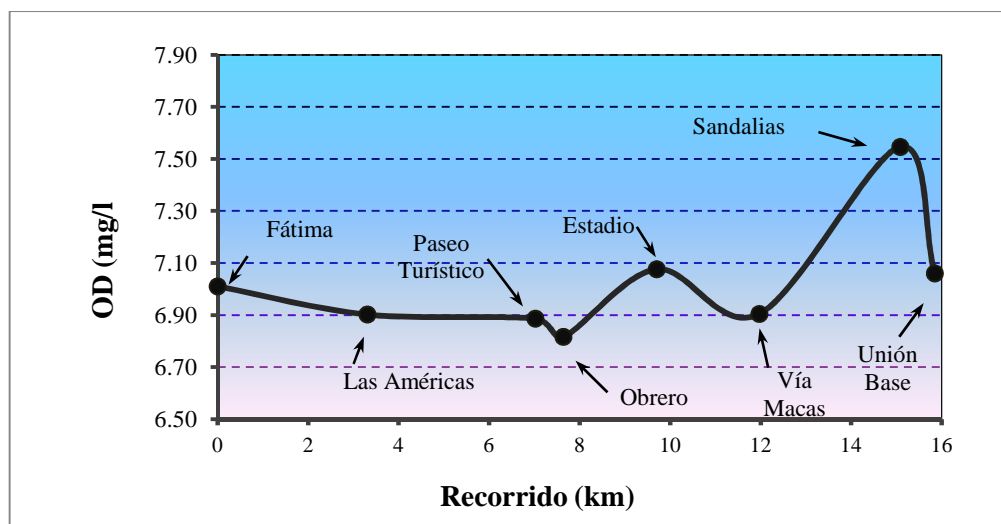
La variación en el parámetro es influenciada por el aporte de aguas mediante los principales afluentes en el curso estudiado. En el Gráfico 4 se observa la concentración del parámetro en cada uno de estos afluentes y su relación con la concentración del mismo en el curso del receptor.

**Tabla 8.** Concentración promedio y mínima de Oxígeno Disuelto en los puntos de control del Río Puyo y sus principales afluentes. 2012

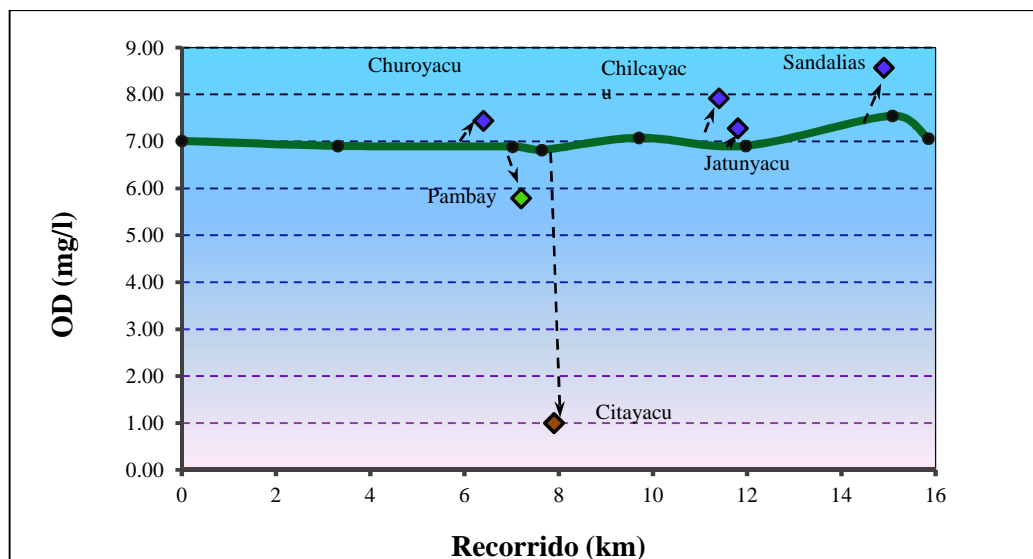
Punto N°	Denominación	OD promedio (mg/L)	OD mínimo (mg/L)	Norma Técnica Recreación* (mg/L)	Norma Técnica Conservación de Flora y Fauna* (mg/L)
<b>Río Puyo</b>					
1	Fátima	7.01	5.44	6	6
2	Puente Las Américas	6.90	6.15	6	6
3	Paseo Turístico	6.89	6.33	6	6
4	Malecón (Barrio Obrero)	6.82	5.54	6	6
5	Estadio	7.08	5.89	6	6
6	Puente Vía Macas	6.90	6.24	6	6
7	Sandalias	7.55	5.58	6	6
8	Unión Base Bajo	7.06	6.10	6	6
<b>Afluentes</b>					
a1	Río Churoyacu	7.44	7.44	6	6
a2	Río Pambay	5.79	5.28	6	6
a3	Río Citayacu	1.00	1.00	6	6
a4	Río Chilcayacu	7.92	7.92	6	6
a5	Río Jatunyacu	7.28	7.28	6	6
a6	Río Sandalias	8.57	8.57	6	6

\* \* Tulas, Libro VI, Anexo 1

Se destacan en rojo los valores que incumplen la normativa



**Gráfico 3.** Concentración de Oxígeno Disuelto a lo largo del Río Puyo en el tramo Fátima-Unión Base



**Gráfico 4.** Concentración de Oxígeno Disuelto en los afluentes del río Puyo en el tramo Fátima-Unión Base y su relación respecto al curso receptor.

### 3.5.2. Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO)

Se utilizó el parámetro Demanda Bioquímica de Oxígeno a los 5 días para establecer el nivel de contaminación debida a materia orgánica oxidable por microorganismos en un periodo de incubación de 5 días a 20 °C. Este indicador es considerado bastante confiable para determinar la contaminación por materia orgánica ya que recrea en laboratorio las condiciones en la cual esta se degrada en condiciones naturales (Romero, 2010). Los resultados se presentan en la Tabla 9.

En el Gráfico 5 se observa la variación del parámetro en mg/l a lo largo del río en el tramo estudiado. Puede observarse una tendencia casi 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 y se intensifica al llegar al barrio “La Isla”, lo cual es atribuible por la presencia de descargas directas en el río y mediante los

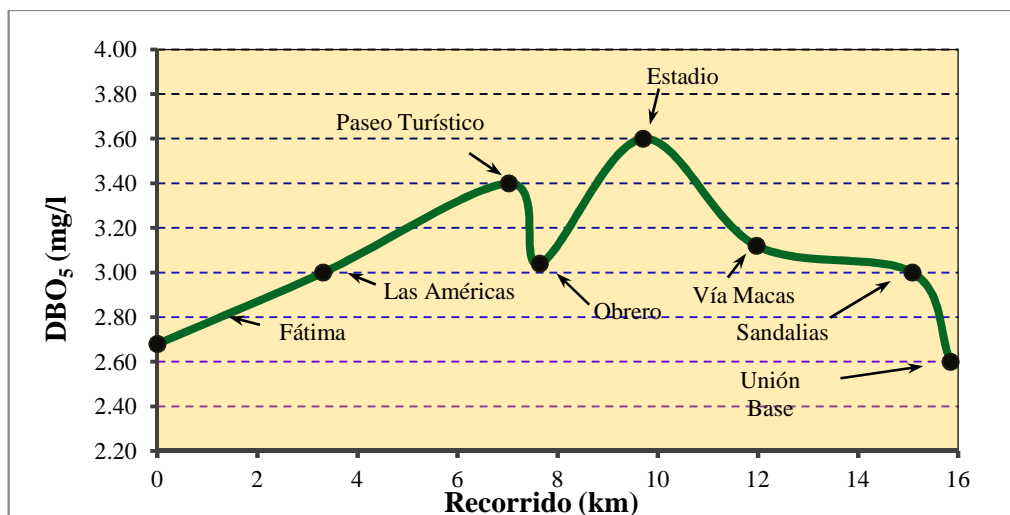
afluentes Pambay y Citayacu. Luego de este punto, el parámetro decrece hasta un valor de 3 mg/l en el punto de control “Estadio” y vuelve a ascender hasta 5.9 mg/l en el punto de control N° 9 (ubicado antes de la desembocadura del río Chilcayacu). Posterior a este punto la tendencia decrece nuevamente hasta los 3 mg/l en la población de unión base.

**Tabla 9.** Concentración promedio y máxima de Demanda Bioquímica de Oxígeno a los 5 días (DBO<sub>5</sub>) en los puntos de control del Río Puyo y sus principales afluentes. 2012

Punto N°	<u>Denominación</u>	DBO <sub>5</sub> * promedio (mg/L)	DBO <sub>5</sub> * máximo (mg/L)	Norma Técnica Conservación de Flora y Fauna ** (mg/L)
1	Fátima	2.68	4.00	20
2	Puente Las Américas	3.00	6.00	20
3	Paseo Turístico	3.40	6.00	20
4	Malecón (Barrio Obrero)	3.04	4.20	20
5	Estadio	3.60	5.00	20
6	Puente Vía Macas	3.12	4.00	20
7	Sandalias	3.00	5.00	20
8	Unión Base Bajo	2.60	4.00	20
a1	Río Churoyacu	3.00	3.00	20
a2	Río Pambay	4.00	4.00	20
a3	Río Citayacu	2.50	3.00	20
a4	Río Chilcayacu	19.00	22.00	20
a5	Río Jatunyacu	3.00	3.00	20
a6	Río Sandalias	4.00	4.00	20

\* **Fuente:** Informes de Análisis de Aguas, Anexo 2

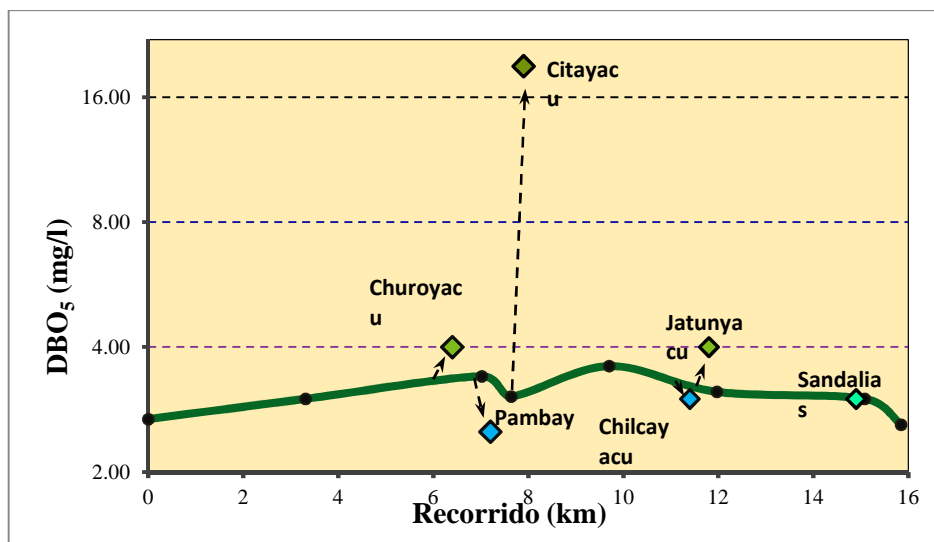
\*\* **Fuente:** Tulas, Libro VI, Anexo 1



**Gráfico 5.** Concentración de DBO<sub>5</sub> a lo largo del Río Puyo en el tramo Fátima-Unión Base

La variación en el parámetro DBO<sub>5</sub> es influenciada por el aporte de aguas mediante los principales afluentes en el curso estudiado. En el Gráfico 6 se observa la concentración del parámetro en cada uno de estos afluentes y su relación con la concentración del mismo en el curso del receptor. En este puede observarse que ciertos afluentes como Churoyacu, Citayacu y Jatunyacu contribuyen a elevar el parámetro significativamente, lo cual puede atribuirse a la carga de aguas residuales que dichos afluentes acarrear al atravesar centros poblados.

El caso del afluente Citayacu es particularmente notable, ya que a pesar de su bajo caudal, se trata de un curso hídrico altamente contaminado por descargas domésticas y otras tantas provenientes de lavadoras de vehículos. Tal es así que la apariencia de las aguas en el Río Puyo cambia de una manera visible en un recorrido de aproximadamente 100 m luego de la desembocadura (Fotografía 1). La modelación del parámetro a partir de éste y los demás afluentes (Capítulo 3.4) contribuirá a explicar los cambios originados en el receptor debidos a sus aportes.



**Gráfico 6.** Concentración de DBO<sub>5</sub> en los afluentes del río Puyo en el tramo Fátima-Unión Base y su influencia en el curso receptor.



**Fotografía 1.** Desembocadura del Río Citayacu en el Río Puyo. Puede observarse el cambio en el aspecto del agua del receptor por efecto del afluente

### **3.6. Modelamiento de oxígeno disuelto y materia orgánica**

El modelamiento de oxígeno disuelto y materia orgánica en el tramo estudiado se lo desarrolló en las siguientes etapas:

Modelación de materia orgánica:

- Cálculo de la constante cinética (k)
- Cálculo de la  $DBO_U$
- Balance de masa en desembocadura de afluentes
- Desarrollo del Modelo

Modelación de oxígeno disuelto:

- Cálculo de la concentración de saturación de oxígeno disuelto.
- Balance de masa en desembocadura de afluentes
- Cálculo de déficit inicial
- Cálculo de constante de reaireación
- Desarrollo del Modelo

#### **3.6.1. Modelación de materia orgánica**

##### **3.6.1.1. Cálculo de k**

La modelación de la materia orgánica se basa en un modelo de reacción que supone que la materia orgánica presente en el agua varía en el tiempo, conforme a la Ecuación (1) de primer orden (Crites & Tchobanoglous, 2000). Esta es la base para la modelación de materia orgánica desarrollada en este trabajo

$$\text{DBO}_r = \text{DBO}_U (e^{-k \cdot t}) \quad (1)$$

Donde:  $\text{DBO}_r$  = Materia orgánica en un punto establecido

$\text{DBO}_U$  = DBO carbonácea última o total

$k$  = Constante cinética (k) en días<sup>-1</sup>

$t$  = tiempo (en días)

El cálculo de la constante cinética  $k$  se lo desarrolló mediante la Ecuación (2), despejada de la Ecuación (1), a partir de información recopilada para el parámetro  $\text{DBO}_5$  en los análisis de aguas realizados (Capítulo 3.5.2) como datos para Concentración.

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

Donde:  $C$  = ( $\text{DBO}_5$ ) en un punto establecido

$C_0$  = Materia orgánica en un punto inicial, anterior a L

$k$  = Constante de la velocidad de la reacción (k), días<sup>-1</sup>

$t$  = Tiempo (días)

$x$  = Recorrido o desplazamiento desde el punto inicial (km)

$v$  = Velocidad del fluido (km/día)

Desarrollo:

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

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

$$k = \frac{\ln(3.0/3.12)}{3.1 \text{ km} / (76.03 \text{ km/día})} \quad \begin{array}{l} \text{(datos provenientes de Tabla 9)} \\ \text{(datos provenientes de Tablas 1 y 7)} \end{array}$$



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

Los resultados obtenidos para los siete puntos del río se presentan en la Tabla 10. Luego del mismo se eligió el valor de **0.96** por ser más representativo para las condiciones del río.

**Tabla 10.** Resultados de la estimación de la constante de recuperación (k)

Punto referencial	X* (km)	V** (km/día)	Co*** (C en el punto anterior) (mg/L)	C*** (mg/L)	k (Calculado)
2 Puente Las Américas	3.3	60.48	2.68	3.00	-2.06
3 Paseo Turístico	7.0	67.39	3.00	3.40	-2.27
4 Malecón (Barrio Obrero)	7.6	101.09	3.40	3.04	18.29
5 Estadio	9.7	96.77	3.04	3.60	-7.94
6 Puente Vía Macas	12.0	78.62	3.60	3.12	4.96
7 Sandalias	15.1	76.03	3.12	3.00	<b>0.96</b>
8 Unión Base Bajo	15.8	70.85	3.00	2.60	13.29
<b>k elegida:</b>					<b>0.96</b>

\* Fuente: Tabla 1

\*\* Fuente: Tabla 7

\*\*\* Fuente: Demanda Bioquímica de Oxígeno medida en cada punto (Tabla 9)

NOTA: No se consideran valores para el Punto 1 pues se considera al mismo como punto de partida (x= 0 km)

### 3.6.1.2. Cálculo de la DBO<sub>U</sub>

De acuerdo a Crites & Tchobanoglous (2000), la *Demanda Bioquímica de Oxígeno última carbonácea* (DBO<sub>U</sub> ó L) puede definirse como el oxígeno requerido para la oxidación del carbono orgánico presente en el agua incluyendo procesos de oxidación directa, síntesis de materia celular y respiración endógena por parte de los microorganismos presentes. La DBO<sub>U</sub>, indicador de materia orgánica remanente luego de la degradación de la misma, se calcula mediante la Ecuación (3), despejada desde la Ecuación (1)

$$DBO_U = \frac{DBO_t}{(1 - e^{-kt})} \quad (3)$$

Donde:  $DBO_U$  = DBO carbonácea última

$DBO_t$  = DBO en función de un tiempo determinado (días)

$k$  = Constante cinética reacción de primer orden, en días<sup>-1</sup>

$t$  = Tiempo de incubación considerado

Con base en datos obtenidos para el indicador  $DBO_5$  en ocho puntos del Río Puyo y sus afluentes, el desarrollo de la Ecuación (3) es el siguiente:

(Punto 2, Las Américas):

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

$$DBO_U = \frac{2.68 \text{ mg/L}}{(1 - e^{-5 \times 0.96})} \quad \begin{array}{l} \text{(Datos provenientes de Tabla 9)} \\ \text{(Datos provenientes de Tabla 10, simplifica unidades)} \end{array}$$

$$DBO_U = 2.70 \text{ mg/L}$$

Debe mencionarse que para el cálculo de la  $DBO_U$  en los 8 puntos del Río Puyo se tomó en cuenta la constante  $k$  calculada por el río (0.96 días<sup>-1</sup>) mientras que para los afluentes se tomaron valores propuestos por Crites & Tchobanoglous (2000) respecto a ríos de velocidad baja ( $k = 0.4$ , río Citayacu) y ( $k = 0.92$ , afluentes restantes). Los resultados del cálculo para los 8 puntos establecidos se presentan en la Tabla 11

**Tabla 11.** Cálculo de la DBO<sub>U</sub> 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)
<b>Puntos en el Río Puyo</b>			
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	Sandalias bajo	3.00	3.03
8	Unión Base Bajo	2.60	2.62
<b>Puntos en afluentes</b>			
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

\* Datos provenientes de Tabla 9

\*\* Aplicación de la Ecuación (3)

### 3.6.1.3. Desarrollo del modelo

Con los datos obtenidos en los procedimientos previos, se procedió a la modelación de la concentración de materia orgánica a lo largo del río a partir de la DBO<sub>U</sub>. El modelo se desarrolla a manera de un procedimiento secuencial de tipo “**degradación-balance-degradación**” en el cual se calcula la degradación de la materia orgánica mediante la ecuación del modelo en los tramos en los que no hay aportes de la misma, mediante la ecuación (4). En el caso de existir en el río el aporte de materia orgánica o bien, una dilución en la misma por efecto de afluentes o descargas, como es el caso del estudio, es necesario incorporar en el cálculo de las concentraciones modeladas un **balance de masa** en los puntos de confluencia de las

corrientes. Para el cálculo de la concentración resultante se empleó la Ecuación (5), tomada de Crites & Tchobanoglous (2000)

$$L_B = L_A (e^{-kt}) \quad (4)$$

Donde:  $L_A$  = DBO<sub>U</sub> en un punto A

$L_B$  = DBO<sub>U</sub> en un punto B, posterior al punto A

$k$  = Constante de recuperación del río

$t$  = Tiempo en días transcurrido entre el punto A y el punto B

$$C = \frac{C_r Q_r + C_a Q_a}{Q_r + Q_a} \quad (5)$$

Donde:  $C$  = Concentración resultante

$C_r$  = Concentración en el río principal

$C_a$  = Concentración en el afluente

$Q_r$  = Caudal del río principal

$Q_a$  = Caudal del afluente

El desarrollo del modelo se ejemplifica a continuación:

**Degradación 1** (Para el punto 2, Puente “Las Américas”):

$$L_B = L_A (e^{-kt})$$

$$L_B = 2.70 (e^{-kt}) \quad (\text{Dato de } L \text{ proveniente de Tabla 11})$$

$$L_B = 2.70 (e^{0.96 \times 0.043}) \quad (\text{Dato de } k \text{ proveniente de Tabla 10*})$$

$$L_B = 2.70 (e^{0.96 \times 0.043}) \quad (\text{Dato de } t, \text{ función de } x, \text{ Tabla 1 y } v, \text{ Tabla 7})$$

$$L_B = 2.59 \text{ mg/L}$$

Debe indicarse que se utilizó un valor  $k$  de 0.96 para la modelación en todos los puntos, elegido por su representatividad.

**Degradación 2:** (Para el Río Puyo, antes de la confluencia del río Churoyacu):

$$L_B = 2.59 (e^{-kt}) \quad (\text{Dato de } L \text{ proveniente de Tabla 11})$$

$$L_B = 2.59 (e^{-0.96 \times 0.084}) \quad (\text{Dato de } k \text{ proveniente de Tabla 10})$$

$$L_B = 2.59 (e^{-0.96 \times 0.084}) \quad (\text{Dato de } t, \text{ función de } x, \text{ Tabla 1 y } v, \text{ Tabla 7})$$

$$L_B = 2.49 \text{ mg/L}$$

**Balance de Masa 1** (En la confluencia del río Churoyacu):

$$C = \frac{C_r Q_r + C_a Q_a}{Q_r + Q_a}$$

$$C = \frac{2.49 \text{ mg/L} \times 3.77 \text{ m}^3/\text{s} + 4.04 \text{ mg/L} \times 1.33 \text{ m}^3/\text{s}}{3.77 + 1.33 \text{ m}^3/\text{s}}$$

(Datos de  $Q$  proveniente de Tabla 7,  $C_a$  proveniente de Tabla 11)

$$C = 2.90 \text{ mg/L}$$

**Degradación 3** (Para el punto 3, Paseo Turístico):

$$L_B = 2.90 (e^{-kt}) \quad (\text{Dato de } L \text{ proveniente de Tabla 11})$$

$$L_B = 2.90 (e^{-0.96 \times 0.084}) \quad (\text{Dato de } k \text{ proveniente de Tabla 10})$$

$$L_B = 2.90 (e^{-0.96 \times 0.084}) \quad (\text{Dato de } t, \text{ función de } x, \text{ Tabla 1 y } v, \text{ Tabla 7})$$

$$L_B = 2.87 \text{ mg/L}$$

$$L_B = 2.87 \text{ mg/L}$$

Los resultados de la modelación realizada para los 8 puntos de control así como el balance de masa en los afluentes, se presenta en la Tabla 12 y su tendencia se representan en el Gráfico 7.

**Tabla 12.** Modelación de materia orgánica en ocho puntos del Río Puyo

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

\* En fondo blanco (1, 2, 3...): Puntos de muestreo en el Río Puyo; En fondo gris (r1, r2, r3...): Estimaciones en puntos del Río Puyo previos a desembocaduras de afluentes; En fondo café (a1, a2, a3...): Afluentes.

En el análisis de la modelación realizada conforme a la Ecuación (5) y representada en el Gráfico 7 destacan los siguientes aspectos respecto al comportamiento del río:

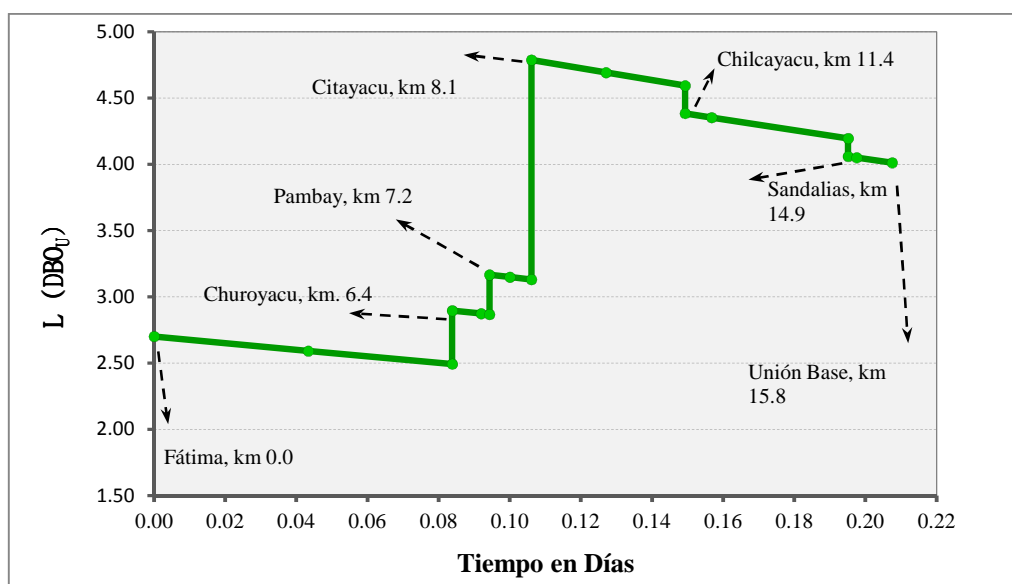
- Los valores modelados para la concentración de materia orgánica a lo largo del curso estudiado oscilan entre 2.49 y 2.79 mg/L, variando por consiguiente, la calidad de agua. De acuerdo a la clasificación sapróbica de calidad de agua del ENA, citada en Romero (2010), se pueden inferir dos condiciones claramente diferenciadas en la calidad de agua en base a la DBO:
  - Una zona de aguas *oligosapróbicas*, comprendida entre los km 1 y 6.4 (Fátima bajo y paseo turístico) en las cuales la baja concentración de materia orgánica favorece el desarrollo de vida acuática y uso humano recreativo y,
  - Una zona de aguas *β-mesosapróbicas*, comprendida entre los 6.4 km y el transcurso restante del tramo estudiado, además del área del Dique de Fátima, al inicio del mismo. En esta zona se estiman condiciones medias de calidad en las que se desarrolla la vida acuática con ciertos desequilibrios que pueden dificultar su depuración (como crecimiento acelerado de algas a causa de la eutrofización).

Cabe mencionar que el sistema de clasificación mencionado considera otros factores de calidad además de la DBO, por lo cual la interpretación realizada debe ser considerada únicamente de manera referencial, pues otros parámetros como DQO y coliformes fecales, podrían incidir negativamente en la calidad de agua.

- La conformación física del río (abundancia de rápidos y otros puntos de flujo acelerado) permite asumir que existirán condiciones de oxigenación capaces

de degradar la materia orgánica disminuyendo parcialmente la concentración de la misma. De esta manera, mientras la concentración de L alcanza su mayor valor luego de la desembocadura del Río Citayacu (km 8.1) 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.

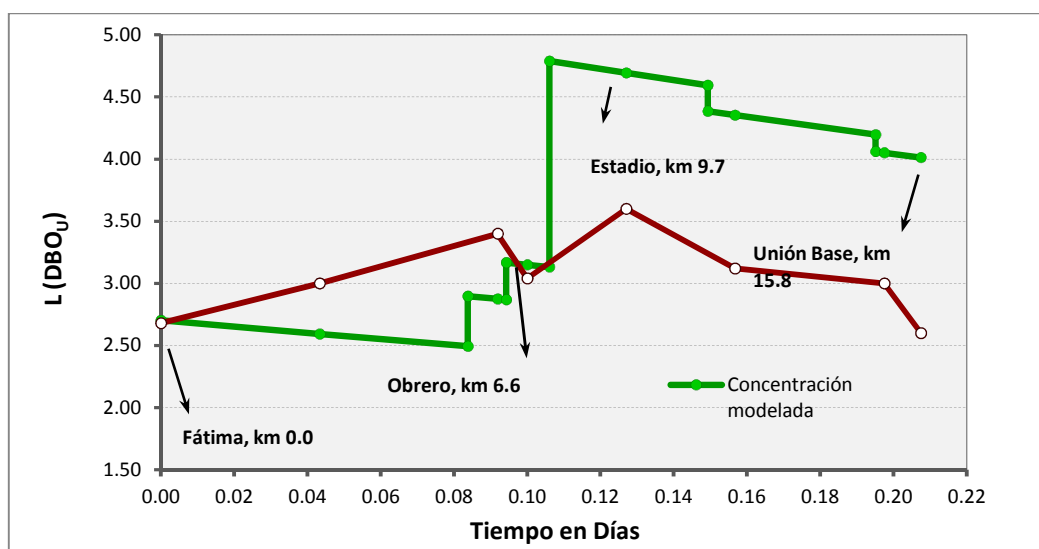
- A pesar de lo expresado anteriormente, la concentración de materia orgánica aportada al río Puyo por los afluentes (especialmente los provenientes de la zona urbana), no podría ser degradada en su totalidad por las condiciones naturales del río, por lo menos hasta el final del tramo estudiado. De esta manera, no se alcanzaría la concentración de L existente antes del aporte de los afluentes, como en el caso del punto situado en el Puente las Américas (km 3.3), con 2.59 mg/L



**Gráfico 7.** Variación de la concentración de materia orgánica a lo largo del tramo medio del Río Puyo, estimada mediante modelación de la DBO.

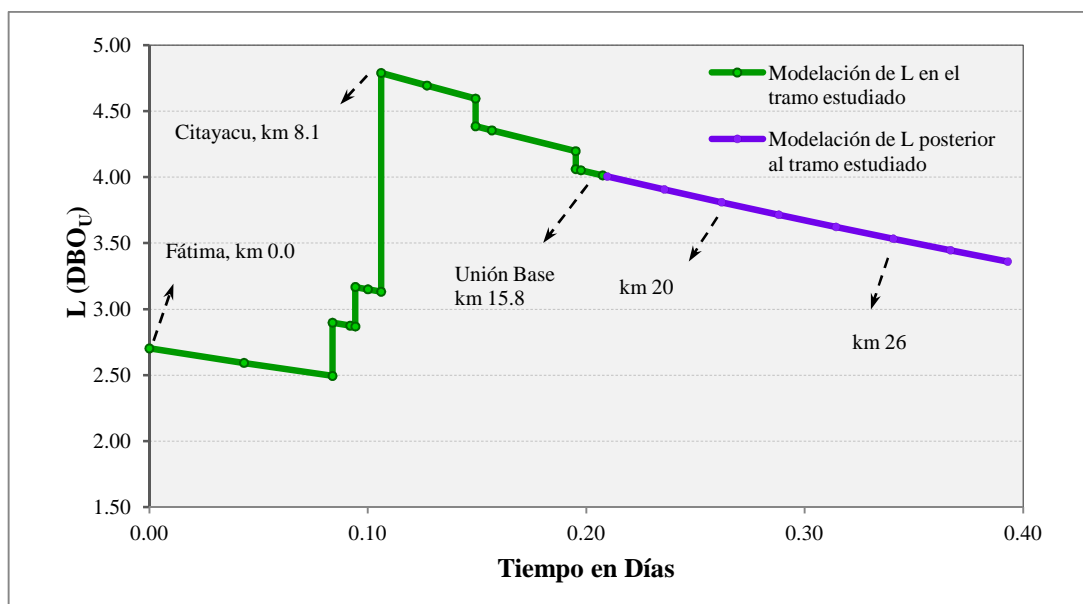


- Si se compara los resultados de la modelación realizada con los datos de campo de la  $DBO_5$  medidos (Tabla 9 y Gráfico 5) se encuentran diferencias especialmente en torno a las concentraciones a partir de la segunda mitad del tramo estudiado. Esto puede deberse a factores de dilución como pequeños afluentes, percolados del suelo o precipitaciones no considerados en el proceso de modelamiento.
- En contraposición a las diferencias existentes entre los valores calculados mediante el modelo y el terreno en la primera parte del tramo, las tendencias de ambos se asemejan a partir del km 9.7 hasta el final del tramo modelado (Gráfico 8). Esto coincide con la salida del río del área urbana y la consecuente disminución en los aportes de materia orgánica, especialmente por descargas difusas, que podrían alterar el comportamiento del modelo.



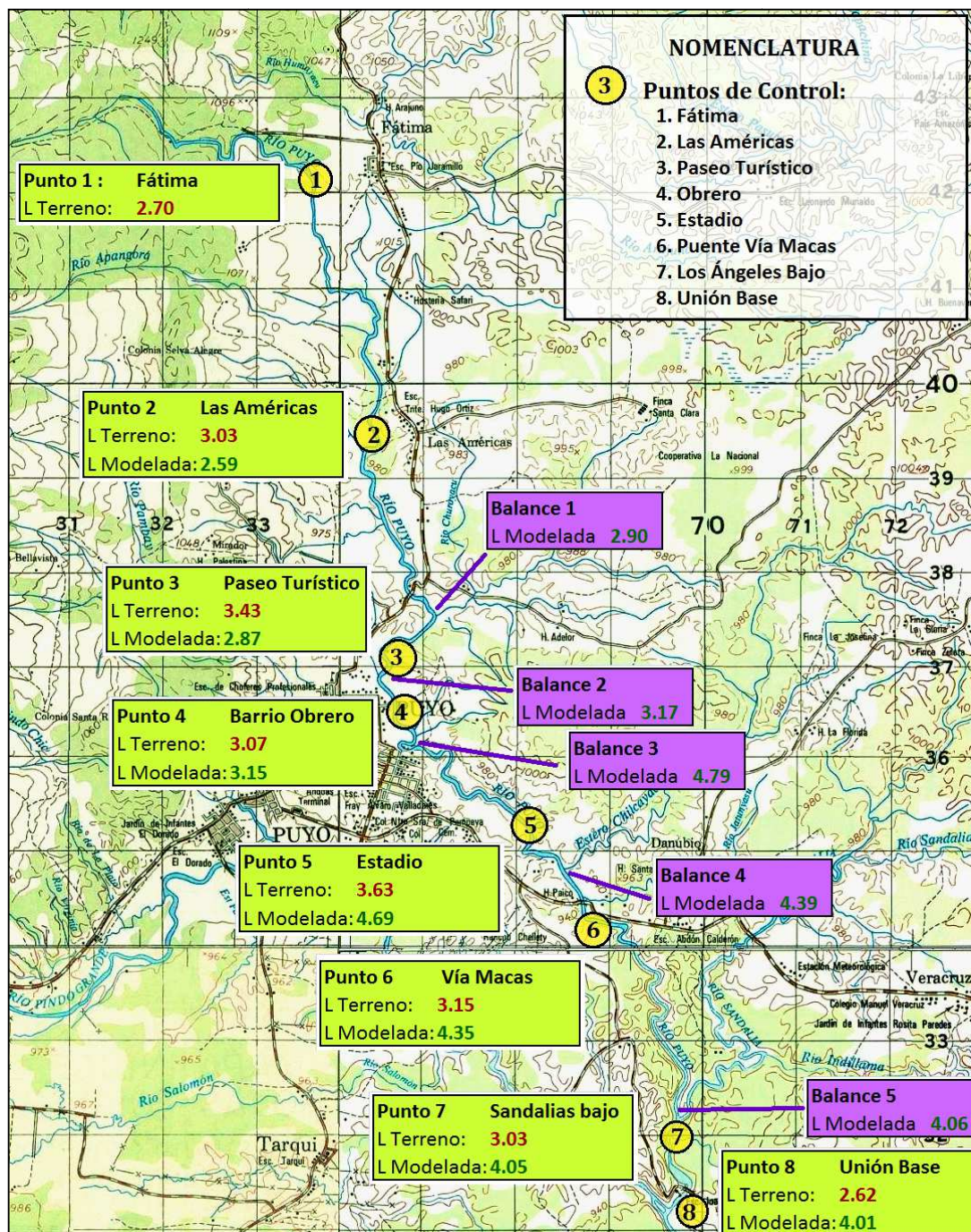
**Gráfico 8.** Comparación entre la concentración de materia orgánica modelada y el promedio de datos medidos (terreno) para la  $DBO_5$ , en el tramo medio del Río Puyo, estimada mediante modelación de la DBO.

A fin de estimar el posible comportamiento de la tendencia en la degradación de la materia orgánica, se modeló su concentración río abajo del último punto medido (Gráfico 9). De esta manera, se estima que teóricamente, la concentración de L podría disminuir por debajo de los 3.5 mg/L (aproximándose al valor medido promedio más bajo, como es “Puente Las Américas”, km 3). Esto ocurriría a aproximadamente 26 km desde el punto de partida (Fátima) (0.34 días), sin considerar diluciones adicionales por efecto de afluentes que desemboken bajo el tramo estudiado, así como nuevos aportes de materia orgánica. Sin embargo, lo último presenta pocas probabilidades de incrementar significativamente la concentración, dado que este tramo bajo, atraviesa zonas de escasa población humana. De esta manera puede considerarse que el Río Puyo puede autodepurar una importante proporción de la materia orgánica recibida, hasta su desembocadura en el Río Pastaza.



**Gráfico 9.** Variación de la concentración de materia orgánica posterior al tramo medio del Río Puyo, estimada mediante modelación de la DBO.

La ubicación cartográfica de las concentraciones modeladas y del terreno se representa en el Mapa 5



**Mapa 5.** Valores de L medida (terreno) y L modelada en puntos de control y principales afluentes (ubicación geográfica). 2012.

Fuente cartográfica: IGM (2011) Adaptación: Autor

### 3.6.2. Modelación de Oxígeno Disuelto

#### 3.6.2.1. Cálculo de la concentración de saturación

Para realizar la modelación del consumo de oxígeno y su comportamiento a lo largo del río es necesario determinar previamente la *concentración de saturación del oxígeno disuelto* en el agua. Esta denominación corresponde al indicador denominado por Hernández (2001) como *oxígeno de saturación*, definiéndolo como la mayor cantidad de oxígeno disuelto que puede diluirse en un agua incluyendo procesos de agitación y reaeración. Romero (2010) lo denomina concentración de saturación de oxígeno disuelto, la cual depende de la temperatura, la presión atmosférica y la salinidad. Se ha adaptado la Ecuación (6) a partir de las obras de los autores señalados para la estimación del valor a 1 atmósfera, considerando despreciable el efecto de la salinidad. Para corregir el efecto de la presión atmosférica, se aplica las ecuaciones (7) y (8).

$$\mathbf{OD_{S \cdot 1atm} = 14.652 - 0.41T + 0.008 T^2 - 0.000078 T^3} \quad (6)$$

Donde:  $OD_{S \cdot 1atm}$  = Oxígeno Disuelto de saturación (a 1 Atm)

T = Temperatura (en °C)

$$\mathbf{P = 760 e^{-E/8.005}} \quad (7)$$

$$\mathbf{OD_{SC} = OD_S (P/760)} \quad (8)$$

Donde:  $OD_S$  = Oxígeno Disuelto de saturación corregido

P = Presión en mmHg

E = Elevación en m.s.n.m.

Para el cálculo del ODs se requiere el dato de temperatura del agua (Tabla 13)

**Tabla 13.** Temperatura del agua en 8 puntos del Río Puyo y sus afluentes

Punto N°	Denominación	T °C (mg/L)
1	Fátima	19.37
2	Puente Las Américas	19.55
3	Paseo Turístico	20.35
4	Malecón (Barrio Obrero)	19.88
5	Estadio	20.73
6	Puente Vía Macas	20.55
7	Sandalias bajo	20.45
8	Unión Base	20.82
a1	Río Churoyacu	20.70
a2	Río Pambay	19.80
a3	Río Citayacu	22.80
a4	Río Chilcayacu	20.40
a5	Río Sandalias	20.30

Fuente: Información de campo

El cálculo de la OD<sub>s</sub> se desarrolla a manera de ejemplo para el Punto 1 (Fátima) y el cálculo se lo desarrolla de la siguiente manera:

$$ODS \cdot 1atm = 14.652 - 0.41T + 0.008 T^2 - 0.000078 T^3$$

$$ODS \cdot 1atm = 14.652 - 0.41(19.37) + 0.008 (19.37)^2 - 0.000078 (19.37)^3 \quad (\text{Tabla 13})$$

$$ODS \cdot 1atm = 9.14 \text{ °C}$$

$$P = 760 e^{-E/8.005}$$

$$P = 760 e^{-(948.5)/8.005} \quad (\text{Dato de E: Tabla 1, altitud})$$

$$P = 670.5 \text{ mm Hg}$$

$$OD_{SC} = OD_s (P/760)$$

$$OD_{SC} = 9.14 (670.5/760)$$

$$OD_{SC} = 8.06$$

Los resultados del cálculo del valor para los ocho puntos y cinco afluentes se presentan en la Tabla 14

**Tabla 14.** Cálculo de concentraciones de saturación ( $OD_S$ ) en ocho puntos del río Puyo y cinco afluentes.

Punto N°	Denominación	Altitud* (m.s.n.m.)	T** Temperatura promedio (°C)	$ODS \cdot 1atm$ (mg/L) (Ec. 2)	Presión (mmHg) (Ec. 3)	$OD_S$ (mg/L) (Ec. 4)
<b>Río Puyo</b>						
1	Fátima	1003	19.37	9.14	670.50	8.06
2	Puente Las Américas	948.5	19.55	9.11	675.08	8.09
3	Paseo Turístico	930.4	20.35	8.96	676.61	7.97
4	Malecón	928.3	19.88	9.04	676.78	8.05
5	Estadio	925.5	20.73	8.89	677.02	7.92
6	Puente Vía Macas	923.5	20.55	8.92	677.19	7.95
7	Sandalias bajo	895.2	20.45	8.94	679.59	7.99
8	Unión Base Bajo	885.1	20.82	8.87	680.45	7.94
<b>Afluentes</b>						
a1	Río Churoyacu	935	20.70	8.89	676.22	7.91
a2	Río Pambay	929	19.80	9.06	676.73	8.07
a3	Río Citayacu	927	22.80	8.53	676.89	7.60
a4	Río Chilcayacu	924	20.40	8.95	677.15	7.97
a5	Río Sandalias	896	20.30	8.97	679.52	8.02

\* Tabla 1

\* Tabla 13

### 3.6.2.2. Cálculo del Déficit Inicial

Los valores obtenidos para las concentraciones de saturación ( $OD_S$ ) presentados en la Tabla 14 se relacionaron con las concentraciones de OD medidas en los puntos de control (Tabla 8) mediante la Ecuación (9)

$$D_0 = OD_S - OD \quad (9)$$

$$DO = ODS - OD \quad (\text{Desarrollo para el punto, Fátima})$$

$$DO = 8.06 \text{ mg/L} - 7.01 \text{ mg/L} = 1.05 \text{ mg/L}$$

Los resultados para los ocho puntos considerados se presentan en la Tabla 15

**Tabla 15.** Cálculo de déficit inicial para 8 puntos del Río Puyo y desembocaduras de afluentes

Punto N°	Denominación	OD <sub>s</sub> * (mg/L)	OD** (mg/L)	D <sub>o</sub> (mg/L)
<b>Río Puyo</b>				
1	Fátima	8.06	7.01	1.05
2	Puente Las Américas	8.09	6.90	1.19
3	Paseo Turístico	7.97	6.89	1.08
4	Malecón (Barrio Obrero)	8.05	6.82	1.23
5	Estadio	7.92	7.08	0.84
6	Puente Vía Macas	7.95	6.90	1.05
7	Sandalías bajo	7.99	7.55	0.44
8	Unión Base Bajo	7.94	7.06	0.88
<b>Afluentes</b>				
a1	Río Churoyacu	7.91	7.44	0.47
a2	Río Pambay	8.07	5.79	2.28
a3	Río Citayacu	7.60	1.00	6.60
a4	Río Chilcayacu	7.97	7.92	0.05
a5	Río Sandalias	8.02	7.28	0.45

\* Datos provenientes de Tabla 14

\* Datos provenientes de Tabla 8

### 3.6.2.3. Cálculo de constante de reaireación ( $k_a$ )

Se define como constante de reaireación ( $k_a$ ) a una constante cinética de primer orden que describe la transferencia de oxígeno desde el aire hacia el cuerpo hídrico y mide la velocidad a la que el Oxígeno presente en la atmósfera es transferido a los cuerpos de agua. Se obtiene esta constante a partir de varios modelos a 20° C:

Tomando en cuenta la profundidad media del río, se consideró para el cálculo de la constante  $k_a$  la Ecuación empírica (10), propuesta por O'Connor y Dobbins. (Chin, 2013):

$$K_a = 3.93 \times \frac{V^{1/2}}{H^{3/2}} \quad (10)$$

Donde:  $K_a$  = Constante de reaireación, en días<sup>-1</sup>

$V$  = Velocidad en m/s

$H$  = Profundidad media en m

Desarrollo (Para el punto 2):

$$k_a = 3.93 \times \frac{V^{1/2}}{H^{3/2}}$$

$$k_a = 3.93 \times \frac{0.69^{1/2}}{0.71^{3/2}}$$

$$k_a = 5.46 \text{ días}^{-1}$$

Los resultados del balance para los ocho puntos se presentan en la Tabla 16, obteniéndose un valor promedio para  $k_a$  de 4.80 días<sup>-1</sup>

**Tabla 16.** Cálculo para la constante de reaireación  $k_a$

Punto N°	Denominación	H* Profundidad media (m)	V* Velocidad media (m/s)	$K_a$ (Días <sup>-1</sup> )
1	Fátima	0.71	0.69	5.46
2	Puente Las Américas	0.71	0.70	5.50
3	Paseo Turístico	0.91	0.78	4.00
4	Malecón (Barrio Obrero)	0.76	1.17	6.42
5	Estadio	1.07	1.12	3.76
6	Puente Vía Macas	0.79	0.91	5.34
7	Sandalías bajo	0.85	0.88	4.70
8	Unión Base	1.06	0.82	3.26
<b>PROMEDIO</b>				<b>4.80</b>

\* Tabla 6



### 3.6.2.4. Desarrollo del Modelo

Con los resultados obtenidos para el déficit inicial y los correspondientes a las constantes  $k$  y  $k_a$ , recorrido, velocidad media y  $DBO_U$  modelada se procedió a desarrollar el modelo para Oxígeno Disuelto, estimándose inicialmente el Déficit de oxígeno disuelto ( $D$ ) en cada punto de control mediante la Ecuación (11). Complementariamente, se determinó la concentración modelada, como la diferencia entre la concentración de saturación y el déficit modelado (Ecuación 12). Los resultados de la modelación se presentan en la Tabla 17 y se representan en el Gráfico 10

$$D = \frac{k}{K_a - k} (e^{-k} - e^{-k_a}) L_o + D_o \times e^{-k_a t} \quad (11)$$

Donde:  $D$  = Déficit modelado, mg/L  
 $k_d$  = Constante cinética de primer orden en días<sup>-1</sup>  
 $k_a$  = Constante de reaireación en días<sup>-1</sup>  
 $L_o$  = Concentración inicial de materia orgánica, mg/L  
 $D_o$  = Déficit Inicial, mg/L

$$C = OD_s - D \quad (12)$$

Donde:  $C$  = Concentración de OD modelado, mg/L  
 $OD_s$  = Oxígeno Disuelto de saturación corregido  
 $D$  = Déficit modelado, mg/L

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 mediante la Ecuación (13) considerando los déficit modelados del río y los déficit medidos de los afluentes, llevando a cabo un proceso de tipo “**modelación-balance-modelación**”.

$$C = \frac{C_r Q_r + C_a Q_a}{Q_r + Q_a} \quad (13)$$

Donde:

C = Concentración resultante

C<sub>r</sub> = Concentración en el río principal

C<sub>a</sub> = Concentración en el afluente

Q<sub>r</sub> = Caudal del río principal

Q<sub>a</sub> = Caudal del afluente

El Cálculo del modelo se desarrolla a continuación:

*Modelación 1 (Punto 2, Puente Las Américas)*

$$D = \frac{k}{K_a - k} (e^{-k} - e^{-k_a}) L_o + D_o \times e^{-k a t} \quad (\text{Ec. 11})$$

$$D = \frac{0.96}{4.80 - 0.96} (e^{-0.96} - e^{-4.80}) 2.70 \text{ mg/L} + 1.05 \text{ mg/L} \times e^{-(4.80 \text{ días}^{-1}) 0.043 \text{ días}}$$

$$D = 0.80 \text{ mg/L}$$

$$C = 8.09 - 0.80 = 7.29 \text{ mg/L}$$

*Modelación 2 (Río Puyo, antes de desembocadura Río Churoyacu):*

$$D = \frac{k}{K_a - k} (e^{-k} - e^{-k_a}) L_o + D_o \times e^{-k a t} \quad (\text{Ec. 11})$$

$$D = \frac{0.96}{4.80 - 0.96} (e^{-0.96} - e^{-4.80}) 2.59 \text{ mg/L} + 0.80 \text{ mg/L} \times e^{-(4.80 \text{ días} - 1) 0.04 \text{ días}}$$

$$D = 0.56$$

$$C = 8.10 - 0.56 = 7.54 \text{ mg/L} \quad (\text{Ec. 12})$$

*Balance 1 (Río Churoyacu):*

$$C = \frac{C_r Q_r + C_a Q_a}{Q_r + Q_a} \quad (\text{Ec. 13})$$

$$C = \frac{7.54 \text{ mg/L} \times 3.77 \text{ m}^3/\text{s} + 7.44 \text{ mg/L} \times 1.33 \text{ m}^3/\text{s}}{3.77 + 1.33 \text{ m}^3/\text{s}}$$

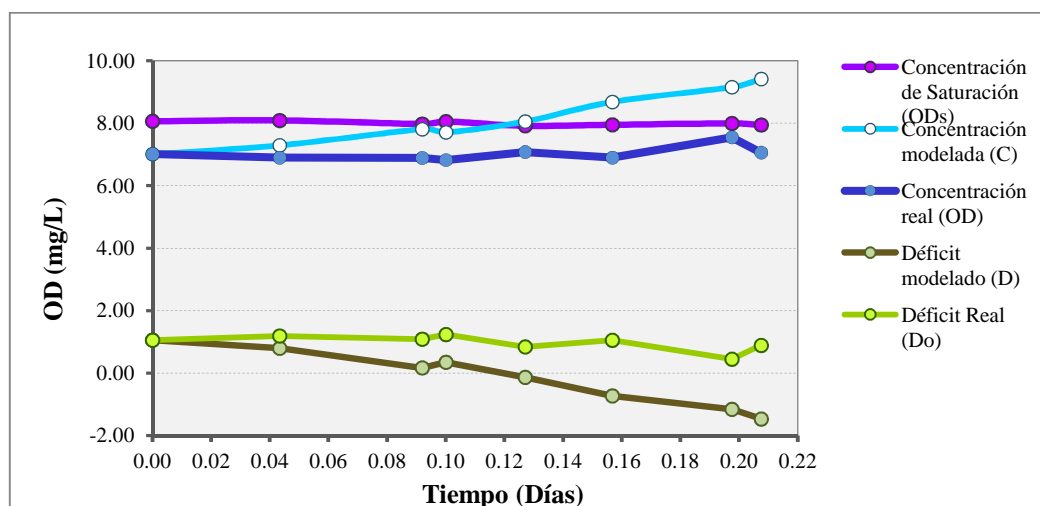
Los valores para los ocho puntos de control y las desembocaduras de afluentes se presentan en la Tabla 17 y Gráfico 10. La ubicación cartográfica de las concentraciones modeladas y del terreno se representa en el Mapa 5. En la modelación se puede tomar en cuenta las siguientes consideraciones:

La variación de la tendencia modelada tanto para déficit como para concentración de oxígeno disuelto, muestra una tendencia uniforme y casi invariable desde el inicio del tramo modelado hasta el km 7 (Paseo Turístico) en la cual la concentración de OD se incrementa desde 7.1 mg/L (75% de saturación) hasta 9.42 mg/L. esto puede deberse a la influencia determinante de la constante de reaeración ( $k_a$ ) sobre la constante de primer orden ( $k$ )

**Tabla 17.** Modelación del déficit y concentración de Oxígeno Disuelto (D) en ocho puntos del Río Puyo

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

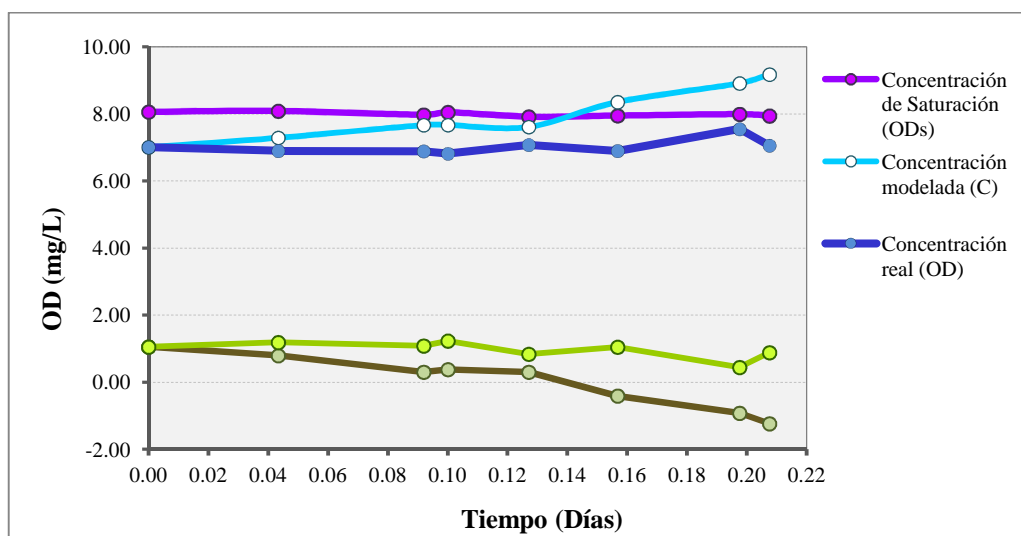
**k = 0.96 días<sup>-1</sup>**  
**Ka = 4.80 días<sup>-1</sup>**



**Gráfico 10.** Modelación del déficit y concentración de oxígeno disuelto a lo largo del tramo medio del Río Puyo.

- Posterior al descenso mencionado respecto a la zona media de la ciudad, el déficit de oxígeno disuelto se reduce a la vez que aumenta la concentración del mismo hasta llegar a los 9.42 mg/L en el punto final del tramo modelado (Unión Base, km. 15.8) este incremento puede darse debido a la relativa disminución en la aportación de materia orgánica oxidable a la vez que permanecen los procesos de oxigenación que ocurren de manera continua en el río, a causa de la abundancia de rápidos y zonas de baja profundidad y corriente acelerada que favorecen el intercambio gaseoso. Así también, los valores pueden ser incrementados debido a la dilución de la materia orgánica oxidable por aportes de agua por precipitación y escorrentía.
- Si se compara los resultados de la modelación realizada con los datos de campo (terreno) de OD medido (Gráfico 11) se encuentran algunas diferencias especialmente 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 la existencia de las diferencias mencionadas entre modelo y terreno puede ser la ocurrencia de un mayor índice de reaeración exclusivamente para la sección comprendida entre el km 7 y el km 9.7, superior al considerado para todo el río a manera de  $k_a$  promedio. Este último planteamiento podría reforzarse por la existencia de corrientes rápidas poco después de la desembocadura del río Citayacu, en el sitio denominado “La Isla”. Sin embargo y a pesar de las diferencias mencionadas en el párrafo anterior, la tendencia modelada tanto para déficit como para concentración de oxígeno disuelto se presenta bastante cercana a los datos reales (terreno).

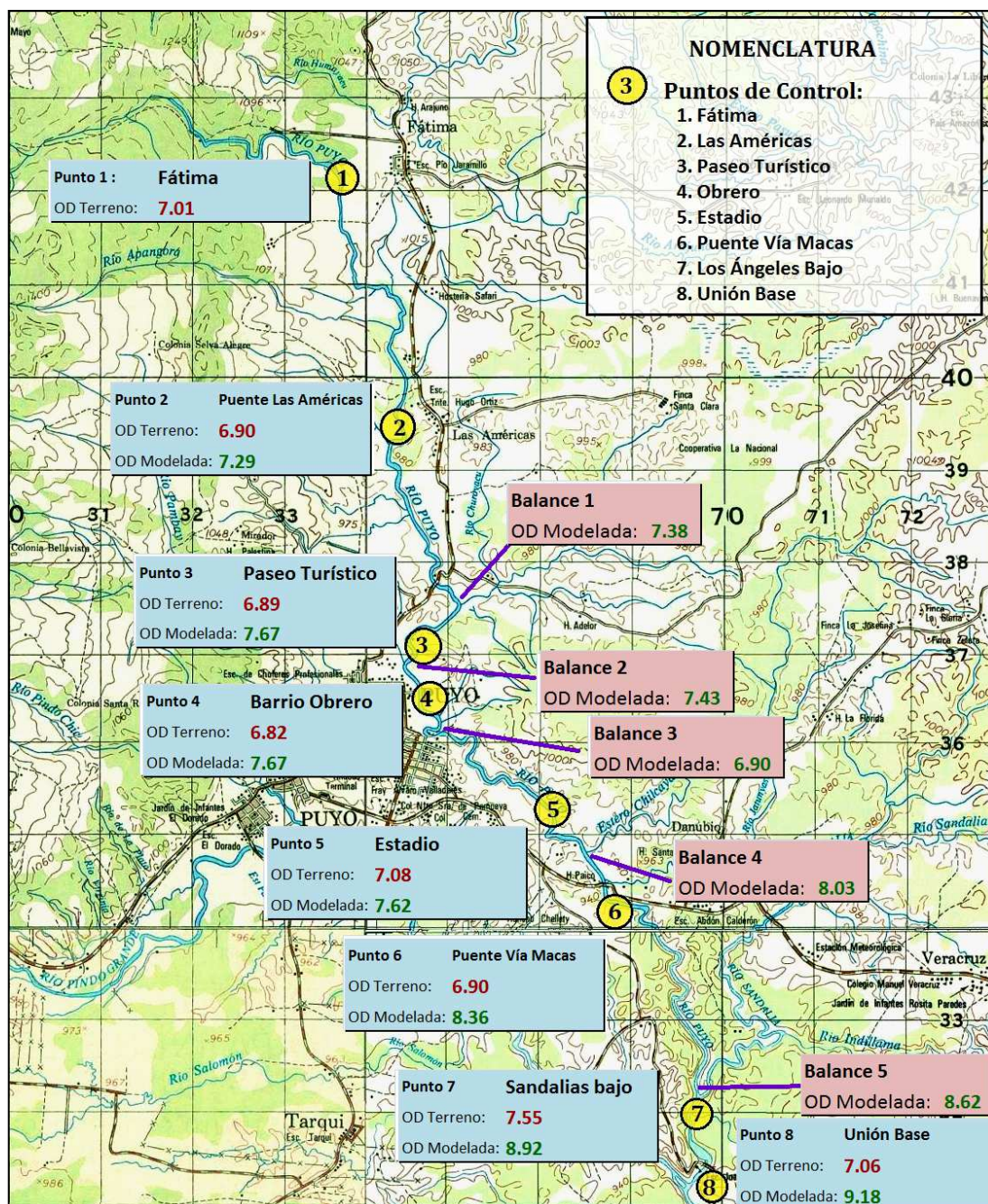
- Respecto a los valores comprendidos en la tendencia modelada, puede observarse que la concentración de oxígeno en el río nunca decae por debajo de los 5.5 mg/L manteniéndose dentro de los límites asumidos por el TULAS (2004) como admisibles para la preservación de la flora y fauna en aguas dulces, cálidas (esto es no menor al 60% de saturación y 5 mg/l de concentración) y coincidiendo con criterios similares como los señalados por Lenntech (2012) que señala que la vida acuática requiere una concentración mínima de 4 a 5 mg/L. Así mismo, Carrillo (2010) menciona la existencia de varios estudios científicos como base del establecimiento de un valor de 5.0 mg/L como la concentración mínima de oxígeno disuelto requerida para mantener la fauna acuática por parte de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos, EPA.



**Gráfico 11.** Comparación del déficit y concentración de oxígeno disuelto modelados con valores reales (terreno).

- Lo mencionado en el párrafo anterior lleva a suponer que la reducción máxima (tanto observada como modelada) del parámetro Oxígeno Disuelto, no afecta de manera significativa los procesos bióticos en el cuerpo hídrico, siendo mayor la

incidencia de otros parámetros físicos y químicos del cuerpo hídrico como factores que deterioran la calidad del agua.



**Mapa 6.** Valores de concentración de OD medido (terreno) y modelado en puntos de control y principales afluentes (ubicación geográfica). 2012.

Fuente cartográfica: IGM (2011) Adaptación: Autor

## 4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 4.1. Conclusiones

- Se ha identificado la existencia de cinco afluentes principales en el tramo medio del río Puyo, de los cuales dos de ellos aportan materia orgánica al mismo de manera significativa: El río Pambay y el río Citayacu, con 4 y 19 mg/L de carga orgánica promedio, expresada como DBO<sub>5</sub> en caudales de 2.10 y 0.86 m<sup>3</sup>/s respectivamente.
- Se ha determinado el caudal en ocho puntos del tramo medio del Río Puyo, observando que el mismo presenta un incremento que oscila 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 calidad de agua en base a la caracterización de DBO<sub>5</sub> se advirtió una posible diferenciación entre dos tramos de acuerdo a la calidad de agua. La primera, entre los km 1 y 6.7 da lugar a condiciones aceptables para el desarrollo de biota acuática y uso humano recreativo y la segunda, entre los km 6.7 y 15.8 (además del primer kilómetro) en donde puede inferirse la alteración de los requerimientos ecosistémicos y por ende, las condiciones del recurso para uso humano y conservación de biota acuática.
- En la evaluación de calidad de agua en base a la caracterización de Oxígeno Disuelto se identificó una tendencia relativamente uniforme en la cual el parámetro se mantiene dentro de niveles aceptables dentro de los límites



establecidos para uso recreativo y conservación de flora y fauna. Los valores del parámetro tienden a incrementarse hacia el final del tramo estudiado.

- Los resultados de la modelación de la materia orgánica permiten inferir que a pesar que el Río Puyo recibe un importante aporte de la misma (por parte de las actividades humanas desarrolladas en la subcuenca) que altera negativamente la calidad de agua y sus atributos para el uso humano y conservación de vida acuática, las condiciones de recuperación del mismo hacen que su autodepuración sea teóricamente posible en términos acordes con el recorrido del río hasta su desembocadura en el Río Pastaza. La comparación entre el modelo realizado y los datos medidos (terreno) confirman esta tendencia.
- Los resultados de la modelación de oxígeno disuelto, demuestran que el parámetro mantiene valores en gran medida uniformes a lo largo del río y son aceptables desde un punto de vista ecosistémico o recreativo. Esto permite inferir que el parámetro oxígeno disuelto no es un factor crítico en las condiciones de calidad de agua del Río Puyo.

#### **4.2. Recomendaciones**

- Las autoridades seccionales deberían tomar en cuenta los resultados del presente estudio para la adopción de medidas de descontaminación del recurso hídrico, como diseño y construcción de sistemas de tratamiento para las descargas domésticas colectadas en sistemas municipales y estrategias de ordenamiento territorial y regulación en el uso del suelo que faciliten la conducción de efluentes hacia dichos sistemas

- Estas medidas pueden contribuir a la eficiente recuperación del recurso hídrico ya que si bien se observa que el aporte de contaminación orgánica es importante en algunos puntos, los indicadores analizados y las condiciones naturales de recuperación del río permiten inferir que niveles de calidad ambiental acordes con el uso dado al recurso, son alcanzables.
- Es conveniente llevar a cabo nuevas investigaciones respecto a la caracterización y modelación de otros parámetros de interés ambiental en las aguas del Río Puyo en el tramo estudiado, como DQO, coliformes fecales, fosfatos o nitratos. De igual manera revestiría validez la caracterización y modelación de oxígeno disuelto y materia orgánica aguas arriba y aguas abajo del tramo estudiado, a fin de estudiar la dinámica de los contaminantes previa o posterior a la zona de influencia urbana.
- Es igualmente recomendable comparar e integrar los resultados obtenidos en esta investigación estudios realizados en otros campos de conocimiento y aplicación relacionados con el Río Puyo

## 5. BIBLIOGRAFÍA

### Trabajos Citados

- 1) Carrera G. & 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*. Sangolquí: Escuela Politécnica del Ejército. Carrera de Ingeniería Geográfica y del Medio Ambiente.
- 2) Carrillo D. et. al. (2010). *Variación del oxígeno disuelto en el Río Burío-Quebrada Seca, Heredia, Costa Rica, en el periodo 2005 – 2010*. Recuperado el 15 de noviembre de 2012 de Universidad Nacional: [http://www.una.ac.cr/observatorio\\_ambiental/index.php?option=com\\_booklibrary&task=view&id=19&catid=43&Itemid=37](http://www.una.ac.cr/observatorio_ambiental/index.php?option=com_booklibrary&task=view&id=19&catid=43&Itemid=37)
- 3) Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (2006). *Curso Especialización en Gestión Integral de Cuencas Hidrográficas*. Turrialba: CATIE.
- 4) Chin, D. (2013). *Water-Quality Engineering in Natural Systems: Fate and Transport Processes*. Recuperado el 3 de febrero de 2013 de: Google Books: [http://books.google.com.ec/books?id=CZ69wIT0OiwC&pg=PA98&lpg=PA98&dq=o%C2%B4connor%2Bdobbins%2B3.93&source=bl&ots=QzINzrFGhO&sig=IqD6mJ7NTQbuRHL DhV\\_zZxIFYVU&hl=es&sa=X&ei=uoTPUMf0FJOQ8wSy\\_4Bg&ved=0CEIQ6AEwAg#v=onepage&q=o%C2%B4connor%2Bdobbins%2B3.93&f=false](http://books.google.com.ec/books?id=CZ69wIT0OiwC&pg=PA98&lpg=PA98&dq=o%C2%B4connor%2Bdobbins%2B3.93&source=bl&ots=QzINzrFGhO&sig=IqD6mJ7NTQbuRHL DhV_zZxIFYVU&hl=es&sa=X&ei=uoTPUMf0FJOQ8wSy_4Bg&ved=0CEIQ6AEwAg#v=onepage&q=o%C2%B4connor%2Bdobbins%2B3.93&f=false)
- 5) Consejo Nacional de Recursos Hídricos. (2002). *Gestión de los Recursos Hídricos del Ecuador. Políticas y Estrategias*. Quito: CNRH.
- 6) Crites R. y Tchobanoglous G. (2000). *Tratamiento de Aguas residuales en Pequeñas Poblaciones*. Bogotá: Mc Graw-Hill..
- 7) Docampo L. (1999). *Modelización hidráulica de caudales ecológicos*. Recuperado el 14 de noviembre de 2012 de: CEDEX, Centro de Estudios de Técnicas Aplicadas: [http://hispagua.cedex.es/sites/default/files/hispagua\\_articulo/Ingcivil/113/articulo5/modelizacion.html](http://hispagua.cedex.es/sites/default/files/hispagua_articulo/Ingcivil/113/articulo5/modelizacion.html)
- 8) Domenech, X. y Peral, J. (2006). *Química Ambiental de Sistemas Terrestres*. Recuperado el 10 de diciembre de 2012 de Google Books: <http://books.google.com.ec/books?id=S4bjFOEXRzMC&pg=PA187&lpg=PA187&dq=street+phelps+ecuaciones&source=bl&ots=reVpyDJsS7&sig=lq0sZikMIX85T8YVBTDp5StJprg&hl=es-419&sa=X&ei=iQqaUdytF4Hs8wTI5oHwDA&ved=0CE8Q6AEwBQ#v=onepage&q=street%20phelps%20ecuaciones&f=false>
- 9) 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
- 10) Emapast, (2012). *Testimonio Verbal*. 17 de agosto de 2012

- 11) Gobierno Autónomo Descentralizado Municipal de Pastaza (2012). *Sistema Hidrográfico de la Provincia de Pastaza*. Puyo: Departamento de Planificación, Unidad de Ordenamiento Territorial. Puyo.
- 12) Gobierno Autónomo Descentralizado Provincial de Pastaza (2011). •*Ordenanza del Plan de Desarrollo Estratégico del Cantón Pastaza y los Códigos de Regulación Urbana y de Arquitectura y Urbanismo de la Ciudad de Puyo, Período 2000- 2010*. Puyo: Departamento de Planificación, Unidad de Ordenamiento Territorial.
- 13) Hernández A. (2001). *Depuración y Desinfección de Aguas Residuales*. Quinta Ed. Madrid: Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.
- 14) INEC (2010). *Censo Nacional de Población y Vivienda*. Quito.
- 15) Instituto Geográfico Militar (2011). *Hojas Topográficas Mera, Puyo, Shell y Veracruz. Escala 1:50000* Quito.
- 16) lenntech (2012). *¿Por qué es importante el oxígeno disuelto en el agua?* Recuperado el 13 de septiembre de 2012 de: Lenntech Water Treatment Solutions: <http://www.lenntech.es/porque-es-importante-el-oxigeno-disuelto-en-el-agua.htm#ixzz2FRLzf4G6>
- 17) Monerri, M. y Domenech, P. s.f. *Modelación de la Calidad del Agua. Universidad Politécnica de Valencia. Departamento de ingeniería hidráulica y medio ambiente*. Recuperado el 16 de septiembre de 2012 de: Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos: [cmserver.unavarra.es/servlet/SBReadResourceServlet?rid...5518](http://cmserver.unavarra.es/servlet/SBReadResourceServlet?rid...5518)
- 18) Muñoz-Mato (2012) *Flujo en Canales Abiertos*. Recuperado el 28 de septiembre de 2012 de Física e ingeniería: <http://fisicaeingenieria.es/resources/canales.pdf>
- 19) Petroni R. (2000) *Desarrollo y aplicación de un modelo bidimensional de calidad de agua*. Recuperado de Congreso Argentino de Saneamiento y Medio Ambiente: [www.bvsde.paho.org/bvsaidis/argentina11/modbidcal.pdf](http://www.bvsde.paho.org/bvsaidis/argentina11/modbidcal.pdf)
- 20) Ministerio del Ambiente (2004) *Texto Único de Legislación Ambiental Secundaria . Libro 6, Anexo1: Norma de Calidad Ambiental y de Descarga de Efluentes: Recurso Agua*. Quito: Ministerio del Ambiente
- 21) Romero J. (2010) *Tratamiento de Aguas Residuales. Teoría y Principios de Diseño*. Editorial Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería.
- 22) Subsecretaría de Salud de Pastaza (2010). *Anuario Estadístico Ministerio de Salud. Ministerio de Salud, Subsecretaría de Salud de Pastaza*. Puyo
- 23) Universitat Politècnica de Valencia (2009). *Modelo Básico de Streeter-Phelps*. Recuperado el 28 de agosto de 2012 de: <http://riunet.upv.es/handle/10251/5348>
- 24) Valdez E. y Vásquez A. (2003). *Ingeniería de los sistemas de tratamiento y disposición de aguas residuales*. Recuperado el 18 de octubre de 2012 de Fundación ICA: [http://www.capac.org/web/Portals/0/biblioteca\\_virtual/doc003/](http://www.capac.org/web/Portals/0/biblioteca_virtual/doc003/)