



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
Programa de Investigación, Estudios Nacionales
y Servicios del Ambiente (**PIENSA**)



**Evaluación de la capacidad de autodepuración del Río
Fonseca, en el municipio de Boaco, en la época crítica de verano
(marzo-abril) 2014**

Tesis para optar al título de:

Maestro en Ciencias en Ingeniería Ambiental

Tesista:

Ing. Linda Jenifer Cerda Urbina

Tutor:

M.Sc. Ing. Sergio Rafael Gámez Guerrero

Managua, octubre 2018

DEDICATORIA Y AGRADECIMIENTOS

Quiero dedicar este logro a Dios, por darme fortaleza para concluir la presente tesis, que es la culminación de muchos esfuerzos realizados a lo largo de esta etapa de mi vida. Quiero dedicarla también a mis padres y hermano por su apoyo incondicional a lo largo de toda mi vida. Por último pero no menos importante, quiero dedicar este trabajo a mi compañero de batallas y logros en esta aventura llamada vida, mi esposo Ricardo Díaz, gracias por todo.

De igual manera, quiero agradecer a todas las personas que contribuyeron a la realización de esta investigación, al valioso esfuerzo y apoyo de Roberto y Katty en los trabajos de campo, también a todas las personas que estuvieron pendientes del desarrollo de esta investigación.

Quisiera agradecer también a las autoridades del PIENSA, administrativas y de laboratorio, por su valioso apoyo con la logística de las pruebas de campo. Para concluir me gustaría agradecer especialmente a mi tutor, el MSc. Sergio Gámez por su disposición y apoyo en la realización de este proyecto, fue un honor que dedicara de su tiempo, conocimientos y valiosa experiencia conmigo y mi trabajo.

Linda Jenifer Cerda Urbina

CARTAS DE APROBACIÓN



Universidad Nacional de Ingeniería
Programa de Investigación, Estudios Nacionales
y Servicios Ambientales (PIENSA-UNI)



Managua, 11 de abril, 2014

Ing. Linda Jenifer Cerda U.
Maestrante del XIV Ciclo de
Maestría en Ing. Ambiental
(Ciclo 2012-2013)

Estimada Ingeniera:

Le saludo con todo respeto y procedo a comunicarle que, en la sesión ordinaria de Comité Académico de este programa, realizada el pasado 31 de marzo, se aprobó su protocolo de tesis titulado: *Evaluación de la capacidad de autodepuración del Río Fonseca en el Municipio de Boaco, en la época crítica de verano (marzo – abril 2014).*

Igualmente se ratificó el nombramiento oficial del MSc. Ing. Sergio R. Gámez G., como profesor tutor de su tesis.

Le deseo éxito en este trabajo de tesis, para que pueda defenderla y graduarse a la mayor brevedad posible.

Atte.


MSc. Ing. Luz Violeta Molina G.
Coordinadora Maestría en Ing. Amb. PIENSA-UNI



cc. MSc. Lic. Sagrario Espinal, Secretaria Académica Maestrías-PIENSA
Archivo MIA-PIENSA.



Universidad Nacional de Ingeniería
Programa de Investigación, Estudios Nacionales y
Servicios del Ambiente (PIENSA-UNI)



Managua, 06 de julio, 2015
CMP-019-15

Ing. Linda Jenifer Cerda Urbina
Estudiante de MIA-PIENSA
Ciclo 2012-2013

Estimada Maestrante:

Le saludo muy cordialmente y procedo a **autorizar prórroga de cuatro meses a partir de esta fecha, para la finalización de su tesis titulada:**

EVALUACIÓN DE LA CAPACIDAD DE AUTODEPURACIÓN DEL RÍO FONSECA, EN EL MUNICIPIO DE BOACO, EN LA ÉPOCA CRÍTICA DE VERANO (MARZO-ABRIL 2014)

Su carta de solicitud de prórroga para concluir esta tesis, con fecha 25 de junio de 2015, fue avalada con el visto bueno de su tutor, MSc. Ing. Sergio Gámez G., conforme lo establece el artículo 22 del Reglamento de Culminación de Estudios de Maestría vigente en el PIENSA.

Igualmente, esta coordinación considera válido su argumento de atraso en la ejecución del cronograma de tesis por motivos laborales, por lo que sólo me resta remitir copia de esta comunicación a las autoridades correspondientes y desearle éxito y ánimo en esta etapa final para culminar sus estudios.

Atte.


MSc. Ing. Luz Violeta Molina
Coordinadora de Maestría PIENSA-UNI



- cc. MSc. Ing. Larisa Korsak, Directora PIENSA
 MSc. Lic. Elda Escobar V., Secretaria Académica PIENSA
 MSc. Ing. Sergio R. Gámez G., Tutor de tesis
Expediente Académico de Maestrante Linda J. Cerda U.

RESUMEN

A su paso por la ciudad de Boaco, el Río Fonseca atraviesa un escenario de contaminación, en particular por la descarga de aguas residuales, incluyendo el efluente de la PTAR de Boaco y aguas crudas provenientes de zonas aledañas al cauce del río. Considerando esto, para cuidar el río de un deterioro mayor y gestionarlo como cuerpo receptor, es necesario su monitoreo y la aplicación de medidas correctivas eficaces, basadas particularmente en la capacidad natural de autodepuración del río, teniendo como principal herramienta para esto la modelación de la calidad del agua, tanto de forma tradicional como con el uso de software como el QUAL2K.

Dada la limitación de recursos disponibles y considerando algunos datos modelados por QUAL2K, se realizaron campañas de muestreos con variables específicas para evaluar la eficiencia de este tipo de programas en esta situación en particular. Para analizar la calidad del agua y la capacidad del río de asimilar ciertos contaminantes, se realizaron muestreos en la época crítica de verano de 2014, empezando con la estación ubicada en La Bombilla y culminando en la estación El Cascabel, localizada 7.682 km aguas abajo.

Los datos recolectados se evaluaron a través del modelo matemático de Streeter-Phelps, para estimar datos experimentales del coeficiente de desoxigenación (K_d) y reaireación (K_r), los cuales son básicos para evaluar la DBO y el OD en la corriente, ya sea con el método tradicional o empleando QUAL2K.

Además de las inspecciones visuales en el sitio, con base en requerimientos de la NTON 05 007-98 se demuestra que para la última estación muestreada en cuanto a pH, temperatura, DBO_5 y OD, el Río Fonseca es capaz de recuperar una calidad adecuada. Sin embargo, a pesar de mostrar un alto potencial de autodepuración y una reaireación sumamente eficiente en la corriente (pasando de una zona prácticamente anóxica en La Bombilla a condiciones de agua limpia en la El Cascabel), la cual se logró modelar con el software QUAL2K, al final del tramo de estudio el río no alcanza a cumplir con los requerimientos de la norma.

ABSTRACT

As it passes through the city of Boaco, the Fonseca River faces a contamination scenario, mainly caused by the discharge of wastewater, including effluent from the Boaco wastewater treatment plant and raw water from the riverbed's surrounding areas. Considering this, in order to protect the river from further deterioration and manage it as a receiving water body, it's necessary to monitor it and apply effective corrective measures, based in particular on the natural self-purification capacity of the river, using water quality modeling as a main tool for this, both with traditional methods and with the use of software such as QUAL2K.

Given the limited resources available and considering some of the data modeled by QUAL2K, sampling campaigns were conducted with specific variables to evaluate the efficiency of this type of software, in this particular situation. To analyze water quality and the river's assimilation capacity faced with certain pollutants, samplings were carried out in the critical summer season of 2014, starting with the station located at La Bombilla and culminating at El Cascabel station, located 7,682 km downstream.

Collected data was evaluated applying the Streeter-Phelps mathematical model, in order to estimate experimental data regarding decomposition rates (K_d) and reaeration rates (K_r), these rates are basic to evaluate BOD and DO in the river, whether this is done with the traditional method or using QUAL2K.

In addition to visual inspections on site, based on requirements from NTON 05 007-98 it was proven for the last sampling station, regarding pH, temperature, BOD_5 and DO, that Fonseca River is capable of recovering an adequate water quality. However, despite showing a high self-purification potential and an extremely efficient reaeration in the stream (transforming from an almost anoxic zone in La Bombilla to clean water conditions at El Cascabel), condition whose modelling was fulfilled using QUAL2K software, at the end of the study reach the river cannot fulfill all regulated requirements.

ÍNDICE DE CONTENIDO

I. INTRODUCCIÓN.....	1
II. ANTECEDENTES.....	2
2.1. Antecedentes de la zona de estudio.....	2
2.2. Antecedentes de la modelación con QUAL2K.....	3
III. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	5
IV. JUSTIFICACIÓN DEL ESTUDIO.....	7
V. OBJETIVOS DEL ESTUDIO.....	8
5.1. Objetivo general.....	8
5.2. Objetivos específicos.....	8
VI. HIPÓTESIS DE ESTUDIO.....	9
6.1. Hipótesis nula.....	9
6.2. Hipótesis alternativa.....	9
VII. MARCO TEÓRICO REFERENCIAL.....	10
7.1. El recurso agua.....	10
7.1.1. El agua en la naturaleza.....	10
7.1.2. Los recursos hídricos en Nicaragua.....	11
7.1.3. Recursos hídricos superficiales en Boaco.....	11
7.2. Contaminación del agua.....	13
7.3. Vertido de aguas residuales en ríos.....	16
7.3.1. Tipos de aguas residuales.....	16
7.3.2. Características de las aguas residuales.....	16
7.3.3. Efectos de la descarga de aguas residuales a ríos.....	17
7.3.4. Normativas de descarga.....	19
7.4. Calidad del agua.....	20
7.4.1. Parámetros significativos en la calidad del agua.....	20
7.4.2. Clasificación del recurso hídrico.....	21

7.5. Autodepuración de las aguas superficiales	23
7.5.1. Procesos que intervienen en la autodepuración	24
7.5.2. Zonas en una corriente que se autodepura	25
7.5.3. El papel del oxígeno en la autodepuración	26
7.6. Movimiento de contaminantes en el medio acuático	27
7.7. Modelos matemáticos de calidad del agua.....	28
7.8. Modelo de Streeter-Phelps para DBO y OD	29
7.8.1. Modelación de la DBO	29
7.8.2. DBO Última (DBOu).....	33
7.8.3. Curva de déficit de oxígeno (Curva SAG / Curva de la cuchara).....	34
7.8.4. Balance de oxígeno.....	36
7.9. Modelación de la calidad del agua empleando QUAL2K.....	40
7.9.1. Elementos de análisis.....	40
7.9.2. Descripción del software.....	41
7.9.3. Aproximación teórica del programa	42
7.10. Patógenos y decaimiento bacteriano en la corriente	43
VIII. MARCO METODOLÓGICO	46
8.1. Tipo de estudio.....	46
8.2 Fuentes de recopilación de información	46
8.3. Área de estudio	47
8.3.1. Información general del municipio de Boaco	47
8.3.2. Situación ambiental del municipio de Boaco.....	48
8.3.3. Tramo muestreado	49
8.3.4. Principales fuentes de contaminación identificadas.....	51
8.4. Metodología de evaluación del proceso de autodepuración en el Río Fonseca	52
8.5. Selección de variables de estudio.....	54
8.6. Muestras.....	55
8.6.1. Determinación de la DBO5.....	56
8.6.2. Determinación de oxígeno disuelto (OD)	56
8.6.3. Determinación de coliformes	57

8.6.4. Medición de pH y temperatura.....	57
8.6.5. Características de las estaciones muestreadas.....	57
8.7. Aforo del caudal del río	61
8.8. Análisis de decaimiento bacteriano.....	65
8.9. Modelación usando la ecuación de Streeter-Phelps	65
8.10. Implementación del modelo QUAL2K.....	66
8.11. Limitaciones del estudio	70
IX. ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	72
9.1. Condiciones hidráulicas	72
9.2. Datos de calidad de agua de muestreos.....	75
9.3. Análisis de la DBOCu.....	81
9.4. Análisis del OD saturado	83
9.5. Modelación de la DBO y el OD mediante Streeter-Phelps.....	85
9.6. Simulación con el modelo QUAL2K.....	94
9.7. Modelación del decaimiento bacteriano	99
X. CONCLUSIONES.....	101
XI. RECOMENDACIONES.....	103
XII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	104

ANEXOS

- Anexo 1.** Descripción de las variables más significativas en el estudio de la calidad del agua
- Anexo 2.** Operacionalización de variables de estudio
- Anexo 3.** Relación de aforos usando Manning
- Anexo 4.** Resultados de análisis de laboratorio
- Anexo 5.** Datos de entrada QUAL2K

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.	Distribución de los reservorios de agua en la naturaleza	10
Tabla 2.	Disponibilidad de recursos hídricos en Nicaragua.....	11
Tabla 3.	Características de parámetros significantes de las ARD.....	17
Tabla 4.	Parámetros de calidad para vertidos provenientes de sistemas de tratamiento del alcantarillado sanitario a cuerpos receptores	19
Tabla 5.	Variables más significativas en el estudio de la calidad del agua.....	20
Tabla 6.	Características de las aguas Tipo 1	22
Tabla 7.	Datos de estaciones de muestreo sobre el Río Fonseca	51
Tabla 8.	Características de los puntos del muestreo 1 en el Río Fonseca	58
Tabla 9.	Características de los puntos del muestreo 2 en el Río Fonseca	59
Tabla 10.	Características de los puntos del muestreo 3 en el Río Fonseca	60
Tabla 11.	Discretización de tramos estudiados en el Río Fonseca (muestréos 1 y 2).....	66
Tabla 12.	Discretización de tramos estudiados en el Río Fonseca (muestreo 3)	67
Tabla 13.	Dummy values meteorológicos estimados (muestréos 1 y 2).....	69
Tabla 14.	Dummy values meteorológicos estimados (muestreo 3)	69
Tabla 15.	Elevaciones sobre cauce muestreado en el Río Fonseca.....	72
Tabla 16.	Velocidad del flujo	73
Tabla 17.	Datos de secciones 1 y 2 (sector El Cascabel).....	74
Tabla 18.	Estimación del caudal promedio en el Río Fonseca	75
Tabla 19.	Resultados de muestréos realizados (pH, temperatura del agua y DBO5).....	75
Tabla 20.	Resultados de muestréos realizados (OD, coliformes totales y fecales).....	76
Tabla 21.	Cálculo de la DBOCu	81
Tabla 22.	Análisis de la DBOCu con diferentes Kd de botella.....	82
Tabla 23.	Análisis de Kd y Kr en la corriente con diferentes Kd de botella (muestreo 1).....	82
Tabla 24.	Cálculo del ODs y ODsc.....	83

Tabla 25.	Replanteamiento de valores de OD para modelaciones	84
Tabla 26.	Simulación Streeter-Phelps DBOCu-OD muestreo 1 (Vel. 0.25 m/s)	87
Tabla 27.	Simulación Streeter-Phelps DBOCu-OD muestreo 2 (Vel. 0.25 m/s)	88
Tabla 28.	Simulación Streeter-Phelps DBOCu-OD muestreo 3 (Vel. 0.25 m/s)	89
Tabla 29.	Comparativa de velocidades de reacción a diferentes velocidades de la corriente (muestreo 1)..	90
Tabla 30.	Comparativa de velocidades de reacción a diferentes velocidades de la corriente (muestreo 2)..	90
Tabla 31.	Comparativa de velocidades de reacción a diferentes velocidades de la corriente (muestreo 3)..	91
Tabla 32.	Constantes Kd y Kr resultantes de simulación QUAL2K.....	98
Tabla 33.	Decaimiento bacteriano (coliformes totales)	99

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.	Cribado + UASB + microfiltro, en PTAR Boaco	2
Figura 2.	Contaminación en el Río Fonseca, Paso de Lajas 2.....	5
Figura 3.	Unidades hidrográficas del Río Fonseca y Río Las Cañas	12
Figura 4.	Zonas en la autodepuración de un río	26
Figura 5.	Patrón general de reacción de DBO en una muestra de agua.....	32
Figura 6.	Curva de déficit de oxígeno en un río.....	35
Figura 7.	División de un río natural y sus tributarios en segmentos de QUAL2K	42
Figura 8.	Localización del municipio y la ciudad de Boaco	47
Figura 9.	Microlocalización tramo de estudio Río Fonseca	49
Figura 10.	Esquema de ubicación de estaciones de muestreo en el Río Fonseca.....	50
Figura 11.	Aguas residuales en cauce de la comunidad La Bombilla.....	51
Figura 12.	Levantamiento de sección en el Río Fonseca.....	63
Figura 13.	Perfil de elevación sobre cauce muestreado en el Río Fonseca.....	72

Figura 14.	Vista de sección 1 (Aforo 1).....	73
Figura 15.	Vista de sección 2 (Aforo 2).....	73
Figura 16.	Perfiles de temperatura (del agua) y pH Río Fonseca - 2014.....	77
Figura 17.	Perfiles de DBO5 y OD Río Fonseca - 2014.....	78
Figura 18.	Perfiles de coliformes Río Fonseca - 2014	80
Figura 19.	Comportamiento del OD frente a cambio de velocidad en la corriente.....	92
Figura 20.	Comportamiento de la DBOCu frente a cambio de velocidad en la corriente	93
Figura 21.	Simulación de condiciones hidráulicas QUAL2K (Iguales para muestreos 1,2 y 3).....	95
Figura 22.	Modelación de pH y temperatura en QUAL2K (muestreo 1)	96
Figura 23.	Modelación de OD y DBOCu en QUAL2K (muestreo 1)	96
Figura 24.	Modelación de pH y temperatura en QUAL2K (muestreo 2)	96
Figura 25.	Modelación de OD y DBOCu en QUAL2K (muestreo 2)	97
Figura 26.	Modelación de pH y temperatura en QUAL2K (muestreo 3)	97
Figura 27.	Modelación de OD y DBOCu en QUAL2K (muestreo 3)	97

ACRÓNIMOS Y ABREVIATURAS

APHA:	American Public Health Association
AR:	Aguas residuales
ARD:	Aguas residuales domésticas
ARI:	Aguas residuales industriales
CAM:	Comisión Ambiental Municipal
CATIE:	Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza
CONAGUA:	Comisión Nacional del Agua
DBO:	Demanda bioquímica de oxígeno
DQO:	Demanda química de oxígeno
ENACAL:	Empresa Nicaragüense de Acueductos y Alcantarillados
EPA:	United States Environmental Protection Agency
FIDEG:	Fundación Internacional para el Desafío Económico Global
IANAS:	Red Interamericana de Academias de Ciencias
INIFOM:	Instituto Nicaragüense de Fomento Municipal
JCA:	Junta de Calidad Ambiental de Puerto Rico
km:	Kilómetros
km²:	Kilómetros cuadrados
m³:	Metros cúbicos
mg/L:	Miligramos por litro
m/s:	Metros por segundo
mm:	Milímetros
msnm:	Metros sobre el nivel del mar
Mm³:	Millones de metros cúbicos
MARENA:	Ministerio del Ambiente y los Recursos Naturales
MO:	Materia orgánica
OD:	Oxígeno disuelto
NTON 05 007-98:	Norma Técnica Obligatoria Nicaragüense 05 007-98 “Clasificación de los recursos hídricos”
NTON 09003-99:	Norma Técnica Obligatoria Nicaragüense 09003-99 “Diseño de abastecimiento y potabilización del agua”
PTAR:	Planta de tratamiento de aguas residuales
Pt-Co:	Escala platino cobalto
SENAMHI:	Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú
UNT:	Unidad nefelométrica de turbidez
vrs:	Varas

I. INTRODUCCIÓN

Nicaragua es un país privilegiado en términos de recursos hídricos. Según ENACAL (2006), el 15% de la superficie nacional está constituida por lagos, lagunas y ríos, sin embargo a pesar de esto gran parte de la población no cuenta con tan preciado recurso para sus actividades básicas, ya sea en cantidad o calidad. Esto obedece en muchos casos, al trato indiferente que se le da al recurso agua en el país, de parte de pobladores e inclusive de autoridades.

En este escenario, se presenta una situación más crítica para los cuerpos de agua superficial próximos a núcleos urbanos, dado que a diario se vierten en ellos contaminantes provenientes de actividades humanas. De acuerdo a ENACAL (2006), la contaminación de aguas superficiales en el país se debe principalmente al depósito de pesticidas y agroquímicos, la descarga de aguas residuales domésticas e industriales y la erosión causada por la deforestación.

Los contaminantes, principalmente nutrientes y materia orgánica (MO) depositados en la corriente, resultan en la disminución del oxígeno disuelto (OD), ya sea por el metabolismo de dichos contaminantes por los microorganismos, oxidaciones químicas y respiración de plantas y algas. Dado que el OD es vital para la salud del ecosistema acuático, esta alteración puede conllevar a un ecosistema fuera de balance, con mortalidad de los peces y otros organismos, presencia de olores indeseables y molestias estéticas.

Esta situación ha generado particular interés a partir de una visión de gestión integral de los recursos, donde el estudio del cuerpo receptor y su salud es muy importante para los sistemas integrados de saneamiento, cobrando particular importancia el estudio del proceso de autodepuración, que funciona como mecanismo natural de mitigación ante el impacto de la contaminación recibida. A pesar de esto, actualmente la capacidad particular de recuperación de cada río aun es un proceso poco estudiado.

II. ANTECEDENTES

En cuanto a esta investigación, se establecen dos tipos de antecedentes: por un lado los relacionados con la zona de estudio y por otro parte los que involucran la modelación de la calidad del agua mediante el software QUAL2K.

2.1. Antecedentes de la zona de estudio

Según el último dato oficial, para 2006 el municipio de Boaco contaba con 55,849 habitantes, 29,046 de ellos en la zona urbana y 26,803 en la zona rural (Alcaldía Municipal de Boaco, 2006). El municipio además se encuentra en la unidad hidrográfica del Río Fonseca, constituyendo este último una fuente de abastecimiento de agua potable para la ciudad de Boaco, gracias a una presa en la comunidad El Diamante (Martínez, 2013).

La ciudad cuenta con alcantarillado sanitario aunque no tiene cobertura total del servicio. Tiene además una PTAR ubicada en las cercanías de la comunidad La Bombilla, la cual inicio sus funciones en el año 2012. El tratamiento en la PTAR de Boaco (Ver Figura 1) incluye: cribado + reactor UASB + microfiltro rotatorio, (Báez & Martínez, 2015).



Figura 1. Cribado + UASB + microfiltro, en PTAR Boaco

Nota. Fuente: Báez & Martínez (2015)

El efluente de la PTAR es vertido en el Río Fonseca, el cual actualmente no cuenta con ningún programa de monitoreo o clasificación del recurso hídrico para su resguardo. Para la cuenca del río tampoco existe un plan de manejo.

2.2. Antecedentes de la modelación con QUAL2K

Para la gestión de los recursos hídricos, a nivel de autoridades se necesita implementar un sistema de monitoreo, con herramientas que permitan la elección de las estrategias y acciones correctivas de saneamiento más adecuadas, donde además de aplicar las normativas de vertidos vigentes, se considere la calidad de las aguas del río, su capacidad de recuperación ante los contaminantes y su adaptación a situaciones como las sequías.

La calidad del agua suele analizarse con softwares basados en modelos matemáticos, que simulan el comportamiento del río respecto a distancia y tiempo, ante ciertos contaminantes, ayudando a que las medidas aplicadas sean eficaces y realistas frente a la problemática y las capacidades de las autoridades. Estos modelos relacionan parámetros de interés ambiental, provenientes de mediciones en campo y cuyos mecanismos de evolución son conocidos.

El modelo QUAL2K a aplicar en este estudio, es uno de los más usados para analizar la calidad del agua en ríos. Este ha sido desarrollado por Steven Chapra para la agencia estadounidense EPA (Environmental Protection Agency), permite simular la calidad del agua en corrientes superficiales centrándose principalmente en el comportamiento del oxígeno disuelto (OD), vital para la vida acuática y muchos usos del agua, ante la presencia de materia orgánica (MO) proveniente de contaminantes.

El modelo QUAL2K inició basándose en el modelo matemático de Streeter-Phelps, describiendo la evolución del déficit de oxígeno disuelto, aguas arriba y aguas abajo de una fuente de MO. Ha evolucionado con la incorporación de los procesos de nitrógeno (QUAL1) y de los ciclos de fósforo y algas (QUAL2). La última variación QUAL2K incorpora además los análisis de incertidumbre en el estudio, (Villalobos, 2008).

El modelo QUAL2K además ha sido probado en muchos cuerpos de agua alrededor de varios continentes, dando muestras de su confiabilidad para simular de forma bastante aproximada el comportamiento de la calidad del agua ante contaminantes.

El continente americano en específico cuenta con amplia bibliografía sobre el uso del software QUAL2K, destacando: Chile (Río Bio Bio), Colombia (Ríos Aburrá, Frío, Guacaica, Sinú, Ubaté y Zona Urbana de Bogotá), Costa Rica (Ríos Damas y Grande de Tárcoles), El Salvador (Ríos Las Cañas y Tomayate), EEUU (Oyster Creek y Southhampton Creek) y México (Ríos Lerma y Tula).

Cabe destacar que Nicaragua no cuenta con bibliografía publicada sobre el uso del software QUAL2K, tampoco con experiencia de aplicación de resultados del mismo en el estudio de cuerpos de agua. Dado que no hay datos locales relacionables a la modelación del Río Fonseca, este estudio se ha apoyado en bibliografía internacional publicada, para indagar sobre la metodología empleada en estudios similares.

Costa Rica como país vecino, destaca en iniciativa con la aplicación del QUAL2K para modelar el Río Tarcoles, como parte del Proyecto de Mejoramiento Ambiental del Área Metropolitana de San José, llevado a cabo por el Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados. En la misma cuenca de Río Tarcoles, también se ha aplicado el QUAL2K para estudiar el Río Damas, como parte del trabajo de tesis de Villalobos (2008). Estos estudios constituyen una referencia muy importante sobre consideraciones en la modelación, sobre todo porque incluyen a ríos de montaña con alta contaminación, al igual que el Río Fonseca.

El Salvador es otro país cercano donde se ha encontrado una referencia importante para el desarrollo del estudio. En este caso, como parte de la consultoría 'Medidas de Control de la Contaminación de los Ríos Tomayate y Las Cañas'', patrocinada por el Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales de El Salvador, existe información sobre el análisis de la contaminación y la modelación de calidad de las aguas de los ríos Tomayate y Las Cañas.

Finalmente, debido a la cantidad de estudios publicados, es de destacar también la información generada en Colombia sobre uso del QUAL2K para el estudio de la calidad de agua de ríos, donde se ha estudiado ampliamente la calibración y verificación del programa, además de la aplicación de los resultados obtenidos para el análisis de escenarios de contaminación.

III. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En la actualidad, el Río Fonseca atraviesa una crisis ambiental agravada con la descarga recurrente de desechos contaminantes, provenientes de áreas no cubiertas por el alcantarillado sanitario. Además el río presenta una disminución visible de su caudal, situación que se vuelve crítica en la época de verano.

Un factor importante además es la ubicación de asentamientos humanos en su ribera, constituyendo un riesgo latente para el río, debido a los desechos provenientes de las actividades diarias, incluyendo depósito de basura, lavado de ropa (Ver Figura 2) y el baño de personas e inclusive de animales en sus aguas (Martínez, 2013).



Figura 2. Contaminación en el Río Fonseca, Paso de Lajas 2

Nota. Fuente: Rodríguez (2015)

Para brindar una solución integral al problema de saneamiento del Río Fonseca es necesario un estudio particular del mismo, de manera que se evalúen los principales factores influyentes en la capacidad natural del río para recuperar la calidad de sus aguas. De forma concreta, lo anterior debe resultar en la elaboración de un modelo a través del software QUAL2K, que permita simular y reproducir la concentración de OD y localizar zonas anóxicas en el recorrido del río.

Por ende y debido a la época más sensible del año, en que se decide realizar las pruebas de calidad de agua, las preguntas centrales de esta tesis son:

- a. ¿Tiene la capacidad el Río Fonseca, en la época crítica de verano de 2014, de autodepurarse naturalmente a pesar de la contaminación por vertido de aguas residuales?
- b. ¿Qué grado de factibilidad y practicidad implica la aplicación del QUAL2K como una herramienta predictiva de la calidad del agua?

Para dar respuesta a esto, se hace necesario el estudio de elementos influyentes en el análisis, principalmente:

1. Las condiciones actuales de contaminación por vertido de aguas residuales en el Río Fonseca, incluyendo la identificación del tipo de contaminante vertido en el río y sus efectos en la corriente.
2. Las zonas influenciadas por dicho vertido al río y sus características particulares.
3. Los parámetros y variables características propias del cauce y del cuerpo de agua, que influyen en la capacidad de autodepuración del río.

IV. JUSTIFICACIÓN DEL ESTUDIO

La problemática ambiental del Río Fonseca se origina principalmente en la falta un sistema de saneamiento integral de la ciudad de Boaco y de una cultura ambiental de la sociedad en general, causando la descarga de contaminantes sin un tratamiento idóneo hacia el río y a los usos inadecuados de las riberas y zonas cercanas al mismo. Para afrontar esta problemática es necesaria la evaluación del río como cuerpo receptor, a través de herramientas que permitan la predicción y análisis de la respuesta del río a diversos patrones de contaminación.

Entre las herramientas más usadas están los softwares de análisis de calidad de agua, entre ellos el QUAL2K, desarrollado para la EPA y de uso libre, el cual permite planear e identificar opciones de tratamiento del agua. El modelo además permite describir la evolución de procesos físicos y contaminantes en la corriente, bajo ciertas condiciones hidrológicas, hidráulicas y fisicoquímicas de los vertidos de aguas residuales, debiendo ser adecuadamente calibrado y verificado con datos obtenidos de mediciones de campo.

Con este estudio se pretende evaluar y modelar con ayuda del software QUAL2K, la capacidad de autodepuración del Río Fonseca, para brindar una herramienta poderosa a las autoridades competentes. De esta forma, se propone además brindar un recurso a manera de estudio piloto, que permita actualizar las normativas existentes en el país, basadas en el Decreto 21-2017 (disposiciones para el vertido de aguas residuales), el que actualmente solo norma la cantidad de contaminantes permisibles en la descarga de las aguas residuales, pero no considera las características propias del cuerpo de agua afectado.

Finalmente, a través del conocimiento y alimentación de datos del cuerpo de agua, valores de variables y parámetros requeridos, resultados del software e interpretación de los mismos, se pretende emitir un juicio sustentado sobre la dificultad y lo práctico de aplicar este modelo en nuestro entorno.

V. OBJETIVOS DEL ESTUDIO

5.1. Objetivo general

Evaluar la capacidad de autodepuración del Río Fonseca, en el municipio de Boaco, Nicaragua, en la época crítica de verano del año 2014.

5.2. Objetivos específicos

1. Identificar las principales fuentes de contaminación, por vertido de desechos en el Río Fonseca.
2. Determinar los factores físicos que influyen en la capacidad natural de autodepuración del Río Fonseca.
3. Determinar el potencial natural de remoción de materia orgánica (MO) contaminante, evaluada bajo la figura de DBO en la corriente del Río Fonseca.
4. Identificar las zonas de abatimiento y recuperación de OD por el vertido de desechos en el Río Fonseca.
5. Valorar la dificultad de aplicación del modelo QUAL2K, bajo limitados recursos instrumentales y analíticos.

VI. HIPÓTESIS DE ESTUDIO

Para el estudio del proceso de autodepuración que ocurre en el Río Fonseca, en el municipio de Boaco, se proponen las siguientes hipótesis de estudio:

6.1. Hipótesis nula

H₀: “El Río Fonseca posee la capacidad de autodepuración suficiente, como para recuperar la calidad previa a la descarga de aguas residuales, según datos de la época crítica de verano de 2014”.

6.2. Hipótesis alternativa

H_A: “Debido a la descarga de vertidos contaminantes, el Río Fonseca no es capaz de recuperar por autodepuración la calidad previa a la descarga de aguas residuales, según datos de la época crítica de verano de 2014”.

VII. MARCO TEÓRICO REFERENCIAL

Según Sainz (2007), la autodepuración es el proceso mediante el cual un cuerpo de agua es capaz de mantener la calidad de sus aguas, dentro de determinados límites, después de episodios de contaminación, gracias a un conjunto de fenómenos físicos, químicos y biológicos, que ocurren de forma natural y provocan la eliminación de materias extrañas incorporadas al mismo.

Usualmente esta capacidad se ve afectada por factores como: volumen del vertido, caudal del río que actúa como cuerpo receptor, concentración de los contaminantes en el efluente hacia el río y los factores físicos y climáticos del ambiente (Sainz, 2007).

7.1. El recurso agua

7.1.1. El agua en la naturaleza

Además de ser el recurso más abundante en la naturaleza, el agua es esencial para todas las formas de vida en la tierra. En especial el agua dulce, es vital para las actividades diarias del ser humano, sin embargo es un recurso cada vez más escaso, tanto en cantidad como en calidad, sufriendo cada vez más contaminación a raíz de las actividades antropogénicas. La distribución de las aguas del planeta tierra se presenta en la Tabla 1 a continuación.

Tabla 1. Distribución de los reservorios de agua en la naturaleza

Tipo de reservorio	% de agua total del planeta	% del total de agua dulce
Océanos y mares	97.5	---
Glaciares y polos	1.74	68.7
Aguas subterráneas dulces	0.76	30.1
Lagos de agua dulce	0.007	0.26
Lagos de agua salada	0.006	---
Ríos	0.0002	0.006
Biomasa	0.0001	0.003
Atmósfera	0.001	0.04

Nota. Fuente: García (2009).

7.1.2. Los recursos hídricos en Nicaragua

Nicaragua cuenta con unos 38,668 m³/cápita/año, similar a EEUU y Suiza. A pesar de esto, existe “escasez económica de agua”, al igual que en toda Centroamérica, ocasionada por falta de recursos financieros para utilizar, monitorear y mantener las fuentes de agua según los estándares para agua de consumo humano (Red Interamericana de Academias de Ciencias [IANAS], 2012).

Aunque Nicaragua cuenta con amplia disponibilidad de recursos hídricos, las fuentes de agua, en especial las superficiales, son estacionalmente dependientes. Esto sumado a la contaminación, provoca que las fuentes superficiales sean vulnerables pero muchas veces necesarias para suministrar agua de consumo humano (IANAS, 2012).

En la Tabla 2 se muestra un resumen de la situación de los recursos hídricos del país, en la que se observa una disponibilidad superior de recursos hídricos superficiales contra subterráneos, evidenciando la necesidad de una gestión adecuada para estos, de manera que se pueda garantizar el acceso de las generaciones futuras al recurso agua.

Tabla 2. Disponibilidad de recursos hídricos en Nicaragua

Región	Agua superficial (Mm³)	Agua subterránea (Mm³)	Total (Mm³)
Pacífico	4,023	2,862	6,885
Central	18,798	172	18,970
Atlántico	72,192	30	72,222
Total	95,013	3,064	98,077

Nota. Fuente: IANAS (2012).

7.1.3. Recursos hídricos superficiales en Boaco

Según Buitrago (2005), la mitad Oeste del departamento de Boaco vierte al Lago de Nicaragua (Cocibolca), que pertenece a la Cuenca del Río San Juan y la mitad Este a la Cuenca del Río Grande de Matagalpa, hacia el Mar Caribe. En el territorio Boaqueño nacen los ríos Tecolostote (55 km de largo) y Malacatoya (entre Boaco y Managua y < a 60 km), ambos afluentes del Lago Cocibolca.

A su vez, la unidad hidrográfica del Río Fonseca representa la parte alta de la Cuenca del Malacatoya, siendo de vital importancia al ser una zona de recarga. El Río Fonseca además constituye una fuente de abastecimiento de agua potable para la ciudad de Boaco, misma que está enteramente ubicada dentro de la unidad hidrográfica del Río Fonseca (ver Figura 3).

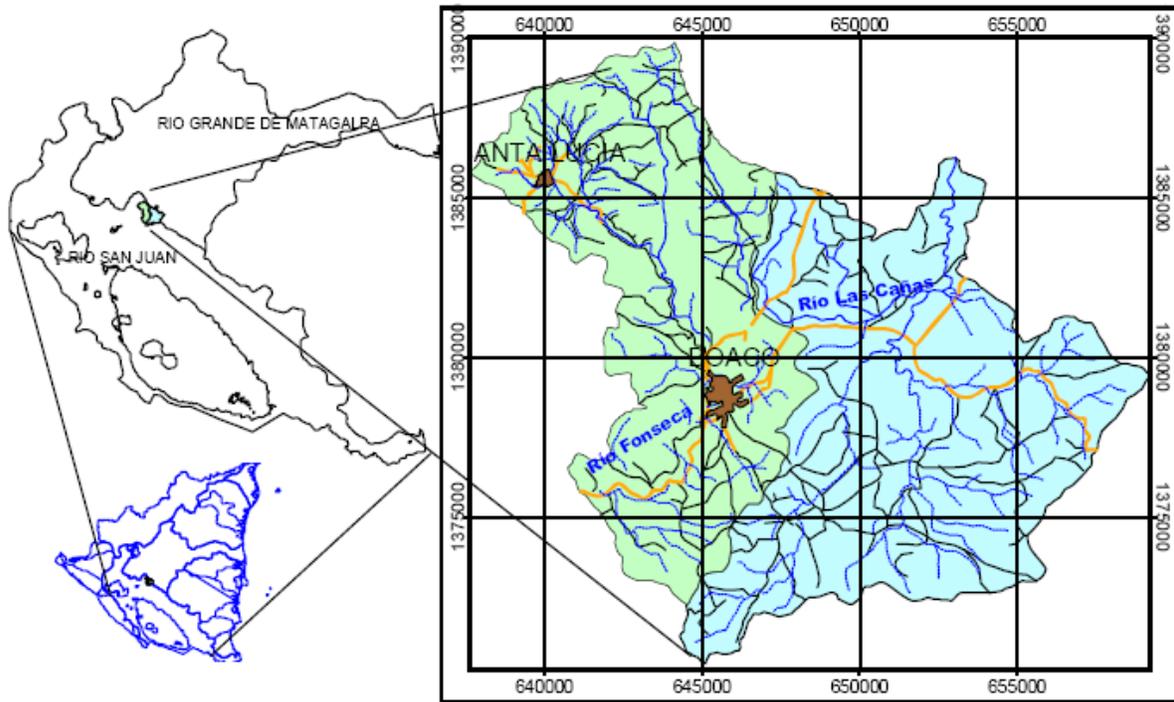


Figura 3. Unidades hidrográficas del Río Fonseca y Río Las Cañas

Nota. Fuente: Buitrago (2005)

Debido a la predominante actividad agropecuaria de la zona, las aguas superficiales presentan a menudo valores altos de conductividad eléctrica y turbiedad, además de un problema agravado por el vertido de las aguas domésticas a los cauces sin tratamiento previo.

También existe una distribución desigual del recurso agua, con áreas de escasez hídrica por distribución territorial irregular y estacional de las lluvias, lo que ha conllevado a períodos de corte de agua potable y escasez de agua superficial durante el verano. Esto ha provocado una gran demanda de agua de consumo que no alcanza a ser cubierta en el período de verano y que inclusive no se llega a cubrir en su totalidad en el invierno.

7.2. Contaminación del agua

Se considera que el agua está contaminada cuando su composición natural se modifica de modo que ya no es apta para los propósitos para los que estaba destinada, presentando además alteraciones físicas (temperatura, color, densidad, etc.), químicas (sustancias disueltas, composición, etc.) y biológicas (García, 2009).

A pesar de su vulnerabilidad a la contaminación, los cuerpos de agua superficiales son a menudo empleados como fuentes de abastecimiento para consumo humano, derivando en esfuerzos de monitoreo para poder garantizar el recurso en cantidad y calidad, sobre todo en sitios con alta demanda de parte de la población y escasez de fuentes de agua. Para este monitoreo, es necesario entender el proceso de contaminación de las aguas, que de acuerdo a García (2009) puede tener un origen natural o antrópico.

De acuerdo a García (2009), la contaminación de origen natural no provoca altas concentraciones contaminantes, siendo la menos influyente en la contaminación del agua, salvo en casos aislados y sitios concretos. Por otro lado, la contaminación antrópica constituye la principal causa de contaminación de las aguas, siendo causada por actividades desarrolladas por el ser humano, que conllevan a una enorme generación de residuos y alta demanda de agua a causa de la industrialización. Las principales fuentes antrópicas se describen a continuación:

1. *Vertidos de aguas residuales urbanas:* aguas de orden doméstico, en su mayoría residuos orgánicos con alta concentración de excretas.
2. *Vertidos industriales:* contaminación por procesos como refrigeración, transporte, disolventes, etc. Las principales industrias contaminantes son las de refinado de petróleo (cianuros, grasas, fenoles, sólidos diversos y álcalis), metalúrgicas (similares a las de refinado de petróleo además de agua caliente), industria papelera, textil y de curtidos (químicos orgánicos, sólidos, detergentes y tóxicos) y las químicas y farmacéuticas (metales pesados, químicos tóxicos y biológicos).

3. *Vertidos de ganadería*: aporte de estiércol y orina, además de microorganismos patógenos, sólidos en suspensión, MO, nitrógeno y fósforo. La principal afectación es por el transporte de estos al suelo y hacia cuerpos de agua cercanos.
4. *Vertidos agrícolas* (aporte de químicos como pesticidas, herbicidas y fertilizantes inorgánicos, además de sales del agua de riego).
5. *Otras causas* (contaminación por embarcaciones a motor, construcción de presas y explotación minera con vertido de contaminantes como cobre, cadmio, zinc, plomo y mercurio).

García (2009), además establece que la fuente de contaminación puede catalogarse como puntual si se produce en lugares muy concretos o dispersa, si la descarga de contaminantes se realiza en áreas muy extensas. En cuanto al tipo de contaminantes, para facilitar su estudio estos se pueden agrupar en las siguientes categorías:

1. *Microorganismos patógenos*: incluyen diferentes tipos de bacterias, virus, protozoos y otros tipos de microorganismos que transmiten enfermedades como el cólera, tifus, hepatitis, etc., siendo a menudo motivo de muerte en niños en países en vías de desarrollo. Estos llegan al agua a través de heces fecales y otros restos orgánicos.
2. *Desechos orgánicos*: residuos producidos por el ser humano. Estos incluyen heces y materiales que pueden ser descompuestos por bacterias aeróbicas en procesos de consumo de oxígeno. Al estar presente en exceso, este tipo de desechos agota el oxígeno, dificultando la permanencia de organismos que lo necesitan para vivir.
3. *Sustancias químicas inorgánicas*: incluyen ácidos, sales y metales tóxicos como el mercurio y plomo, pudiendo ocasionar serios daños a los seres vivos si están en altas concentraciones, además de ser causa de corrosión de equipos.
4. *Nutrientes vegetales inorgánicos*: incluyen nitratos y fósforos, los que son solubles en agua y necesarios para el desarrollo de las plantas, pero que también pueden causar la eutrofización de las aguas en caso de estar en altas concentraciones, lo que puede conllevar a agua inutilizable.

5. *Compuestos orgánicos*: incluye moléculas orgánicas como el petróleo, plásticos, disolventes y detergentes, con largos periodos de permanencia en el agua y con estructuras moleculares complejas y difíciles de degradar por los microorganismos.
6. *Sedimentos y materiales en suspensión*: partículas arrastradas por las aguas desde el suelo que junto a otros materiales en suspensión en el agua, forman la mayor fuente de contaminación en cuanto a masa total. La turbidez que provocan dificulta la vida de algunos microorganismos, destruyendo sitios de alimentación y desove de peces, además de rellenar lagos y pantanos, obstruyendo canales, ríos y puertos.
7. *Sustancias radiactivas*: isotopos radioactivos solubles, los que se pueden acumular a través de la cadena alimenticia hasta alcanzar concentraciones más altas en algunos tejidos vivos que las que poseían en el agua.
8. *Contaminación térmica*: agua caliente proveniente de centrales de energía o procesos industriales que al elevar la temperatura de ríos o embalses, disminuye su capacidad de contener oxígeno, afectando así la vida de los microorganismos.

En términos de vigilancia, además es importante identificar los efectos de los contaminantes. Según Suárez (2008), los efectos pueden diferir en tiempo y espacio en dependencia del contaminante, distinguiéndose:

- a. *Contaminantes de efecto inmediato*: Es un caso común de toxicidad aguda, donde superado cierto umbral de contaminación se produce el efecto negativo.
- b. *Contaminantes de efecto diferido en el espacio*: Los efectos se aprecian aguas abajo de la corriente, lejos del lugar inicial de vertido. Un ejemplo de esta contaminación es la MO que provoca un descenso de oxígeno disuelto (OD) aguas abajo.
- c. *Contaminantes de efecto diferido en el tiempo*: Efecto no inmediato, sino producto de la acumulación del contaminante y la aparición de ciertas condiciones en el medio acuático. Un ejemplo es la eutrofización a causa de acumulación de nutrientes.

7.3. Vertido de aguas residuales en ríos

Se identifica a las aguas residuales (AR) como aquellas que contienen impurezas o contaminantes, ya sean sólidos, líquidos, gases o sus combinaciones, en concentración tal que perjudique al ambiente, en caso de depositarse en el mismo (Karia & Christian, 2013).

7.3.1. Tipos de aguas residuales

Las aguas residuales suelen clasificarse de acuerdo a su origen. Según Karia & Christian (2013), la clasificación general suele ser de 2 grupos:

1. *Aguas residuales domésticas (ARD)*: Derivadas de zonas residenciales, comerciales e institucionales, e inclusive de desechos parcialmente tratados, provenientes de pequeñas industrias. En general las ARD contienen sólidos orgánicos e inorgánicos, además de microorganismos, sobre todo bacterias. Además, la composición de dichas ARD depende de su fuente de generación.
2. *Aguas residuales industriales (ARI)*: Generadas por medianas y grandes industrias. Varían en cantidad y calidad, dependiendo del tipo de industria y sus procesos. En general, la mayoría de industrias manufactureras producen gran volumen de aguas con alta carga de contaminantes, en su mayoría con compuestos químicos.

7.3.2. Características de las aguas residuales

Las características y los contaminantes de las aguas residuales están íntimamente ligados a la variedad de usos que se brinda al agua de consumo. Por ende el estudio de estas características está encaminado a implementar los medios óptimos para reducir o eliminar las concentraciones de dichos contaminantes.

Según Karia & Christian (2013), las características de las aguas residuales dependen de la calidad de la fuente de agua usada, así como las prácticas de conservación y la cultura de los usuarios, además de los efluentes descargados en el alcantarillado por las industrias.

Karia & Christian (2013), además plantean la importancia de conocer la carga del contaminante además de sus características, determinadas a través de concentraciones de los parámetros más significativos en el agua residual, tanto físicos como químicos y biológicos. En el caso de las ARD, estos parámetros pueden apreciarse en la Tabla 3.

El conocimiento de estas concentraciones es esencial para establecer tratamiento de estas aguas residuales, de forma que se permitan remover contaminantes y llevar tales características a valores permitidos según las regulaciones locales.

Tabla 3. Características de parámetros significantes de las ARD

Características físicas	Características químicas	Características biológicas
- Sólidos (totales, suspendidos y disueltos, volátiles y minerales)	- Contenido orgánico (DBO, DQO, grasas, fenoles, aceites, etc.)	- Animales
- Color	- Contenido inorgánico (alcalinidad, cloruros, nitrógeno, sulfuro, fósforo, metales pesados, hidratos de carbono, etc.)	- Plantas
- Temperatura	- Gases (oxígeno, metano, sulfuro de hidrógeno, etc.),	- Protistas
- Olor		- Organismos patógenos

Nota. Fuente: Karia & Christian (2013).

7.3.3. Efectos de la descarga de aguas residuales a ríos

La descarga de aguas residuales a cuerpos receptores, particularmente a ríos, es una práctica antigua debido al asentamiento de núcleos urbanos en sus cercanías. De esta forma la contaminación puntual y acumulada ha conllevado a graves situaciones de contaminación en ríos y otros cuerpos receptores alrededor del mundo.

Debido a las condiciones particulares de asimilación de contaminantes de cada río, además de las características de las aguas residuales, es necesario el estudio de la contaminación para caso en específico, con un conocimiento adecuado sobre los efectos que cada contaminante conlleva en el cuerpo de agua. Según Suárez (2008), los efectos negativos varían en dependencia del contaminante, entre los más importantes se mencionan:

- a. *Sales orgánicas*: endurecen el agua y producen incrustaciones en los sistemas de distribución. Las sales inorgánicas de fósforo y nitrógeno además originan fenómenos de eutrofización. La ausencia total de sales produce agua corrosiva y/o sin gusto.
- b. *Ácidos y álcalis*: el pH es un parámetro básico para varios usos del agua y la sobrevivencia de varios organismos en los cuerpos receptores, recomendándose rangos entre 4.5-9, sin embargo cerca de vertidos industriales pueden registrar valores desde 2 hasta 11.
- c. *Materia orgánica (MO)*: causa de déficit de oxígeno en los ríos, siendo el factor más importante en la contaminación de los ríos. Esto crea condiciones sépticas con olores y gustos desagradables, incluso eliminando la vida acuática de peces y microorganismos.
- d. *Sólidos en suspensión*: además del aumento de turbidez, al precipitarse en el fondo, los sólidos con MO demandan OD, produciendo gases, burbujeo y malos olores. También pueden cubrir zonas de desove y obstruir las branquias de los peces. En condiciones de sedimentación, también puede darse una resuspensión que provoque una contaminación superior a la original por efectos de acumulación.
- e. *Sólidos y líquidos flotantes*: aceites, grasas, espumas, materiales flotantes y residuos sólidos, que además de ser tóxicos para la vida acuática y dar aspecto desagradable, impiden el paso de luz a través del agua, afectando el crecimiento de las plantas.
- f. *Temperatura elevada*: Provoca estratificación por diferencias de densidades en el agua y estrés en la vida acuática al tener que retirarse a la zona profunda de la corriente, además ocasiona incremento de la acción bacteriana, acelerando la disminución del OD en el río.
- g. *Color*: este es indicador de contaminación, interfiriendo además en la transmisión de luz solar en la corriente, disminuyendo así la acción fotosintética. Esta característica es además causa de repulsión inmediata de parte de los usuarios.
- h. *Productos químicos tóxicos*: en algunas ocasiones estos contaminantes provienen de las industrias. Sin embargo la descarga puede ser indirecta, por ejemplo el vertido de lavado de tanques de transporte de productos químicos. Estos contaminantes son muy peligrosos dado que pueden llegar a pasar desapercibidos y acumularse, dañando progresivamente el sistema biológico de peces y seres humanos.

- i. *Microorganismos*: se identifican dos grupos de microorganismos, los que contribuyen a degradar MO (necesarios para la depuración natural, pero indeseables en grandes cantidades) y los patógenos (inaceptables en aguas de consumo debido a la transmisión de enfermedades peligrosas para el ser humano).

7.3.4. Normativas de descarga

Usualmente las normativas de descarga a cuerpos receptores, tienen como objetivo la prevención de la contaminación en el recurso agua, estableciendo rangos de parámetros estandarizados, como regulaciones para proteger la calidad del agua y preservar la integridad de las personas con las que pueda interrelacionarse el recurso.

Nicaragua regula estas características con el Decreto 21-2017 (Ver Tabla 4) “Disposiciones para el vertido de aguas residuales”, dictado por la Presidencia de la República y publicado en el Diario Oficial La Gaceta el 30 de noviembre del 2017. Este decreto reemplaza al conocido Decreto 33-95 para vertido de aguas residuales, que se implementó por más de dos décadas en el país.

Tabla 4. Parámetros de calidad para vertidos provenientes de sistemas de tratamiento del alcantarillado sanitario a cuerpos receptores

Parámetro	Unidad	Rangos y valores máximos permisibles
pH		6 - 9
Sólidos suspendidos totales	mg/L	100
Sólidos sedimentables	mg/L	1
Aceites y grasas totales	mg/L	20
DBO ₅	mg/L	110
DQO	mg/L	220
Nitrógeno total	mg/L	45
Fosforo total	mg/L	15
Coliformes fecales (período 2017-2022)	NMP/100mL	1x10 ⁵
Coliformes fecales (período 2023-2026)	NMP/100mL	1x10 ⁴
Coliformes fecales (período 2027-2029)	NMP/100mL	1x10 ³

Nota. Fuente: Decreto 21-2017.

7.4. Calidad del agua

7.4.1. Parámetros significativos en la calidad del agua

Para indicar contaminación en el agua, se relacionan sus características físicas, químicas y biológicas, que a su vez dependen de la geología, el ecosistema y actividades humanas en la zona. Además, es necesario evaluar la calidad del agua de forma comprensible para los encargados de su manejo y para público con conocimiento limitado (Torres, 2009). Para esto es fundamental la elección de variables que serán referencia para estimar el nivel de contaminación, en base al uso destinado para determinado cuerpo de agua.

Según Torres (2009), a través de un consenso entre expertos en calidad de agua, se plantean una serie de parámetros o variables (Tabla 5), que además de ser indicadores medibles en campo, aportan información de las características físicas, químicas y biológicas del agua y son ponderadamente los más significativos en el estudio de la calidad del agua. Una mejor descripción de estas variables puede además apreciarse en el Anexo 1 de este documento.

Tabla 5. Variables más significativas en el estudio de la calidad del agua

Variables	Tipo de parámetro		
	Físico	Químico	Biológico
Coliformes fecales			X
Oxígeno disuelto (OD)		X	
pH		X	
Nitratos		X	
Fósforo total		X	
Demanda bioquímica de oxígeno (DBO ₅)			X
Nitrógeno de amonio		X	
Sedimentos suspendidos	X		
Mercurio		X	
Plomo		X	
Temperatura	X		

Nota. Fuente: Torres (2009).

7.4.2. Clasificación del recurso hídrico

Considerando un enfoque de conservación de los ecosistemas originales, se considera analizar los parámetros de calidad del Río Fonseca bajo la normativa NTON 05 007-98 "Clasificación de los recursos hídricos", teniendo en cuenta que:

- Aunque oficialmente no se pueden autorizar captaciones aguas debajo de la descarga de aguas residuales, es una situación verificada en campo que en algunos sitios del tramo estudiado la población aledaña a la ribera del río utiliza el agua para actividades diarias, con riesgos potenciales a la salud.
- Para analizar el proceso de autodepuración y dado que aguas arriba se capta agua para potabilización, se asume que previo a la descarga de contaminantes el río como recurso hídrico posee calidad suficiente para servir en la captación de agua de consumo humano, por lo tanto la medida del éxito del proceso de autodepuración se debe referir a estos mismos parámetros de calidad.

La NTON 05 007-98 plantea que las aguas destinadas al consumo humano entran en la clasificación de aguas tipo 1, dividiéndose a su vez en categorías 1A (pueden acondicionarse con desinfección) y 1B (requieren tratamientos convencionales de coagulación, floculación, sedimentación, filtración y/o coloración). Los parámetros de calidad requeridos para clasificar en estas categorías recurso hídrico se plantean en la Tabla 6 a continuación:

Tabla 6. Características de las aguas Tipo 1

Parámetro	Unidad	Límite o rango máximo	
		Categoría 1A	Categoría 1B
Oxígeno disuelto	mg/l	> 4.0 (*)	> 4.0 (*)
Demanda de oxígeno (DBO ₅ , 20)	mg/l	2.00	5.00
pH		6.0 - 8.5	6.0 - 8.5
Color real	U Pt-Co	< 15	< 150
Turbiedad	UNT	< 5	< 250
Fluoruros	mg/l	0.7 - 1.5	< 1.7
Hierro total	mg/l	0.3	3
Mercurio total	mg/l	0.001	0.01
Plomo total	mg/l	0.01	0.05
Sólidos totales disueltos	mg/l	1,000	1,500
Sulfatos	mg/l	250	400
Zinc	mg/l	3	5
Cloruros	mg/l	250	600
Organismos coliformes	NMP/100ml	Totales (**)	(***)
(*) También puede ser como porcentaje de saturación y debe ser mayor de 50%			
(**) Promedio mensual menor de 2000 NMP por cada 100 ml.			
(***) Promedio mensual menor de 10000 NMP por cada 100 ml.			
Cianuro total	mg/l		0.10
Cobre total	mg/l		2.00
Cromo total	mg/l		0.05
Detergentes	mg/l		1.00
Dispersantes	mg/l		1.00
Dureza como CaCO ₃	mg/l		400
Extracto de carbono al cloroformo	mg/l		0.15
Fenoles	mg/l		0.002
Manganeso total	mg/l		0.50
Nitritos + Nitratos (N)	mg/l		10.00
Plata total	mg/l		0.05
Selenio	mg/l		0.01
Sodio	mg/l		200
Organofosforados y carbamatos	mg/l		0.10
Organoclorados	mg/l		0.20
Actividad a	(Bq/l)	máx. 0.10 bequerelio/litro	
Actividad B	(Bq/l)	máx. 1.00 bequerelio/litro	

Nota. Fuente: NTON 05 007-98.

7.5. Autodepuración de las aguas superficiales

Según Vélez (2017), se puede definir al proceso de autodepuración como un conjunto de fenómenos físicos, químicos y biológicos que se dan de forma natural en los cuerpos de agua, provocando la destrucción de materias extrañas al río. En este proceso se destaca la influencia de las bacterias aerobias, las que con ayuda del OD consumen la MO, además de las plantas acuáticas que ayudan en la asimilación de componentes en forma de nutrientes, así como otros procesos fotoquímicos, diluciones, etc.

Los ríos poseen cierta capacidad de autodepuración, sobre todo de MO, la cual en términos generales depende del caudal y la turbulencia del agua. El caudal permite la dilución del vertido y facilita su degradación, la turbulencia del agua por su parte aporta oxígeno diluido al medio, favoreciendo la actividad microbiana (Vélez, 2017).

Vélez (2017) además establece la influencia de la naturaleza y tamaño del vertido. Altas concentraciones de contaminantes en las aguas (biodegradables y no biodegradables), anulan la autodepuración al romper el equilibrio, provocando una zona contaminada que se recuperará de forma lenta y/o artificial. Además, los contaminantes como plaguicidas, fertilizantes, metales pesados, etc. no desaparecen de la corriente, sino que se acumulan en su lecho, incorporándose a las plantas y de ahí a las cadenas tróficas.

Por otro lado, Monte (2013), plantea que la velocidad de autodepuración en un cuerpo de agua suele depender de:

- Movimiento del agua (a mayor velocidad se produce mayor autodepuración, debido a que se oxigena más rápidamente).
- Profundidad (a mayor profundidad, se produce una escasez de OD, lo que conlleva a menor autodepuración).
- Superficie (a mayor superficie, se produce mayor contacto con el oxígeno desde la atmósfera, facilitando mayor transferencia de masa aire/agua).
- Presencia o ausencia de compuestos tóxicos para los microorganismos.

7.5.1. Procesos que intervienen en la autodepuración

a. Procesos físicos

Entre los más importantes están la sedimentación (depósito de materia en el fondo del río, velocidades usuales < 0.20 m/s), formando lodos con una degradación diferente a la materia suspendida; la radiación solar (única fuente de energía externa para la fotosíntesis, la cual aporta oxígeno al cauce; y la reaireación (de forma natural se aporta oxígeno desde la atmósfera hacia la corriente de agua, lo que tiende a equilibrar la concentración de OD en el cuerpo de agua.

b. Procesos químicos

Procesos por medio de los cuales se oxidan ciertas sustancias de naturaleza inorgánica presentes en el cuerpo de agua, tales como sulfitos, nitritos, sales ferrosas, etc., las que consumen más rápidamente el OD que los compuestos de carácter orgánico.

c. Procesos biológicos

Dan lugar a la degradación de MO, llevada a cabo por microorganismos presentes en el agua, dependientes de ciertas condiciones en el medio (temperatura, OD, profundidad del agua, etc.). Esto puede ocurrir por microorganismos aerobios o anaerobios. Los aerobios trabajan con OD, oxidando la MO y transformándola en sustancias inocuas (agua, dióxido de carbono, nitratos, fosfatos, etc.), generando a su vez su propia materia viva.

La degradación por organismos anaerobios, se da en condiciones de OD muy pequeñas o nulas, dando lugar a productos como metano o amoníaco, lo que genera efectos indeseables (malos olores, corrosión y toxicidad). También debe considerarse a los organismos facultados para trabajar en condiciones, tanto aerobias como anaerobias.

Para una descripción ampliada de los procesos físicos, químicos y biológicos tomados en cuenta para modelar el proceso de autodepuración del agua, empleando el modelo QUAL2K de la EPA, consultar los capítulos 4 y 5 de la documentación QUAL2K (QUAL2K: A modeling framework for simulating river and stream water quality).

7.5.2. Zonas en una corriente que se autodepura

Cuando se produce excesiva contaminación orgánica, es posible observar zonas de contaminación y recuperación bien definidas. Según Suárez (2008), estas son:

- i. *Zona de degradación:* Inmediata a la descarga de contaminantes. Presenta agua con alta turbidez, nula presencia de algas y peces (excepto los que necesiten poco OD y se alimenten de MO), lodos de fondo y descomposición anaerobia; además se da una progresiva reducción del OD a causa de la DBO.
- ii. *Zona de descomposición activa:* Caracterizada por bajos o nulos niveles de OD y descomposición anaerobia. En esta zona no viven peces y los organismos encargados de la descomposición orgánica trabajan activamente. En esta zona además pueden desprenderse espuma y gases como el metano, hidrógeno, nitrógeno, ácido sulfhídrico y otros que producen mal olor.
- iii. *Zona de recuperación:* Con gran parte de la MO sedimentada, tiene lugar una recuperación que hace que el agua se vuelva más clara y con menor proporción de lodos. Disminuyen el anhídrido carbónico y el amoníaco, aumentando a su vez el OD, nitritos y nitratos. En esta zona además disminuyen los hongos y reaparecen la vida acuática macroscópica y las algas, además de peces resistentes.
- iv. *Zona de agua limpia:* Con apariencia de aguas naturales, logrando un equilibrio de oxígeno (OD en cantidad superior a la DBO), llegando a niveles cercanos a la saturación. En esta zona se completa el proceso de autodepuración, con reducción de organismos patógenos, a pesar de sobrevivencia de algunos en aguas que requerirán tratamiento para destinarse al consumo humano, además de permanencia de compuestos metálicos no alterados por los procesos bioquímicos existentes.

Una apreciación gráfica del comportamiento del DBO y el OD en estas zonas se puede apreciar en la Figura 4.

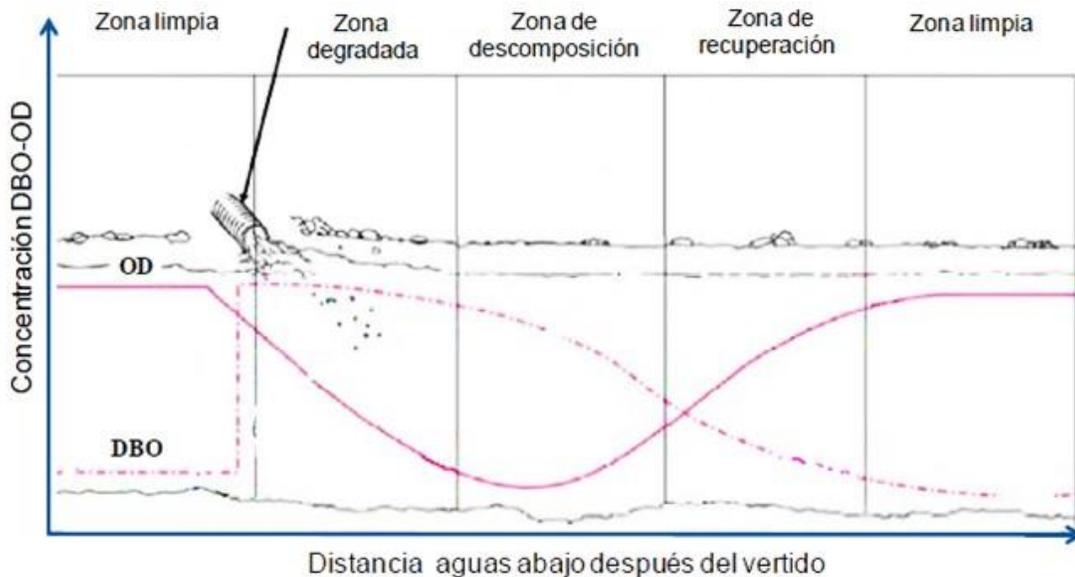


Figura 4. Zonas en la autodepuración de un río

Nota. Fuente: Monte (2013)

Cabe destacar que para la gestión integral de sistemas de saneamiento, con cuerpos de agua como receptores de contaminantes, es indispensable el estudio de estas zonas de influencia, ya que no en todos los ríos será posible identificar una zona de recuperación, en dependencia de las características propias del caso de estudio, situación crítica en cuerpos de agua que son también fuentes de agua para consumo humano.

7.5.3. El papel del oxígeno en la autodepuración

Según Suárez (2008), elegir un criterio para caracterizar el grado de contaminación de un río es muy difícil por la variedad de efectos que producen diferentes contaminantes sobre las aguas. Sin embargo, la contaminación debida a la MO es a menudo la que produce un efecto más significativo sobre el sistema acuático. La fuerte demanda de OD (sea por oxidación de la MO o inorgánica), desde la masa de agua o desde los sedimentos, crea problemas muy graves en todo el ecosistema acuático.

El OD es el factor energético fundamental para los seres vivos, por lo que bajas concentraciones llevan a desajustes en el ecosistema, mortalidad de peces, olores y otros efectos estéticos desagradables. Al ser una de las variables más importantes del sistema acuático, en el estudio de vertidos en sistemas naturales tradicionalmente se ha empleado el OD como indicador de calidad del agua, tanto por las altas cargas de sustancias demandantes de oxígeno que se dan con el vertido de aguas residuales, las que afectan significativamente la concentración de OD aguas abajo del punto de vertido, como por su extraordinaria importancia para la vida acuática.

Las condiciones aptas para el desarrollo de los organismos vivos, excepto para aquellos capaces de desarrollarse en condiciones anaerobias, se producen cuando la velocidad de consumo de OD en la corriente, es menor que las de aporte y producción. Las fuentes de OD incluyen: reaireación desde la atmósfera, oxígeno producto de fotosíntesis de plantas acuáticas, desnitrificación y cargas de OD externas. Los consumos de OD incluyen: oxidación de MO carbonácea (DBO_C o DBO) y nitrogenada (DBO_N), demanda de oxígeno por sedimentos y respiración de plantas acuáticas (Jiménez, 2008).

7.6. Movimiento de contaminantes en el medio acuático

De acuerdo a Santamaría (2013), cuando un contaminante ingresa a un medio acuático, su comportamiento se ve afectado por diversos factores y condiciones que hacen necesario simplificar el número de variables para cuantificar sus efectos sobre la fuente receptora. De forma general se identifican los siguientes movimientos que afectan la concentración de la sustancia contaminante:

- *Movimiento advectivo:* la sustancia o contaminante se mueve, o se transporta, de un sitio a otro en un cuerpo de agua debido a la fuerza o al impulso del caudal. En este caso la concentración de la sustancia cambia pero no así su composición química.

- *Movimiento por difusión:* la masa se traslada de un lugar a otro debido al movimiento al azar en el tiempo que tienen las moléculas de agua. En este caso la masa se diluye en el tiempo con movimiento desprendible, cambia su concentración pero no su composición química.
- *Movimiento por dispersión:* la sustancia contaminante se dispersa por diferencias de velocidad entre dos sitios en el agua. Cuando se presentan dichas diferencias de velocidad la sustancia se mueve en el espacio (eje x) y cambia su concentración pero no su composición química.

Santamaría (2013) además establece que en los ambientes acuáticos, la difusión y la dispersión causan la mezcla de los contaminantes en el agua. Por ejemplo, en los ríos y los estuarios predomina la dispersión debido a las diferencias de velocidad que se presentan en el cuerpo de agua.

7.7. Modelos matemáticos de calidad del agua

Como ya fue mencionado, los modelos de calidad de agua son herramientas que permiten simular la calidad del agua frente a ciertos contaminantes respecto a la distancia y el tiempo, permitiendo elegir las opciones de saneamiento más adecuadas, frente a las condiciones de contaminación específicas para cada cuerpo de agua.

Según Suárez (2008) la modelación de la calidad de aguas es una herramienta de gran interés dado que:

1. Facilita la comprensión de mecanismos e interacciones en los diferentes sistemas acuáticos, la cual debe soportarse con la formulación y comprobación de las hipótesis causa-efecto que relacionan entradas de agua residual y calidad del agua resultante.
2. Aporta bases racionales para tomar decisiones de control de la calidad de aguas.

Vélez (2017), además destaca las siguientes utilidades:

- a. Utilidad predictiva (evaluación del impacto de las decisiones de manejo en la cuenca y predicción de la evolución de la calidad del agua bajo diferentes escenarios).
- b. Utilidad como herramienta de planificación (establecimiento de: objetivos de calidad ambiental, políticas o normas de calidad de efluentes que garanticen proteger el recurso hídrico y distribución de costos ambientales asociados al efecto de diferentes descargas).

7.8. Modelo de Streeter-Phelps para DBO y OD

Es la forma clásica de modelación de calidad de agua en ríos. El trabajo pionero de H.W. Streeter & Earle B. Phelps en el año 1925 sobre el Río Ohio, condujo a la creación de la ecuación de Streeter-Phelps, también conocida como curva de déficit de oxígeno disuelto, curva SAG o curva de la cuchara. El modelo básicamente describe como en una corriente y a través de la distancia, el OD decrece a causa de la degradación del DBO.

Según Jiménez (2008), los dos mecanismos primarios que gobiernan el flujo de OD en una corriente sometida a la descarga de aguas residuales, son la descomposición de la MO y la reaireación. Es así que la ecuación clásica de Streeter-Phelps se deriva de una reacción consecutiva, en la que el déficit de OD producido por la oxidación biológica de MO, a continuación disminuye por la reaireación que tiene lugar en el cuerpo de agua.

7.8.1. Modelación de la DBO

Generalmente la DBO en la corriente sigue una reacción de primer orden, en la que la velocidad de reacción en un instante cualquiera es proporcional a la concentración de MO sin oxidar o remanente, que puede usarse por los microorganismos. Según Jiménez (2008), se considera que en las aguas superficiales usualmente existen valores de $DBO < 2 \text{ mg/L}$, mientras que en las contaminadas existen valores de $DBO > 10 \text{ mg/L}$.

Según Chapra (2008), cuando se aplica la modelación de DBO aguas abajo de una descarga de aguas residuales, debe considerarse que además de la descomposición, la DBO también puede removerse por sedimentación, por lo que la tasa de remoción total de la materia orgánica biodegradable en la corriente puede obtenerse mediante:

$$K_T = K_d + K_s \quad (\text{Ec. 1})$$

Dónde:

K_T : Tasa total de remoción de MO biodegradable (d^{-1})

K_d : Tasa de descomposición de la MO (d^{-1})

K_s : Tasa por pérdidas por sedimentación de la MO (d^{-1})

Jiménez (2008) por su parte plantea que en las pruebas de laboratorio solo se capturan los efectos bacterianos de la reacción, obviándose los efectos de remoción por sedimentación, por lo que la modelación de la DBO se enfoca en la constante K_d . Este valor obtenido en laboratorio se conoce como K_d de botella.

Además, la oxidación de DBO en las corrientes naturales involucra procesos que no ocurren en las pruebas de botella en laboratorio, por lo que los valores del coeficiente K_d suelen diferir en ambos entornos. Dichos procesos incluyen: biosorción en el lecho del río, turbulencia, rugosidad y la densidad poblacional y tipos de microorganismos adheridos.

Por su parte, Chapra (2008) plantea que en la mayoría de ríos los factores ambientales tienden a valores mayores de K_d natural en relación al K_d de botella, siendo las causas primarias de este incremento, la sedimentación y los efectos del lecho del río. El efecto de la sedimentación suele ser más significativo en corrientes con una fracción importante de sólidos orgánicos (efluentes de AR sin tratamiento) y en corrientes superficiales con profundidades menores a 1 m.

En cuanto al efecto del lecho del río, se considera de forma general que las bacterias adheridas a un medio soporte descomponen más eficientemente que las bacterias que flotan libremente, siendo la descomposición de fondo parametrizada como un flujo de transferencia de masa de DBO. De forma similar a la sedimentación, la descomposición de fondo es también más pronunciada en sistemas más superficiales, dado que el efecto es más significativo en relación a la descomposición volumétrica en el agua (Chapra, 2008),

Según Suárez (2008), la DBO remanente en el tiempo, se puede representar como:

$$\frac{dL_t}{dt} = -K_d * L_t \quad (\text{Ec. 2})$$

Dónde:

- L_t: DBO oxidable remanente o MO total presente a un tiempo t (mg/L)
- dt: Variación de tiempo (d)

Para la modelación de casos de estudio, se aplica la integración de la Ec. 2. Para esto Chapra (2008) plantea las ecuaciones básicas del modelo (Ec. 3-5), desprendidas también de soluciones gráficas deducidas del patrón general de reacción de DBO en una muestra de agua, presentado en la Figura 5.

$$L_t = L_0 * e^{-K_d * t} \quad (\text{Ec. 3})$$

$$y_t = L_0 - L_t \quad (\text{Ec. 4})$$

$$y_t = L_0 * (1 - e^{-K_d * t}) \quad (\text{Ec. 5})$$

Dónde:

- L₀: DBO última o concentración inicial de MO oxidable (mg/L)
- y_t: DBO ejercida (oxígeno consumido durante el proceso de descomposición (DBO) (mg/L)

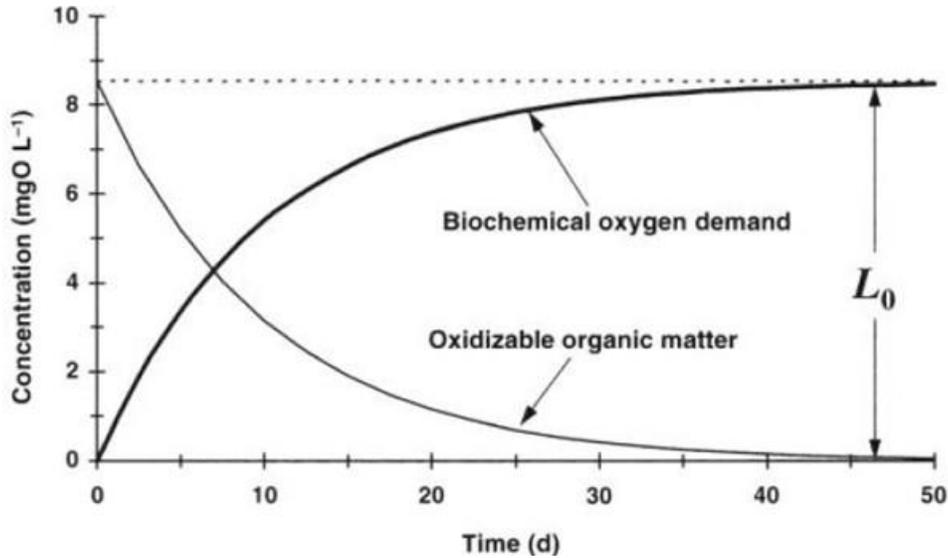


Figura 5. Patrón general de reacción de DBO en una muestra de agua

Nota. Fuente: Chapra (2008)

La reacción K_d además aumenta con la temperatura y suele relacionarse con la velocidad de reacción a temperatura estándar de 20°C. Según Jiménez (2008), para considerar el efecto de la temperatura sobre la velocidad de la reacción se utiliza la fórmula de Arrhenius considerándose para K_d :

$$K_{d(T)} = K_{d(20^{\circ}\text{C})} * \theta^{[T-20]} \quad (\text{Ec. 6})$$

Dónde:

$K_{d(T)}$: Velocidad de la reacción a una temperatura T (d^{-1})

$K_{d(20^{\circ}\text{C})}$: Velocidad de la reacción a 20°C (d^{-1})

θ : Constante que depende del tipo de proceso (1.047)

De acuerdo a CONAGUA (2015), la Ec. 6 suele aplicarse en un intervalo de temperatura mesófilos, con valores límites entre 4 y 35 °C. La mayoría de las bacterias trabajan en intervalos de temperatura mesófilos, acelerándose el proceso de biodegradación por encima de los 25 °C y disminuyendo la eficiencia del proceso a bajas temperaturas, dado que se presenta una reducción de la población de algas y del metabolismo bacteriano, obteniéndose la producción óptima de oxígeno a los 20 °C.

CONAGUA (2015) además plantea que la actividad microbiana es más intensa a mayores temperaturas (actividad descrita mediante un modelo matemático de primer orden), lo que ocasiona un incremento en los requerimientos de OD y una disminución en la solubilidad del oxígeno proveniente de la atmósfera. Debido a esto, las condiciones críticas de deficiencia de oxígeno ocurren con mayor frecuencia en períodos de verano. Además, si no se abastecen las cantidades requeridas de OD, se pueden propiciar condiciones anaerobias, con presencia de olores desagradables y un efluente turbio.

7.8.2. DBO Última (DBOu)

La DBOu es un parámetro utilizado en modelaciones matemáticas para predecir el impacto de descarga de AR en cuerpos de agua. La DBOu cuantifica en su totalidad la degradación bioquímica por microorganismos acuáticos e incluye 2 etapas. En la 1era se estabiliza la MO carbonácea (DBO carbonácea DBOC o rápida) y en la 2da se oxidan los compuestos nitrogenados (DBO nitrogenada DBON o lenta).

Ambos tipos de DBO pueden ser medidos en laboratorio y contribuyen a la DBOu, pero los valores y tasas de oxidación difieren (Penn, Pauer & Mihelcic, s.f.).

Estas etapas pueden ocurrir simultáneamente, pero usualmente se asume que la MO carbonácea se oxida casi en su totalidad cuando apenas se aprecia la presencia de la nitrificación en el laboratorio, de 6 a 10 días después de iniciada la incubación (Jiménez, 2008). Para evitar errores estimando la DBOC a causa de bacterias nitrificantes, se usa un período de incubación de 5 días (DBO₅).

Según Suárez (2008), aunque la oxidación bioquímica en teoría tarda un tiempo infinito en completarse, se conoce que la oxidación se ha completado en un 95-99% a los 20 días la y en un 60-70% a los cinco días.

Para la DBOCu, Chapra (2012) plantea: a) incubar en un tiempo más largo la muestra o b) extrapolar este valor a partir del DBO₅, empleando la tasa K_d de la botella (diferente a la que ocurre en condiciones reales). Esto se puede lograr empleando la ecuación:

$$DBOC_u = \frac{DBOC_5}{(1 - e^{-K_d \cdot 5})} \quad (\text{Ec. 7})$$

Dónde:

DBOC_u: DBO carbonácea última (mg/L)

DBOC₅: DBO carbonácea a los 5 días de incubación (mg/L)

Chapra (2008) plantea valores típicos para la tasa K_d de botellas, con valores usuales de 0.05 a 0.5 d⁻¹, en dependencia del nivel de tratamiento. Para tratamiento primario, recomienda valores de 0.10 a 0.30 d⁻¹, con un promedio recomendado de 0.20 d⁻¹. Penn et al. (s.f.), además dice que al momento de estimar la DBOCu además se asume que los compuestos nitrogenados son inhibidos y no contribuyen al consumo total de oxígeno.

7.8.3. Curva de déficit de oxígeno (Curva SAG / Curva de la cuchara)

Suponiendo una corriente libre de contaminantes, se supone que los niveles de OD antes de la descarga de AR serán cercanos a la saturación. Esta saturación es el máximo OD que permite el agua según su temperatura y presión atmosférica, siendo que cuanto más fría y a mayor presión atmosférica, mayor será el nivel de saturación (Chapra, 2008).

Según Chapra (2008), la introducción de agua residual no tratada aumenta los niveles de MO (sólida y disuelta). Esto conlleva a 2 situaciones:

1. La materia sólida enturbia el agua, por lo que la luz ya no penetra de la misma forma y se suprime el crecimiento de las plantas y algas. Además, algunos de los sólidos se acumulan aguas debajo de la caída de las aguas residuales, produciéndose lechos de lodos con posibles olores nocivos.

2. La MO provee alimento a los organismos heterótrofos, ocasionando que grandes poblaciones de organismos descomponedores fragmenten la MO en el agua, agotando el OD en el proceso.

Chapra (2008) además plantea que a medida que decrece el OD, el oxígeno atmosférico entra en la corriente de agua para compensar el déficit. Al inicio, el consumo de oxígeno y los sedimentos en el agua aminoran la reaeración, pero a medida que la MO se asimila y el OD decae, se da un punto en que el agotamiento y la reaeración estarán en balance. Lo descrito anteriormente puede apreciarse mejor en la Figura 6.

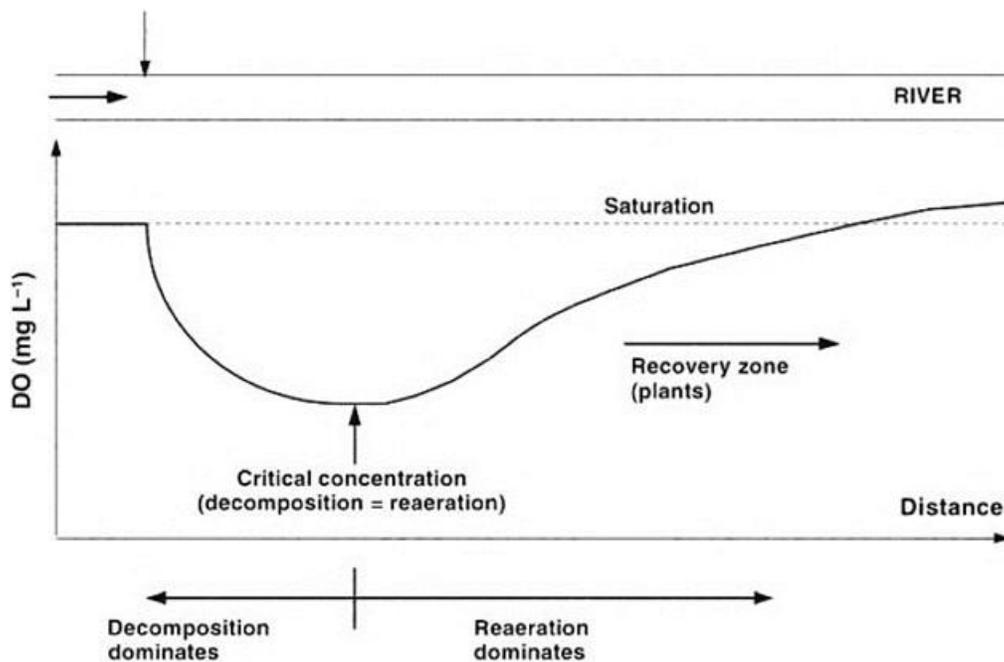


Figura 6. Curva de déficit de oxígeno en un río

Nota. Fuente: Chapra (2008)

En este punto de balance, se alcanza el nivel crítico de oxígeno, siendo que más allá de este punto domina la reaeración y los niveles de oxígeno empiezan a aumentar. Esta concentración crítica es el elemento clave de la curva y depende de factores tales como la cantidad de la descarga de aguas residuales, el flujo y morfología de la corriente, la temperatura del agua, entre otros (Chapra, 2008).

7.8.4. Balance de oxígeno

Según Suárez (2008), la reaireación (transferencia de oxígeno atmosférico al agua en forma de OD), es uno de los principales aportes de OD a la corriente. La velocidad de transferencia al agua depende entre otros factores de la temperatura, presión, déficit inicial, salinidad, agitación, superficie de contacto y presencia de tensoactivos.

La agitación en especial aumenta la velocidad a la que el oxígeno se disuelve. La MO que desaparece durante el proceso de descomposición en la corriente, indica la cantidad de oxígeno que desaparece en la columna de agua, esto expresado a través de:

$$dOD/dt = dL_t/dt = -K_d * L_t \quad (\text{Ec. 8})$$

En el balance de oxígeno aguas abajo del punto de vertido, también se considera el intercambio de oxígeno con la atmósfera. Suárez (2008) plantea este fenómeno mediante una ley de cinética de primer orden, donde el aporte de oxígeno por unidad de tiempo es proporcional al déficit de oxígeno respecto al valor de saturación (Ec. 9).

$$dOD/dt = K_r * D \quad (\text{Ec. 9})$$

Dónde:

Kr: Coeficiente de reaireación (d^{-1})

D: Déficit de oxígeno disuelto (mg/L)

Considerando además que en cualquier tiempo de la curva SAG, el déficit D equivale a cuán lejos la concentración de OD en el agua se encuentra del nivel de saturación, la reaireación se puede estimar como:

$$dOD/dt = K_r * (OD_s - OD_t) \quad (\text{Ec. 10})$$

Dónde:

OD_s: Concentración de OD saturado (mg/L)

OD_t: Concentración de OD en la corriente en un tiempo t (mg/L)

Siendo estos modelos de descomposición y reaireación lineales y de primer orden, los cambios en el oxígeno disuelto aguas debajo de un punto de vertido pueden expresarse con la Ecuación de Streeter-Phelps en función del OD (Ec. 11) o en función del déficit de oxígeno (Ec. 12), suponiendo que el nivel de oxígeno en saturación no cambia.

$$dOD/dt = -K_d * L_t + K_r * (OD_s - OD_t) \quad (\text{Ec. 11})$$

$$dD/dt = -K_d * L_t + K_r * D \quad (\text{Ec. 12})$$

El modelo clásico de Streeter-Phelps además presenta la solución para el déficit de oxígeno como:

$$D = D_0 * e^{-K_r t} + \left(\frac{K_d L_0}{K_r - K_d} \right) * (e^{-K_d t} - e^{-K_r t}) \quad (\text{Ec. 13})$$

$$OD = OD_s - D \quad (\text{Ec. 14})$$

Dónde:

- D: Déficit de oxígeno en un tiempo t (mg/L)
- Do: Déficit de oxígeno inicial (mg/L)
- ODs: Oxígeno disuelto saturado (mg/L)

La estimación del ODs puede obtenerse a partir de la temperatura del tramo de corriente, utilizando la siguiente ecuación propuesta por la American Public Health Association (APHA).

$$\ln OD_s = -139.34411 + \left(\frac{1.575701 * 10^5}{T_a} \right) - \left(\frac{6.642308 * 10^7}{T_a^2} \right) + \left(\frac{1.2438 * 10^{10}}{T_a^3} \right) - \left(\frac{8.621949 * 10^{11}}{T_a^4} \right) \quad (\text{Ec. 15})$$

Dónde:

- ln OD_s: Concentración de OD saturado (mg/L) a una presión estándar de 1 atm
- T_a: Temperatura del agua (K)

Este valor de ODs debe además ser corregido para considerar los efectos de dependencia para la saturación de la presión, para esto se puede emplear la siguiente fórmula, propuesta también por la APHA:

$$OD_{sc} = OD_s * P * \left[\frac{(1 - P_{wv}/P) * (1 - \theta * P)}{(1 - P_{wv}) * (1 - \theta)} \right] \quad (\text{Ec. 16})$$

Dónde:

- P: Presión atmosférica (atm)
 ODs: Concentración de saturación del OD a una presión de 1 atm (mg/L)
 ODsc: Concentración de saturación del OD a una presión P (mg/L)
 Pwv: Presión parcial de vapor de agua (atm)

$$\ln P_{wv} = 11.8571 - \frac{3840.70}{T_a} - \frac{216961}{T_a^2} \quad (\text{Ec. 17})$$

Dónde:

- Ta: Temperatura del agua (K)

$$\theta = 0.000975 - 1.426 * 10^{-5} * T + 6.436 * 10^{-8} * T^2 \quad (\text{Ec. 18})$$

Dónde:

- Ta: Temperatura del agua ($^{\circ}\text{C}$)

Según Chapra (2008), existen diversas ecuaciones desarrolladas como estimación en la aproximación a valores de Kr en los ríos, destacándose las fórmulas de:

O'Connor & Dobbins:

$$K_r = 3.93 * U^{0.5} / H^{1.5} \quad (\text{Ec. 19})$$

Churchill:

$$K_r = 5.026 * U / H^{1.67} \quad (\text{Ec. 20})$$

Owens & Gibbs:

$$K_r = 5.32 * U^{0.67} / H^{1.85} \quad (\text{Ec. 21})$$

Dónde:

U: Velocidad de la corriente (m/s)

H: Profundidad de la corriente (m)

Al igual que la constante K_d , la reacción K_r varía con la temperatura, relacionándose con la temperatura estándar de 20 °C de acuerdo a lo descrito en la Ec. 22. Los rangos de aplicación en dependencia de la temperatura son iguales a los planteados en el acápite 7.8.1.

$$K_{r(T)} = K_{r(20^\circ\text{C})} * \theta^{[T-20]} \quad (\text{Ec. 22})$$

Dónde:

$K_{r(T)}$: Velocidad de la reacción K_r a una temperatura T (d^{-1})

$K_{r(20^\circ\text{C})}$: Velocidad de la reacción K_r a 20°C (d^{-1})

θ : Constante que depende del tipo de proceso (1.024)

Una vez definida la ecuación de Streeter-Phelps, se determinan las condiciones más desfavorables que producen el valor más alto de déficit de oxígeno en la Curva SAG. Esto es posible mediante el cálculo del tiempo crítico con la Ec. 23 planteada por Santamaría (2013). El déficit crítico de OD se obtiene introduciendo el t_c en la Ec. 13 ya descrita.

$$t_c = \frac{1}{K_r - K_d} * \ln \left[\frac{K_r}{K_d} * \left(1 - \frac{D_0 * (K_r - K_d)}{K_d * L_0} \right) \right] \quad (\text{Ec. 23})$$

Dónde:

t_c : Tiempo del flujo hasta el punto crítico de OD (días)

Estos valores son fundamentales para trabajar dentro de las normas de calidad impuestas para determinado río, para el cual se requieran ciertos valores mínimos de OD para sus corrientes, en función de los objetivos de calidad de la autoridad.

Es útil tener en cuenta que las condiciones críticas para el río, suelen coincidir con las épocas de caudal mínimo y mayores temperaturas, dado que esto además de disminuir el valor de la concentración de saturación del OD, aumenta la actividad de los organismos y en consecuencia aumenta la tasa de oxidación de la materia orgánica.

7.9. Modelación de la calidad del agua empleando QUAL2K

En la actualidad, el modelo computacional más conocido y utilizado para evaluar el impacto de contaminantes convencionales es el QUAL2K. El software QUAL2K es un programa que permite simular el flujo y calidad de agua en las corrientes de agua superficiales, siendo capaz de simular los procesos físico-químicos que tienen lugar en el río a continuación de determinado vertido.

El modelo QUAL2K fue desarrollado por el profesor Steven Chapra y su equipo de trabajo para la EPA, siendo una versión actualizada del modelo QUAL2E. Este es un software libre, de modelación unidimensional de calidad de agua sobre corrientes superficiales, el cual puede ser descargado de la página web de la EPA y es capaz de simular al menos 19 variables distintas de calidad de agua, representando una mejora de la versión anterior del software QUAL2E (Vera, 2007).

7.9.1. Elementos de análisis

Según la EPA (s.f.), algunos de los elementos importantes de este modelo son:

1. *Segmentación de modelos*: Modela tramos de la corriente aún sin ser de la misma longitud. Además incluye descarga o sustracción en cualquier punto de la corriente.
2. *Especiación de la DBO carbonácea*: Usa dos formas de DBO carbonácea: una forma de lenta oxidación (DBO_C lenta) y una forma de oxidación rápida (DBO_C rápida).
3. *Algas de fondo*: QUAL2K simula explícitamente las algas de fondo incrustadas.
4. *Extinción de luz*: En función de las algas presentes, detritos y sólidos inorgánicos.

5. *pH*: Simulación del pH en base a la alcalinidad y del carbón inorgánico total.
6. *Patógenos*: Simulación de patógenos genéricos, donde la remoción del mismo se determina en base a la temperatura y el arreglo de los mismos.

7.9.2. Descripción del software

Al igual que su predecesor, el QUAL2K permite modelar los principales parámetros de calidad del agua. Además el software está diseñado de manera que permite simular diferentes escenarios, con estrategias para conservar y mejorar la calidad del agua de corrientes superficiales (Montelongo, Gordillo, Otazo, Villagómez, Acevedo & Prieto; 2008).

El software evalúa la asimilación y dilución de contaminantes en la corriente, además de simular diversos fenómenos físicos. El modelo se calibra con parámetros medidos en la corriente, representando la calidad del agua de cada sistema (Montelongo et al., 2008).

La información se presenta a través de Microsoft Excel, introduciendo datos para cada caso de estudio. Los datos de entrada están divididos en segmentación del modelo, requerimientos computacionales, información climatológica e hidráulica de cada una de las secciones y los valores de calidad de agua medidos en la corriente (Vera, 2007).

La información de salida presenta únicamente valores de calidad del agua para las secciones definidas, de forma tanto tabular como gráfica para mayor comprensión de parte del usuario. El programa básicamente puede ser ejecutado desde dos plataformas distintas de programación: visual basic para Microsoft Excel y en Fortran 90 (Vera, 2007).

7.9.3. Aproximación teórica del programa

QUAL2K simula el transporte de contaminantes convencionales (no tóxicos), evaluando la capacidad de asimilación de las corrientes superficiales ante contaminantes. El tramo del río que se pretende modelar se divide en un número de segmentos o “reaches”, que a su vez se dividen en elementos cuya cantidad puede ser definida por el usuario. Además a lo largo de cada tramo, las propiedades físicas, hidráulicas, químicas y biológicas permanecen constantes (Vera, 2007).

Una representación de modelación de un río y sus tributarios, puede observarse en la Figura 7. Para cada subtramo además se realiza un balance hidrológico (caudal), un balance térmico (temperatura) y un balance de concentración de cada constituyente simulado. De esta forma puede darse una ganancia o pérdida de masa en cada elemento debido a procesos de transporte, fuentes externas o sumideros (Vera, 2007).

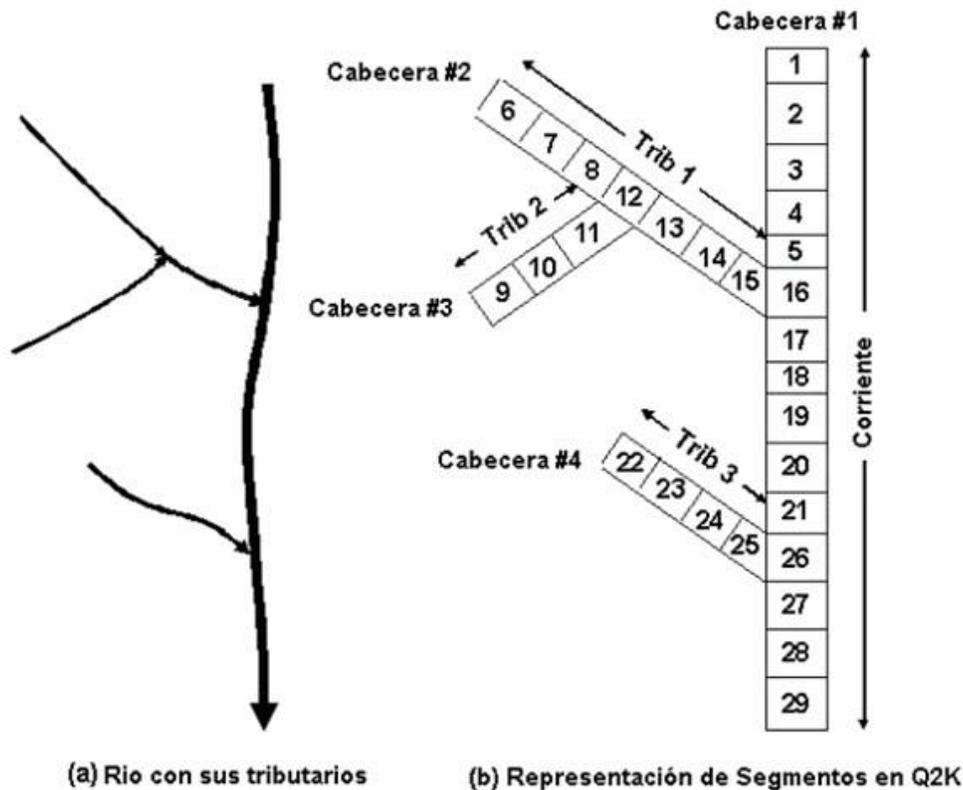


Figura 7. División de un río natural y sus tributarios en segmentos de QUAL2K

Nota. Fuente: Vera (2007).

7.10. Patógenos y decaimiento bacteriano en la corriente

Dado que el agua es un elemento esencial para la vida, debe abastecerse de forma adecuada y segura. En este sentido una de las principales preocupaciones al monitorear los cuerpos de agua es la carga de microorganismos patógenos, los cuales además de ser causa importante de problemas de salud cuando se ingiere el agua contaminada, dificultan y encarecen el tratamiento de un cuerpo de agua para ser apta para consumo humano.

Según Ríos, Agudelo & Gutiérrez (2017), la presencia o aumento de parásitos, virus y hongos en el agua suele relacionarse con cambios en el medio ambiente y en la población (urbanizaciones sin control, industrias, pobreza y disposición inadecuada de excretas humanas y animales). Cabe destacar que las principales actividades contaminantes incluyen las agropecuarias, tales como movilización de animales, cultivos y disposición de aguas residuales que afectan la calidad del agua.

Ríos et. Al (2017) además plantean la importancia de garantías microbiológicas en el agua, dado que esta tiene potencial de infectar simultáneamente a gran proporción de la población. Para esto se plantea la vigilancia y control del agua con el fin de establecer medidas de intervención y conservación del recurso hídrico y por tanto, evitar la propagación de contaminantes y enfermedades transmitidas por el agua a la población.

Torres (2009) por su parte plantea que con el fin de hacer comparables resultados de estudios relacionados con la supervivencia de bacterias en los ríos, se define una tasa de decaimiento bacteriano, que se representa por medio de una cinética de primer orden, es decir un decaimiento exponencial del número de bacterias con el tiempo, según lo describe la ley de Chick, expresada en la Ec. 24 y en su expresión más conocida en la Ec. 25.

$$\frac{dN(t)}{dt} = -K_b * N(t) \quad (\text{Ec. 24})$$

$$\ln\left(\frac{N}{N_0}\right) = -K_b * t \quad (\text{Ec. 25})$$

Dónde:

- N: Número remanente de bacterias (NMP/100mL)
- N_0 : Número inicial de bacterias (NMP/100mL)
- K_b : Tasa de decaimiento bacteriano (d^{-1})
- t: Tiempo transcurrido (d)

En el caso de los patógenos, para considerar los efectos de la temperatura en la determinación de la tasa de decaimiento, se relaciona la temperatura de la corriente a través de la ecuación de Arrhenius (Ec. 26), que considera la temperatura estándar de 20 °C. Los rangos de aplicación en dependencia de la temperatura son iguales a los planteados en el acápite 7.8.1. Según Chapra (2008), el θ recomendado para este tipo de procesos es 1.07 (Ec. 27).

$$K_{(T)} = K_{(20^{\circ}\text{C})} * \theta^{(T-20)} \quad (\text{Ec. 26})$$

$$K_{b(T)} = K_{b(20^{\circ}\text{C})} * 1.07^{(T-20)} \quad (\text{Ec. 27})$$

Dónde:

- $K_{b(T)}$: Velocidad de la reacción K_b a una temperatura T (d^{-1})
- $K_{b(20^{\circ}\text{C})}$: Velocidad de la reacción K_b a 20°C (d^{-1})
- θ : Constante que depende del tipo de proceso (1.07)

Según diversos investigadores (Fair, Geyer & Okun; Yáñez & H. Salas, entre otros), la tasa de decaimiento bacteriano K_b , identificada para corrientes a una temperatura de referencia de 20°C, se aproxima a:

$$K_{b(20^{\circ}\text{C})} \approx 1.0 \text{ d}^{-1} \text{ (máximo de hasta } 5.5 \text{ d}^{-1} \text{ en agua dulce)}$$

$$K_{b(20^{\circ}\text{C})} \approx 1.4 \text{ d}^{-1} \text{ (máximo de hasta } 84 \text{ d}^{-1} \text{ en agua salada)}$$

Torres (2009), además plantea que esta tasa de decaimiento varía de acuerdo a la naturaleza y estado fisiológico de las bacterias, por lo que estas tasas deben determinarse a partir de ensayos directos en las corrientes de estudio. Reporta además que la comparación directa de tasas de decaimiento de diferentes estudios debe tratarse con mucha precaución, debido a la variación de las tasas reportadas en la literatura, señalando a los factores ambientales como la principal causa de esta variación.

Basado en la literatura, Torres (2009) plantea como principales factores del decaimiento bacteriano en corrientes naturales, los siguientes:

1. *Características físico-químicas de la corriente:* pH, porosidad, contenido de materia orgánica, textura, tamaño y distribución del tamaño de partículas, composición, salinidad, efectos osmóticos, toxicidad química y potencial de óxido reducción.
2. *Condiciones ambientales:* temperatura, radiación solar e inactivación de patógenos, humedad y precipitación.
3. *Interacciones bioquímicas y biológicas entre organismos:* depredación de patógenos, supervivencia en sedimentos, disponibilidad de nutrientes y presencia de sustancias orgánicas.
4. *Factores físicos:* régimen de flujo e hidráulica de la corriente, propiedades de adsorción y adherencia, y procesos de difusión.

VIII. MARCO METODOLÓGICO

8.1. Tipo de estudio

Debido a las características de la autodepuración, el presente estudio es de tipo no experimental longitudinal descriptivo (Sampieri, Fernández & Baptista, 2010), considerando que no se ha realizado manipulación intencional de las variables descritas, sino que simplemente se han observado para su posterior análisis, en base al comportamiento de este fenómeno en su forma natural, además cuando el mismo ya ha sucedido y no puede ser modificado.

Por otra parte, para la investigación se ha considerado el uso de variables continuas que permiten valores representativos, garantizados con el uso de técnicas de recolección adecuadas. Además, dado que no se ha analizado una relación causal entre valores obtenidos para las variables medidas en la autodepuración, sino más bien una descripción de la evolución de estos, no ha sido necesario el uso de parámetros estadísticos en esta etapa.

Cabe destacar que el procedimiento de selección de puntos de muestreo utilizado, se ha considerado debido a que el fenómeno en estudio es un proceso hasta cierto punto previsible y con características bastante específicas. Por tanto, además el muestreo es no probabilístico, debido a que no todos los puntos del río han contado con la misma posibilidad de ser seleccionados, ya que se requieren condiciones específicas para cada punto de muestreo.

8.2 Fuentes de recopilación de información

1. *Fuentes primarias:* Proveniente de datos de campo levantados durante los meses de marzo, abril y mayo del 2014.
2. *Fuentes secundarias:* La información teórica complementaria se obtuvo a través de bibliotecas virtuales y de textos impresos relacionados con modelos de calidad del agua.

8.3. Área de estudio

8.3.1. Información general del municipio de Boaco

El municipio de Boaco es la cabecera municipal del departamento homónimo, ubicado a 93 km de la capital Managua, a la que se une a través de una carretera pavimentada en buen estado. De acuerdo al INIFOM (s.f.), los límites específicos del municipio son: al norte con Esquipulas (Matagalpa), Muy Muy (Matagalpa) y Matiguás (Matagalpa); al sur con Camoapa (Boaco) y San Lorenzo (Boaco); al suroeste con Teustepe (Boaco) y al oeste con Santa Lucía (Boaco) y San José de los Remates (Boaco). La localización del municipio y la ciudad de Boaco puede apreciarse en la Figura 8.

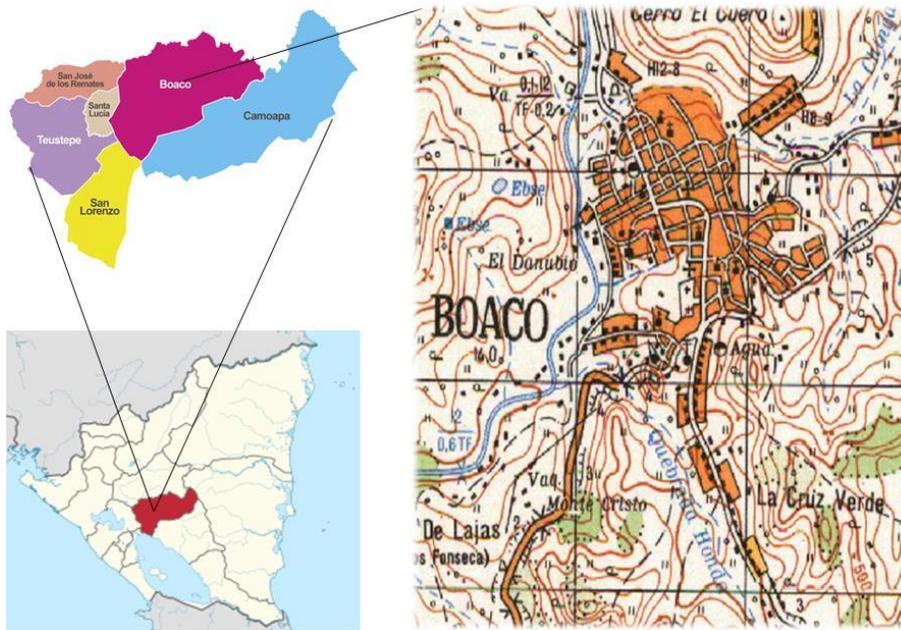


Figura 8. Localización del municipio y la ciudad de Boaco

Según (INFOM, s.f.), el municipio posee una superficie de 1,086.81 km², los que incluyen a la ciudad de Boaco y 48 comarcas, con topografía irregular y un paisaje montañoso con elevaciones promedio entre 200 y 300 msnm, siendo la elevación pico la del Cerro La Vieja con 1,020 msnm. Además cuenta con un clima variado, que va desde trópico húmedo de sabana hasta bosque tropical de selva, con temperaturas entre 27-30 °C (en verano) y alrededor de 18 °C en diciembre. Además, los volúmenes de precipitación pluvial oscilan entre 1,200 y 2,000 mm/año

8.3.2. Situación ambiental del municipio de Boaco

De acuerdo al Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza [CATIE] (2008), el municipio de Boaco presenta graves dificultades ambientales, sobre todo en agua y saneamiento. Aproximadamente el 56% de la población es abastecida por una planta potabilizadora (con captación de los ríos Fonseca y Luna), mientras que el resto de los pobladores se abastecen por fuentes superficiales o subterráneas sin tratamiento, siendo la calidad y cantidad del recurso afectada por factores como la sequía.

Según el CATIE (2008), la problemática ambiental de prioridad en el municipio incluye:

- Contaminación del Río Fonseca por aguas negras y queseras.
- Fecalismo al aire libre.
- Falta de relleno sanitario para manejo de la basura.
- Deforestación de la microcuenca del Río Fonseca y escasez de agua.
- Falta de educación ambiental sobre manejo inadecuado de los desechos.
- Poca participación e interés de la población, en la protección del medio ambiente.

En cuanto a aguas residuales, la ciudad de Boaco no tiene cobertura total de alcantarillado sanitario, especialmente las poblaciones colindantes con el Río Fonseca, tal es el caso de barrios como La Bombilla y Paso de Lajas. Por esta razón un 66% de las aguas residuales domésticas de la ciudad se riega en los patios y otro 16% termina en los cuerpos receptores sin tratamiento alguno. Además hasta un 62% de las aguas residuales derivadas de procesos, en especial de queseras, se disponen sin ningún tipo de tratamiento (CATIE, 2008).

Aguas arriba de la PTAR se puede evidenciar, además de la descarga directa de aguas residuales al río, presencia de ganadería, lavado de vehículos y ropa, extracción de arena y pastoreo. Aguas abajo, se observa además: desechos sólidos, deforestación, sedimentos por erosión del suelo, aguas con detergente, turbiedad alta e inclusive presencia de metano, lo que genera olores desagradables, (Báez & Martínez, 2015).

8.3.3. Tramo muestreado

El presente estudio se ha desarrollado en el Río Fonseca, específicamente en el área que recorre el río a la salida de la ciudad de Boaco (ver Figura 9). El tramo de estudio abarca 7.682 km longitudinalmente en el curso del río, iniciando en la estación R1 en la comunidad La Bombilla y culminando en la estación R5 en la comunidad El Cascabel.



Figura 9. Microlocalización tramo de estudio Río Fonseca

Nota. Fuente: Elaboración propia (base: mapa geodésico INETER 3053-II).

Los suelos que predominan en la zona son arenos arcillosos y se emplean principalmente para ganadería y pastoreo. El terreno descende en altura desde 315 msnm en la estación R1 (La Bombilla) hasta 212 msnm en la estación R5 (El Cascabel), además debido a lo accidentado de la zona, en algunos sitios se obstaculiza el acceso directo hasta el río. Por otra parte, el lecho del río presenta piedras de tamaños variables, además de profundidades irregulares (entre 5 y 55 cm) a lo largo de los puntos muestreados.

Para seleccionar los puntos de muestreo, se realizó una visita de reconocimiento para identificar el sitio de descarga libre de aguas residuales de la ciudad al río y las condiciones de acceso, resultando la ubicación de la primer estación (R1) en La Bombilla, misma que además se encuentra aguas debajo de la descarga del efluente de la PTAR de Boaco. Considerando las diferencias visibles de calidad de agua así como la facilidad de acceso al río, se ubicaron las siguientes estaciones: R2 (Paso de Lajas 2, R4 (El Quebracho) y R5 (El Cascabel).

Para obtener datos significativos, se decidió realizar tres muestreos de las variables de estudio en las estaciones seleccionadas. Sin embargo, al observar después del segundo muestreo cambios significativos marcados en cuanto a DBO_5 entre El Quebracho y El Cascabel, se decidió buscar un punto intermedio, a pesar de contar con un acceso más difícil, seleccionando de esta forma el sitio ubicado en el sector de la Quinta Erlinda (R3). Las ubicaciones y datos de las estaciones muestreadas pueden apreciarse en la Figura 10 y Tabla 7 a continuación.

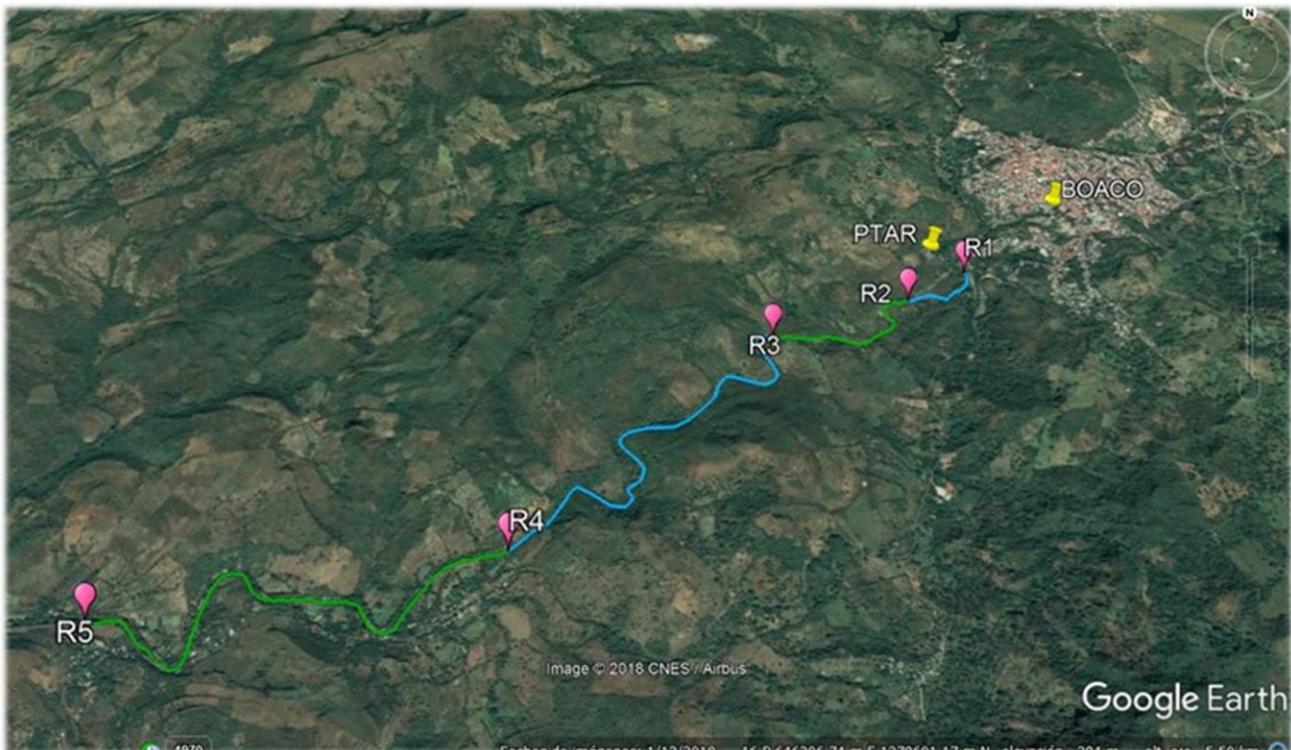


Figura 10. Esquema de ubicación de estaciones de muestreo en el Río Fonseca

Nota. Fuente: Elaboración propia, base Google Earth.

Tabla 7. Datos de estaciones de muestreo sobre el Río Fonseca

COD	Punto de muestreo	Abscisa (km)	Coord. UTM (16P)		Altura (msnm)
			E	N	
R1	La Bombilla	0 + 000	645005	1378335	315
R2	Paso de Lajas No.2	0 + 555	644626	1378105	307
R3	Quinta Erlinda	1 + 701	643777	1377817	296
R4	El Quebracho	4 + 649	642298	1376394	241
R5	El Cascabel	7 + 682	640182	1375987	212

Nota. Fuente: Elaboración propia.

8.3.4. Principales fuentes de contaminación identificadas

En el área de estudio se constató primordialmente contaminación orgánica por aguas residuales que se vierten sin ningún tipo de tratamiento al Río Fonseca. Estas aguas residuales provienen en primera instancia de varios puntos de la ciudad y se transportan a través de cauces de concreto y naturales que conectan con el cauce del río, observándose escenas de contaminación como la presentada en la Figura 11, donde se identificó además presencia de detergentes en el agua y abundante basura en la corriente.



Figura 11. Aguas residuales en cauce de la comunidad La Bombilla

Nota. Fuente: Elaboración propia.

Por otro lado se observaron fuentes puntuales y difusas de contaminación en el tramo estudiado. De forma puntual se constató el vertido de aguas residuales domesticas sin tratamiento alguno y desechos sólidos suspendibles, que provienen directamente de las comunidades a orillas del río, principalmente en el sector de La Bombilla y Paso de Lajas No. 2. Además en sitios como El Quebracho y El Cascabel, donde el agua es más clara a simple vista, se presenciaron actividades como lavado de vehículos y ropa, las que depositan contaminantes y detergentes en la corriente.

En cuanto a la contaminación de forma difusa, se observó una clara deforestación en la ribera del río, lo que ocasiona una mayor erosión del suelo que ya ha perdido su barrera natural. Esto conlleva al depósito de sedimentos en el cauce del río y por ende una alta turbiedad en la corriente, además de depósito de contaminantes presentes en el suelo, especialmente coliformes provenientes de la actividad del ganado de la zona.

Cabe destacar también los efectos dañinos de la contaminación al ecosistema y paisaje del sitio, especialmente en La Bombilla y Paso de Lajas No. 2, donde se constató la presencia de olores desagradables propios de una zona de descomposición activa, con bajos niveles de OD y descomposición anaerobia, donde se desprenden gases como el metano, hidrógeno, nitrógeno, ácido sulfhídrico y otros que producen estos olores, situación que se pronuncia debido a las temperaturas que llegan a alcanzar los 37 °C y se perciben en las comunidades aledañas.

8.4. Metodología de evaluación del proceso de autodepuración en el Río Fonseca

Se entiende que en los procesos de evaluación, para emitir un juicio de valor sobre la situación actual se debe contrastar la información recolectada con objetivos previamente establecidos. En el caso de la contaminación de fuentes superficiales, estos procesos de evaluación permiten obtener evidencias de las condiciones de los cuerpos de agua, para conocer si estos cumplen o no con los requerimientos establecidos para los posibles usos de sus aguas.

Dado que los ríos son vulnerables a la contaminación y además se emplean como fuente de abastecimiento para comunidades ubicadas a lo largo de su trayectoria, la evaluación de estos debe ser una actividad permanente, actualizando constantemente evidencia de su contaminación y considerando las normativas vigentes. De esta forma, las evaluaciones generadas sirven como fuente de información veraz y oportuna para la toma de decisiones a nivel institucional, en aras de salvaguardar el recurso, optimizar gastos de tratamiento del agua y proteger la salud pública.

En el presente estudio se ha evaluado específicamente la capacidad de autodepuración del Río Fonseca en el tramo estudiado de 7.682 km. Para el juicio de valor se ha tenido en cuenta la definición de la autodepuración, considerando que el agua debería retornar a su calidad previa a los episodios de contaminación.

En este caso, aguas arriba de los muestreos el Río Fonseca funciona como fuente de abastecimiento para la ciudad de Boaco, por lo que para considerar que el proceso de autodepuración ha sido exitoso, la calidad del agua muestreada debería cumplir con los requerimientos de la NTON 05 007-98 para la Categoría 1, que incluye “aguas destinadas al uso doméstico y al uso industrial que requiera de agua potable, siempre que esta forme parte de un producto o sub-producto destinado al consumo humano o que entre en contacto con él”.

Cabe mencionar que en ríos que cuentan con registros de datos de calidad de agua, un modelo de calidad generado en un software como el QUAL2K, debidamente calibrado y validado, es ideal como herramienta de evaluación y predicción de la calidad del agua ante determinados episodios de contaminación. Debido a la falta de registros en el caso del Río Fonseca, la evaluación de la autodepuración no se ha ligado a la modelación con QUAL2K, sino basándose únicamente en los datos de campo.

También debido esta falta de datos, no se generará un modelo QUAL2K verificado para la simulación de distintos escenarios ante contaminantes. Las simulaciones presentadas se basan únicamente en modelos calibrados para cada muestreo realizado.

8.5. Selección de variables de estudio

A pesar de que el programa QUAL2K puede calibrarse con una serie bastante amplia de parámetros de calidad del agua, no todos aportan de igual manera a la precisión de los resultados finales. Tras considerar la influencia de cada parámetro en los estudios de calidad de agua, de acuerdo a lo planteado por Torres (2009), se decidió enfocar la recolección de datos en torno a la elaboración de la curva de OD, evaluando la disminución en el proceso de la DBO y las coliformes, bajo condiciones de caudal crítico y altas temperaturas.

De esta forma, en función de los objetivos específicos propuestos en el acápite 5.2, se ha planteado el estudio longitudinal de las siguientes variables, considerando que se encuentran entre los factores más influyentes en la calidad del agua.

Variables relacionadas a factores físicos:

1. Temperatura.
2. Caudal del río (relacionado con las características hidráulicas de la corriente).

Variables relacionadas a factores químicos:

3. Demanda bioquímica de oxígeno (DBO).
4. Oxígeno disuelto (OD).
5. pH.

Variables relacionadas a factores biológicos:

6. Coliformes fecales.
7. Coliformes totales.

Para ver detalle de la operacionalización de estas variables, consultar la información del Anexo 2 “Operacionalización de variables de estudio”.

8.6. Muestreos

De acuerdo a la bibliografía consultada, se plantea que la época crítica en el proceso de autodepuración suele ser el verano, esto considerando que el aumento de las temperaturas tiende a disminuir la solubilidad del OD en la corriente y a incrementar la actividad microbiana en el agua, demandando aún más OD, a esto se suma a la disminución de los caudales en los ríos, situación propia de los periodos no lluviosos que conlleva a una menor dilución de contaminantes.

Por esta razón, se han realizado las campañas de muestreo en las estaciones seleccionadas en el período de verano, específicamente los días 30/03/14, 06/04/14 y 11/05/14, para un total 3 campañas. Se entiende sin embargo, que por la naturaleza del estudio, los resultados que puedan involucrar los datos recolectados son válidos para este periodo, considerando que en invierno se dan otras condiciones, por ejemplo escorrentías superficiales que arrastran contaminantes y un aumento de caudal que propicia una mayor dilución de dichos contaminantes, por lo que el interés en resultados para el periodo lluvioso debe relacionarse a un estudio independiente a este.

Todas las muestras se extrajeron a aproximadamente 20 cm de profundidad en el río, en sentido contrario a la corriente, de forma que se evitara el material flotante, además se almacenaron en frascos y botellas lavadas con agua destilada para evitar contaminación cruzada.

De las variables de estudio seleccionadas, es posible la determinación en campo solo de pH y temperatura, requiriéndose un trato especial para el resto de las muestras, de forma que se pudieran determinar resultados mediante análisis confiables en laboratorio. Para todos los puntos de muestreo se procuró levantar una muestra homogénea y representativa del sitio, en cantidad suficiente para realizar las pruebas requeridas.

Cabe destacar que el transporte hacia el laboratorio de análisis del PIENSA se realizó en termo refrigerado, para evitar modificaciones de ciertas propiedades por efectos del calor. Las técnicas específicas para cada análisis realizado se detallan a continuación:

8.6.1. Determinación de la DBO₅

En cuanto a la DBO, las muestras de agua se recolectaron en botellas plásticas (1 galón), lavadas con agua destilada. Las muestras se tomaron a 20 cm de profundidad y en sentido contrario a la corriente, tapándose e introduciéndose en un termo refrigerado para su transporte al laboratorio del PIENSA, donde finalmente sería realizada la determinación estándar a 20°C.

El Standard Methods para la prueba realizada es el 5210B “Biochemical Oxygen Demand” (test a 5 días). Debido a la facilidad de degradación de las muestras, se procuró realizar las pruebas en un plazo no mayor de 24 horas a partir de la recolección de las muestras en campo.

8.6.2. Determinación de oxígeno disuelto (OD)

La medida se realizó por el Método de Winkler, usando botellas Winkler (recipientes de vidrio que poseen tapones con sellos que permiten obtener una muestra hermética). Para este procedimiento, se sumergió la botella en la corriente, se retiró el tapón y se llenó la botella de agua hasta su rebose, asegurándose que no se observen burbujas dentro del frasco. A continuación se tapó la botella antes de sacarla hacia la superficie.

Dado que el valor de OD no se analizó en campo, para fijar el oxígeno de cada muestra se adicionó mediante pipetas 1 mL de sulfato de manganeso (reactivo 1) y 1 mL de solución álcali yoduro azida (reactivo 2), evitando al máximo el contacto entre la muestra y la pipeta. A continuación se agitaron las botellas para homogeneizar los reactivos, verificando la formación de un precipitado de color marrón, tanto más abundante a mayor presencia de oxígeno.

Con el tapón asegurado, se adicionó agua destilada sobre el frasco, asegurando la inexistencia de burbujas en el interior y en el exterior un charco de agua alrededor del tapón, formando un sello de agua. Para mayor hermetismo, se cubrió la parte superior de los frascos con papel aluminio, colocando los frascos en un termo refrigerado para el posterior transporte de las muestras al laboratorio del PIENSA, donde finalmente se titularon. El número del Standard Methods para la prueba realizada es el 54500-O “Oxygen (Dissolved)”.

8.6.3. Determinación de coliformes

Se recolectaron las muestras en bolsas plásticas (500 mL) esterilizadas, para esto se procuraron muestras homogéneas de agua del río, sellándolas y colocándolas en un termo refrigerado para su transporte al laboratorio del PIENSA, donde se realizó la determinación del número más probable (NMP) por medio de la técnica de tubos múltiples. De igual forma, se procuró realizar las pruebas en un plazo no mayor de 24 horas a partir de la recolección de las muestras en campo.

El número del Standard Methods para las pruebas realizada es el 9221 “Multiple-Tube Fermentation Technique for Members of the Coliform Group”, en su variación 9221B para coliformes totales y 9221E para coliformes fecales.

8.6.4. Medición de pH y temperatura

Los registros de estas dos variables del agua se realizaron con un medidor pH55, de Martini Instruments, facultado para realizar medidas de pH y temperatura con precisión de un decimal. Este es un equipo portable y apto para trabajos de campo por su resistencia al agua. Para la toma de datos se extrajo en un recipiente limpio agua del río, se introdujo el equipo y se registró el dato registrado en la pantalla una vez estabilizada.

8.6.5. Características de las estaciones muestreadas

Como ya ha sido mencionado, para los muestreos 1 y 2, se extrajeron muestras de un total de 4 estaciones, en tanto que para el muestreo 3 se incorporó otra estación (R3, Quinta Erlinda). Cada estación muestreada presenta características particulares, las cuales se plantean de forma descriptiva y gráfica en las Tablas 8, 9 y 10.

Como puede observarse en las características planteadas y su registro fotográfico, las condiciones encontradas en los muestreos no cambian para cada estación, constatando una situación de contaminación sostenida durante el periodo de muestreo.

Tabla 8. Características de los puntos del muestreo 1 en el Río Fonseca

Estación	Características	Registro fotográfico
R1 (0 + 000) La Bombilla	<ul style="list-style-type: none"> - Presencia de residuos sólidos dentro y fuera del lecho del río. - Alta turbidez. - Olor característico a aguas residuales. - Descomposición anaerobia - Lodos de fondo. - No se observan peces. 	
R2 (0 + 555) Paso de Lajas No.2	<ul style="list-style-type: none"> - Presencia de residuos sólidos dentro y fuera del lecho del río. - Alta turbidez. - Olor característico a aguas residuales. - Lecho rocoso y ribera deforestada. - Menor proporción de lodo. - No se observan peces. 	
R4 (4 + 649) El Quebracho	<ul style="list-style-type: none"> - Lecho rocoso y ribera deforestada. - Presencia de microorganismos. - Aguas más claras. - Sin apreciación de malos olores. - Uso del agua en actividades domésticas. 	
R5 (7 + 682) El Cascabel	<ul style="list-style-type: none"> - Lecho rocoso. - Presencia de microorganismos. - Apariencia de aguas claras. - Sin apreciación de malos olores. - Uso del agua en actividades domésticas. 	

Nota. Fuente: Elaboración propia.

Tabla 9. Características de los puntos del muestreo 2 en el Río Fonseca

Estación	Características	Registro fotográfico
<p>R1 (0 + 000) La Bombilla</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Presencia de residuos sólidos dentro y fuera del lecho del río. - Alta turbidez. - Olor característico a aguas residuales. - Descomposición anaerobia - Lodos de fondo. - No se observan peces. 	
<p>R2 (0 + 555) Paso de Lajas No.2</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Presencia de residuos sólidos dentro y fuera del lecho del río. - Alta turbidez. - Olor característico a aguas residuales. - Lecho rocoso y ribera deforestada. - Menor proporción de lodo. - No se observan peces. 	
<p>R4 (4 + 649) El Quebracho</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Lecho rocoso y ribera deforestada. - Presencia de microorganismos. - Aguas más claras. - Sin apreciación de malos olores. - Uso del agua en actividades domésticas. 	
<p>R5 (7 + 682) El Cascabel</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Lecho rocoso. - Presencia de microorganismos. - Apariencia de aguas claras. - Sin apreciación de malos olores. - Uso del agua en actividades domésticas. 	

Nota. Fuente: Elaboración propia.

Tabla 10. Características de los puntos del muestreo 3 en el Río Fonseca

Estación	Observación	Registro fotográfico
R1 (0 + 000) La Bombilla	<ul style="list-style-type: none"> - Presencia de residuos sólidos dentro y fuera del lecho del río. - Alta turbidez. - Olor característico a aguas residuales. - Descomposición anaerobia - Lodos de fondo. - No se observan peces. 	
R2 (0 + 555) Paso de Lajas No.2	<ul style="list-style-type: none"> - Presencia de residuos sólidos dentro y fuera del lecho del río. - Alta turbidez. - Olor característico a aguas residuales. - Lecho rocoso y ribera deforestada. - Menor proporción de lodo. - No se observan peces. 	
R3 (1 + 701) Quinta Erlinda	<ul style="list-style-type: none"> - Apreciación de malos olores. - Lecho rocoso y ribera deforestada. - Menor proporción de lodo. - No se observan peces. - Aguas más claras. 	
R4 (4 + 649) El Quebracho	<ul style="list-style-type: none"> - Lecho rocoso y ribera deforestada. - Presencia de microorganismos. - Aguas más claras. - Sin apreciación de malos olores. - Uso del agua en actividades domésticas. 	

Nota. Fuente: Elaboración propia.

Tabla 10. Características de los puntos del muestreo 3 en el Río Fonseca (continuación)

Estación	Observación	Registro fotográfico
R5 (7 + 682) El Cascabel	<ul style="list-style-type: none"> - Lecho rocoso. - Presencia de microorganismos. - Apariencia de aguas claras. - Sin apreciación de malos olores. - Uso del agua en actividades domésticas. 	

Nota. Fuente: Elaboración propia.

8.7. Aforo del caudal del río

Dado que se consultó tanto en INETER como en ENACAL y ninguna de estas instituciones cuenta con aforos o datos de caudales oficiales y contemporáneos del Río Fonseca, se decidió realizar un aforo para determinar un valor para este parámetro. El sitio de aforo se ubicó en base a la accesibilidad del sitio y sus condiciones hidráulicas, además de la seguridad del personal, por lo que se optó por la estación R5, situada en El Cascabel.

El aforo en cuestión se realizó el día del muestreo 3 (11 de mayo de 2014). Debido a los instrumentos con los que se contaba, se decidió medir el caudal con el método de área-velocidad, verificando la velocidad mediante el método de flotadores. Este método es sencillo y rápido para estimar el caudal que pasa en una sección transversal del río, para este fin se determinan las velocidades superficiales de la corriente utilizando materiales sencillos (flotadores) que se puedan visualizar y cuya recuperación no sea necesaria (SENAMHI, 2011).

Según el SENAMHI (2011) el método de flotadores se fundamenta en que los objetos se mueven a la misma velocidad que el agua en la cual flotan, por consiguiente medir la velocidad del objeto flotante es medir la de la línea de flujo en la cual se mueven. Como flotador se pueden usar trozos de ramas, pequeños troncos, botellas, latas, etc. Para la aplicación del método se siguió el siguiente procedimiento:

1. *Preparación de materiales:* libreta de control de datos, cronómetro, cinta métrica, flotadores (trozos de madera) y varilla para medir profundidades.
2. *Selección de tramo recto:* Se definió un tramo recto delimitado por los puntos A y B, donde el agua fluía naturalmente, sin presencia de grandes piedras o troncos que impidieran las mediciones. La distancia entre los puntos A y B se estableció en 6.60 m, identificándose secciones transversales con anchos diferentes en dichos puntos.
3. *Estimación del tiempo promedio:* Medición del tiempo que demoran los flotadores en llegar del punto A al B, en diferentes márgenes del río. Para el tiempo promedio, se suman los tiempos de cada flotador y se divide entre el número de flotadores (repeticiones). En este caso se realizaron 5 repeticiones para obtener un promedio.
4. *Cálculo de la velocidad media:* Para obtener la velocidad media se empleó el tiempo promedio a través de la relación:

$$V_m = d/t_m \quad (\text{Ec. 28})$$

Dónde:

V_m : velocidad media del flujo (m/s)

d : distancia recorrida por el flotador desde el punto A hasta B (m)

t_m : tiempo promedio que recorren los flotadores desde A hasta B (s)

Cabe destacar que la velocidad medida es una velocidad superficial. Para obtener la velocidad corregida del flujo (velocidad media en la vertical), es necesario multiplicar el valor registrado por un coeficiente que existe entre la velocidad media de la sección y la superficial, para diferentes tipos de cauce.

Según el SENAMHI (2011), los hidrólogos recomiendan una factor de corrección para la velocidad media que varía entre 0.70 y 0.90 veces la velocidad en la superficie, según se trate de cauce naturales pequeños o grandes, recomendando en este caso multiplicar la velocidad superficial obtenida por un factor de 0.85.

5. *Estimación del área de la sección:* Considerando la forma irregular del cauce del río, se levantaron datos de las secciones de los puntos A y B para obtener una sección promedio del cauce. Se establecieron lineamientos en ambas secciones, realizando mediciones de ancho total y las profundidades a separaciones equidistantes (cada 15 cm) para obtener una sección aproximada a la real (ver Figura 12).



Figura 12. Levantamiento de sección en el Río Fonseca

Nota. Fuente: Elaboración propia.

Para el cálculo del área total en cada lineamiento se estimó el área de cada subsección de 15 cm de ancho (Ec. 29), sumando las subsecciones del lineamiento para el área total. Para obtener el área promedio en el cauce se empleó la Ec. 30.

$$A_{sub} = \left(\frac{h_1 + h_2}{2} \right) * B_{sub} \quad (\text{Ec. 29})$$

$$A_m = \frac{A_{puntoA} + A_{puntoB}}{2} \quad (\text{Ec. 30})$$

Dónde:

A_{sub} :	área de cada subsección del lineamiento (m ²)
h_1 :	profundidad 1 de la subsección (m)
h_2 :	profundidad 2 de la subsección (m)
B_{sub} :	ancho de la subsección (m)
A_m :	área total promedio del cauce (m ²)

$A_{\text{punto A}}$: área total estimada en el punto A (m^2)

$A_{\text{punto B}}$: área total estimada en el punto B (m^2)

6. *Cálculo del caudal promedio*: Finalmente, la estimación del caudal se realizó tomando en cuenta el valor promedio, tanto de área como de velocidad, a través de la ecuación de continuidad de flujo (Ec. 31):

$$Q = A_m * V_m \quad (\text{Ec. 31})$$

Dónde:

Q: caudal (m^3/s)

A_m : área transversal promedio (m^2)

V_m : velocidad media del flujo (m/s)

Para un mayor respaldo de los datos obtenidos mediante flotadores y con la disponibilidad de un molinete provisto por el PIENSA, se decidió realizar un nuevo aforo en el sitio en periodo lluvioso (junio 2017), de forma que se pudieran asociar los factores geométricos e hidráulicos del río en ambas ocasiones. Esto se realizó mediante la fórmula de Manning y sus despejes (Ec. 32-35), considerando que si los factores geométricos de la estación se mantienen constantes, los factores hidráulicos de ambos aforos pueden ser relacionados.

Para el coeficiente n se usó el valor recomendado por Ven Te Chow (0.05 en corrientes con ancho < a 100 pies, corrientes montañosas sin vegetación, fondo cantos rodados con rocas grandes). Los datos de esta comparación pueden observarse en el Anexo 3 de este documento.

$$Q = \frac{1}{n} * A * Rh^{2/3} * S^{1/2} \quad (\text{Ec. 32})$$

$$V = \frac{1}{n} * Rh^{2/3} * S^{1/2} \quad (\text{Ec. 33})$$

$$S = \left(\frac{V * n}{Rh^{2/3}} \right)^2 \quad (\text{Ec. 34})$$

$$Rh = A / Pm \quad (\text{Ec. 35})$$

Dónde:

Q:	caudal (m ³ /s)
n:	coeficiente de rugosidad
A:	área transversal (m ²)
S:	pendiente (m/m)
V:	velocidad del flujo (m/s)
Rh:	radio hidráulico
Pm:	perímetro mojado (m)

8.8. Análisis de decaimiento bacteriano

Dado a los costos de los estudios para coliformes y la tendencia mostrada en los resultados obtenidos en los muestreos 1 y 2, se decidió no realizar un tercer muestreo para este parámetro, analizando la tasa de decaimiento bacteriano en base a estos datos.

Para la estimación de la tasa de decaimiento bacteriano K_b , se empleó la Ley de Chick planteada en el acápite 7.10. Considerando además que en la ribera del tramo estudiado hay contaminación directa e indirecta recurrente, causada por factores como el fecalismo al aire libre y la descarga sin un tratamiento adecuado de las aguas residuales en diversos puntos, se propone un análisis basado en la situación actual y los parámetros establecidos en la NTON 05 007-98.

8.9. Modelación usando la ecuación de Streeter-Phelps

Previo a la implementación del modelo QUAL2K, se realizó la modelación de la calidad del agua empleando las ecuaciones del modelo Streeter-Phelps descritas en el acápite 7.8 de este documento. El fundamento para esta modelación es estimar los parámetros K_d y K_r para estimar datos de entrada para el modelo QUAL2K.

Considerando las variaciones que pueden presentar los resultados al alterar algunos parámetros del modelo, se decidió realizar un análisis de sensibilidad específico para la velocidad media de la corriente, la cual puede ser afectada por factores como: condiciones hidráulicas del cauce, grandes avenidas, modificación del área efectiva del cauce por bancos de sedimentos, etc.; influyendo significativamente en las variables K_d y K_r , que son fundamentales en el proceso de autodepuración, por lo que se ha decidido evaluar al menos un valor cercano a la velocidad encontrada en el aforo para determinar los márgenes de confiabilidad del modelo.

Teniendo en cuenta que los escenarios con más desventajas suceden a menor velocidad, dado que disminuye la eficiencia del proceso de autodepuración, se ha decidido el análisis de al menos un valor menor al dato obtenido del aforo realizado.

8.10. Implementación del modelo QUAL2K

Para aplicar el modelo de forma confiable, este debe ser capaz de reproducir de forma aceptable las condiciones de calidad muestreadas. En el caso del Río Fonseca, para la modelación de los parámetros DBO y OD, se ha empleado el software QUAL2K en su versión 2.11. Para la implementación del modelo se ha considerado lo siguiente:

1. Longitud de estudio de 7.682 km, discretizados en tramos descritos en las Tabla 11 y 12 a continuación:

Tabla 11. Discretización de tramos estudiados en el Río Fonseca (muestreos 1 y 2)

COD	Tramo	Long. tramo (km)
R1-R2	La Bombilla – Paso de Lajas No.2	0.555
R2-R4	Paso de Lajas No.2 – El Quebracho	4.094
R4-R5	El Quebracho - El Cascabel	3.033

Nota. Fuente: Elaboración propia.

Tabla 12. Discretización de tramos estudiados en el Río Fonseca (muestreo 3)

COD	Tramo	Long. tramo (km)
R1-R2	La Bombilla – Paso de Lajas No.2	0.555
R2-R3	Paso de Lajas No.2 – Quinta Erlinda	1.146
R3-R4	Quinta Erlinda – El Quebracho	2.948
R4-R5	El Quebracho - El Cascabel	3.033

Nota. Fuente: Elaboración propia.

- Se seleccionó como método de solución de integración el de Euler y como método de solución de pH el de Newton-Raphson, recomendados en los manuales de usuario del software.
- En cuanto a las características hidráulicas, a partir del dato de caudal introducido el software calcula el tirante y la velocidad tomando en consideración las curvas de gasto o “rating curves”, que relacionan directamente caudal versus tirante y que de acuerdo a Chapra & Pelletier (2003) derivan en las ecuaciones 36 y 37, para las cuales estos autores presentan valores típicos de α y β . A través de estos datos, el software es además capaz de calcular los valores de área y ancho de la sección de la corriente a través de las ecuaciones 38 y 39.

$$U = a * Q^b \quad (\text{Ec. 36})$$

$$H = \alpha * Q^\beta \quad (\text{Ec. 37})$$

$$A_c = Q/U \quad (\text{Ec. 38})$$

$$B = A_c/H \quad (\text{Ec. 39})$$

Dónde:

- U: velocidad (m/s)
- H: profundidad (m)
- Q: caudal (m³/s)
- a: coeficiente para velocidad (valor despejado)
- b: exponente para velocidad (valor típico 0.43)

- α : coeficiente para profundidad (valor despejado)
 β : exponente para profundidad (valor típico 0.45)

4. De acuerdo a las características verificadas en campo del Río Fonseca y siguiendo las recomendaciones para diseños, establecidas en Hidráulica de Canales (Ven Te Chow), se seleccionó un valor de coeficiente de Manning de 0.05. Rango de referencia 0.04-0.07 (valor normal de 0.05) para corrientes montañosas si vegetación en el canal con fondo de cantos rodados y rocas grandes.
5. El modelo requiere el ingreso de datos meteorológicos, sin embargo en INETER no se encuentran disponibles datos para la zona. Por esta situación se decidió emplear valores conocidos como “dummy values” (China-UK WRDMAP, 2010), los cuales funcionan como una estimación de los valores faltantes mientras se pueden introducir valores reales al modelo, en este caso valores para temperatura del aire (air temperature), punto de rocío (dew point temperature), velocidad del viento (wind speed) y cloud cover (nubosidad).
6. Los “dummy values” aplicados en este estudio están basados en información obtenida para Boaco, en el sitio es.weatherspark.com, el cual presenta estimaciones de promedios de estos valores para todas las horas del día y días del año, dichas estimaciones están basadas en el modelo MERRA-2 de la NASA.
7. En el caso de los muestreos 1 y 2, dado que existen datos de temperatura del agua, se procuró ajustar asociar estos datos con los obtenidos en weatherspark.com, aplicando este factor a los “dummy values”. Para cada tramo, el valor introducido es el promedio de sus estaciones muestreadas. Estos valores ajustados se presentan en la Tabla 13.

Tabla 13. Dummy values meteorológicos estimados (muestreos 1 y 2)

	Taire (°C)	Vel. viento (m/s)	Nubosidad (%)	Punto de rocío (%)
30/03/2014				
R1-R2	27.3	6.3	59	17.0
R2-R4	29.2	6.4	61	17.5
R4-R5	31.9	6.5	62	18.0
06/04/2014				
R1-R2	28.5	6.5	55	17.5
R2-R4	30.0	6.5	56	18.0
R4-R5	31.5	6.5	57	18.5

Nota. Fuente: Elaboración propia a partir de datos promedios de es.weatherspark.com

8. En el caso del muestreo 3, dado que no existen valores registrados para temperatura del agua, para modelar los tramos de interés se aplicaron los “dummy values” directamente del promedio de los valores obtenidos de la página es.weatherspark.com para las estaciones muestreadas en el tramo. Estos valores se presentan en la Tabla 14.

Tabla 14. Dummy values meteorológicos estimados (muestreo 3)

	Tagua (°C)	Taire (°C)	Vel. viento (m/s)	Nubosidad (%)	Punto de rocío (°C)
06/04/2014					
R1-R2	29.0	28.4	5.3	26	18
R2-R3	29.0	29.1	5.4	27	18
R3-R4	29.0	30.1	5.5	28	18
R4-R5	29.0	30.9	5.6	28	18

Nota. Fuente: Elaboración propia a partir de datos promedios de es.weatherspark.com

9. Cabe destacar que el uso de estos valores disminuye la certeza en el modelo obtenido, sin embargo debido a las circunstancias constituye un buen punto de partida para generar el modelo de calidad de agua.
10. Los valores de la hoja “shade” (sombra) están propuestos tomando en consideración la inspección visual de cada muestreo.

11. Para la modelación se consideraron las variables recolectadas in situ: DBO, coliformes, OD, pH, temperatura y caudal. Además, dado que el modelo simula DBOCu, la DBOC₅ se llevó a DBOCu (ver acápite 7.8.2) considerando que al cabo de 5 días se ha completado en promedio un 65% de la reacción.
12. Dado que son pocos tramos, ajustaron las variables $K_d(20^\circ\text{C})$ y $K_r(20^\circ\text{C})$ mediante prueba y error, en base a los datos registrados en los muestreos, procurando una concordancia razonable entre los resultados del modelo QUAL2K y los resultados obtenidos en campo.
13. Dado que se pretende sobre todo visualizar el comportamiento del programa para predecir una condición particular de calidad de agua en la corriente, y considerando además la reducción de certeza causada por las constantes meteorológicas, se calibraran modelos independientes para los 3 muestreos realizados, obviando el procedimiento de validación.

8.11. Limitaciones del estudio

Las variables de calidad de agua a muestrear se han seleccionado considerando las limitaciones de recursos destinados para este estudio, enfocándose en los parámetros más influyentes, planteados en el acápite 8.5 de este documento. Por esto, el juicio emitido en esta investigación aplica para los parámetros medidos en el tramo de estudio descrito, siendo necesario para emitir una evaluación más inclusiva, la aplicación de campañas extendidas de muestreos, que incluyan todos los parámetros regulados en la NTON 05 007-98 para la Categoría 1.

En el caso del aforo de la corriente, debido al equipo con el que se contaba no fue posible el levantamiento de todas las secciones de las estaciones muestreadas. Considerando las características de la corriente y las condiciones de seguridad para el personal involucrado, se realizó un único aforo en la estación R5 (El Cascabel). Debido a esto se han idealizado las características del cauce y la velocidad de la corriente para todo el tramo de estudio, siendo que en condiciones reales el área de la corriente cambia a lo largo de su trayectoria y por ende la velocidad no se mantiene constante.

Finalmente, en cuanto a la aplicación del modelo QUAL2K, se han encontrado serias limitaciones para la obtención de un modelo calibrado y verificado confiable, destacándose los siguientes:

- El manual de usuario del software no constituye un paso a paso del proceso de alimentación y generación del modelo, encontrando poca bibliografía disponible en este aspecto.
- La simulación emitida por el software tiene gran dependencia de los parámetros meteorológicos, que en este caso no se han recolectado en campo ni están disponibles en INETER, por lo que se han empleado “dummy values” ya descritos. Esto disminuye la confiabilidad del modelo generado.
- La simulación del decaimiento de los patógenos en la corriente se ha omitido dado que el software considera de forma fundamental los factores de temperatura, luz y sedimentación de patógeno, estos últimos no han sido factores investigados en el estudio, por lo que se ha omitido esta simulación.

Cabe destacar que a pesar de las limitaciones mencionadas, ha sido posible generar un modelo QUAL2K calibrado, capaz de reproducir las condiciones de contaminación y recuperación de la corriente, constatado con los datos de campo.

IX. ANÁLISIS DE RESULTADOS

9.1. Condiciones hidráulicas

En la Tabla 15 y Figura 13 se expone el perfil de elevación del cauce estudiado sobre el río Fonseca. En el sitio de estudio se observaron lechos con rocas y cantos rodados de diversos tamaños en el cauce del río. En términos de altura, desde la estación R1 hasta la estación R5 el río baja constantemente en altitud, descendiendo en total 103 m a lo largo del tramo de estudio, presentando una pendiente media de 1.3%.

Tabla 15. Elevaciones sobre cauce muestreado en el Río Fonseca

COD	Altura (msnm)	Tramo		Long. tramo (km)	Desnivel tramo (m)	Pend. (m/m)
		(km)	(m)			
R1	315	0.000	0	0.000	0.00	---
R2	307	0.555	555	0.555	8.00	0.0144
R3	296	1.146	1,146	1.701	11.00	0.0096
R4	241	2.948	2,948	4.649	55.00	0.0187
R5	212	3.033	3,033	7.682	29.00	0.0096

Nota. Fuente: Elaboración propia.

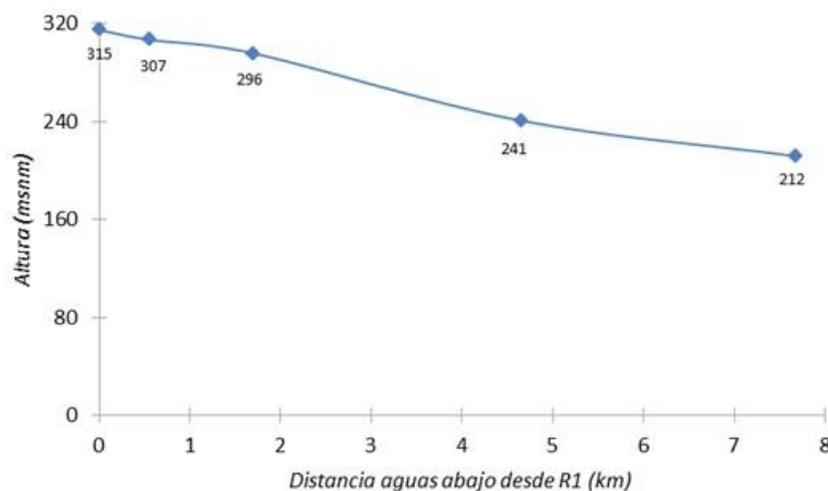


Figura 13. Perfil de elevación sobre cauce muestreado en el Río Fonseca

Nota. Fuente: Elaboración propia.

Debido a la falta de datos de la zona en cuanto a caudal, se realizó un aforo en el sector de El Cascabel. Los datos obtenidos pueden observarse en las Tablas 16 y 17, además de una descripción gráfica en las Figuras 14 y 15. En el caso de las velocidades, se obtuvo un promedio de 0.25 m/s mediante el método de flotadores, la cual está por encima de velocidades normales de sedimentación, lo que facilita que no se establezcan bancos de lodos en el lecho del río. Cabe mencionar que esta velocidad ya se ha corregido para considerar el movimiento dentro de la corriente y no en su superficie.

En cuanto a las secciones, pueden observarse alturas poco profundas, en promedio unos 21 cm, lo que colabora con una reareación más eficiente de la masa de agua. Una vez obtenidas el área y velocidad promedio, fue posible establecer el caudal que se empleará para la simulación de calidad de agua (Tabla 18).

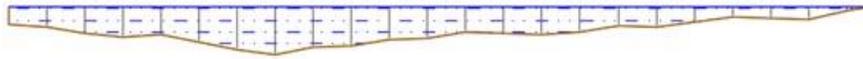


Figura 14. Vista de sección 1 (Aforo 1)

Nota. Fuente: Elaboración propia.

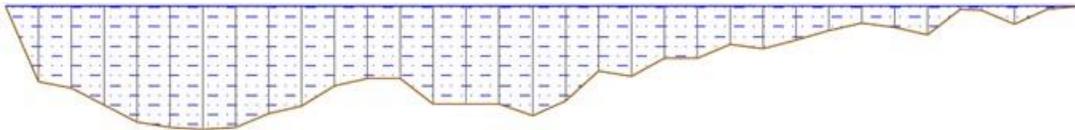


Figura 15. Vista de sección 2 (Aforo 2)

Nota. Fuente: Elaboración propia.

Tabla 16. Velocidad del flujo

No.	Trec. (s)	Dist. entre secciones (m)	Vflotador (m/s)	Vcorregida (m/s)
1	22.2	6.60	0.30	0.250
2	22.6	6.60	0.29	0.250
3	23.2	6.60	0.28	0.240
4	21.5	6.60	0.31	0.260
5	23.5	6.60	0.28	0.240
			V_m (m/s) =	0.250

Nota. Fuente: Elaboración propia.

Tabla 17. Datos de secciones 1 y 2 (sector El Cascabel)

SECCIÓN 1 RÍO (Ancho 3.40 m)				SECCIÓN 2 RÍO (Ancho 4.90 m)			
Alineamiento (m)	Profundidad		Área (m ²)	Alineamiento (m)	Profundidad		Área (m ²)
	(cm)	(m)			(cm)	(m)	
0.00	7.0	0.070	-	0.00	0.0	0.000	-
0.15	8.0	0.080	0.011	0.15	34.0	0.340	0.026
0.30	10.2	0.102	0.014	0.30	37.0	0.370	0.053
0.45	11.6	0.116	0.016	0.45	45.0	0.450	0.062
0.60	10.5	0.105	0.017	0.60	52.5	0.525	0.073
0.75	13.8	0.138	0.018	0.75	55.0	0.550	0.081
0.90	16.5	0.165	0.023	0.90	56.0	0.560	0.083
1.05	18.4	0.184	0.026	1.05	55.0	0.550	0.083
1.20	15.3	0.153	0.025	1.20	48.5	0.485	0.078
1.35	15.1	0.151	0.023	1.35	45.5	0.455	0.071
1.50	12.5	0.125	0.021	1.50	36.0	0.360	0.061
1.65	12.3	0.123	0.019	1.65	32.5	0.325	0.051
1.80	9.6	0.096	0.016	1.80	32.5	0.325	0.049
1.95	10.0	0.100	0.015	1.95	44.5	0.445	0.058
2.10	10.6	0.106	0.015	2.10	44.3	0.443	0.067
2.25	9.5	0.095	0.015	2.25	44.2	0.442	0.066
2.40	7.3	0.073	0.013	2.40	49.5	0.495	0.070
2.55	7.9	0.079	0.011	2.55	43.0	0.430	0.069
2.70	5.7	0.057	0.010	2.70	29.5	0.295	0.054
2.85	3.7	0.037	0.007	2.85	31.7	0.317	0.046
3.00	4.6	0.046	0.006	3.00	23.6	0.236	0.041
3.15	4.8	0.048	0.007	3.15	23.5	0.235	0.035
3.30	1.7	0.017	0.005	3.30	17.0	0.170	0.030
3.45	-	-	0.001	3.45	19.0	0.190	0.027
3.60	-	-	-	3.60	15.3	0.153	0.026
3.75	-	-	-	3.75	11.0	0.110	0.020
3.90	-	-	-	3.90	7.6	0.076	0.014
4.05	-	-	-	4.05	9.6	0.096	0.013
4.20	-	-	-	4.20	12.9	0.129	0.017
4.35	-	-	-	4.35	1.3	0.013	0.011
4.45	-	-	-	4.45	1.8	0.018	0.002
4.60	-	-	-	4.60	8.0	0.080	0.007
4.75	-	-	-	4.75	1.3	0.013	0.007
4.90	-	-	-	4.90	0.0	0.000	0.001

Nota. Fuente: Elaboración propia.

Tabla 18. Estimación del caudal promedio en el Río Fonseca

Descripción	Valor	Und
Área sección 1	0.334	m ²
Área sección 2	1.451	m ²
Área promedio	0.893	m ²
Caudal promedio	0.223	m ³ /s
	223.20	L/s

Nota. Fuente: Elaboración propia.

9.2. Datos de calidad de agua de muestreos

En las Tablas 19 y 20 se presentan los resultados de los muestreos, incluyendo datos de pH, temperatura, DBO, OD y coliformes. También en las Figuras 16-18 se presentan los perfiles de comportamiento para cada una de estas variables en los diversos muestreos. El origen de estos datos se plasma en el Anexo 4 (Resultados de análisis de laboratorio).

Tabla 19. Resultados de muestreos realizados (pH, temperatura del agua y DBO₅)

COD	Punto de muestreo	No. Muestreo	Fecha	Hora	pH	Temperatura del agua (°C)	DBO ₅ (mg/L)
R1	La Bombilla	1	30/3/2014	10:10 a.m.	7.3	25.80	380.00
		2	6/4/2014	9:40 a.m.	7.5	27.10	348.00
		3	11/5/2014	9:16 a.m.	NR	NR	189.00
R2	Paso de Lajas No.2	1	30/3/2014	12:56 a.m.	7.8	27.60	246.66
		2	6/4/2014	10:40 a.m.	8.0	28.30	210.00
		3	11/5/2014	9:44 a.m.	NR	NR	120.00
R3	Quinta Erlinda	3	11/5/2014	10:26 a.m.	NR	NR	9.03
R4	El Quebracho	1	30/3/2014	10:57 a.m.	7.8	25.60	2.70
		2	6/4/2014	11:13 a.m.	8.0	27.50	2.40
		3	11/5/2014	11:20 a.m.	NR	NR	5.33
R5	El Cascabel	1	30/3/2014	11:40 a.m.	7.9	27.30	1.55
		2	6/4/2014	11:50 a.m.	8.1	29.70	1.35
		3	11/5/2014	11:45 a.m.	NR	NR	NR

Nota. NR: Dato no reportado. Fuente: Elaboración propia.

Tabla 20. Resultados de muestreos realizados (OD, coliformes totales y fecales)

COD	Punto de muestreo	No. Muestreo	Fecha	Hora	OD (mg/L)	Col. totales (NMP/100 ml)	Col. fecales (NMP/100 ml)
R1	La Bombilla	1	30/3/2014	10:10 a.m.	< 0.10	> 1.6x10 ⁶	> 1.6x10 ⁶
		2	6/4/2014	9:40 a.m.	1.40	9.2x10 ⁶	5.4x10 ⁶
		3	11/5/2014	9:16 a.m.	0.60	NR	NR
R2	Paso de Lajas No.2	1	30/3/2014	12:56 a.m.	6.40	> 1.6x10 ⁶	> 1.6x10 ⁶
		2	6/4/2014	10:40 a.m.	9.00	9.2x10 ⁶	1.4x10 ⁶
		3	11/5/2014	9:44 a.m.	3.80	NR	NR
R3	Quinta Erlinda	3	11/5/2014	10:26 a.m.	6.40	NR	NR
R4	El Quebracho	1	30/3/2014	10:57 a.m.	6.60	9.2x10 ³	7.0x10 ²
		2	6/4/2014	11:13 a.m.	7.80	1.7x10 ⁴	1.3x10 ³
		3	11/5/2014	11:20 a.m.	7.60	NR	NR
R5	El Cascabel	1	30/3/2014	11:40 a.m.	6.40	1.4x10 ⁴	4.0x10 ²
		2	6/4/2014	11:50 a.m.	7.40	1.6x10 ⁴	2.2x10 ³
		3	11/5/2014	11:45 a.m.	6.40	NR	NR

Nota. NR: Dato no reportado. Fuente: Elaboración propia.

En términos de temperatura (Fig. 16), los valores presentan cambios normales en la corriente, considerando que son valores regulares para la época cálida del año en que se realizaron los muestreos, la ubicación de las estaciones y la exposición a la radiación solar.

Cabe destacar que los valores de temperatura no están indicados en la NTON 05 007 98 (Norma para la clasificación de los recursos hídricos según su uso potencial), sin embargo pueden analizarse en base a los valores recomendados en la NTON 09003-99 (Normas para el diseño de sistemas de abastecimiento y potabilización), que indican un rango entre 18 a 30 °C como parámetro de calidad de aguas para considerarse de abastecimiento y consumo humano, condición que cumplen las aguas del Río Fonseca de acuerdo a los muestreos realizados.

En cuanto al pH (Fig. 16), se registraron valores reportados como normales en diversas bibliografías de aguas superficiales. Se aprecia además un patrón de pH menor al inicio de cada tramo entre estaciones, efecto esperado dado que a medida que la MO disminuye y las algas extraen el dióxido de carbono (CO_2) del agua, se genera a su vez menos ácido carbónico y aumenta el pH. Finalmente, los valores de pH para la última estación muestreada (R5), cumplen con el rango de valores indicados en la NTON 05 007 98 (6–8.5), referidos para aguas Tipo 1 que son aptas para potabilizar.

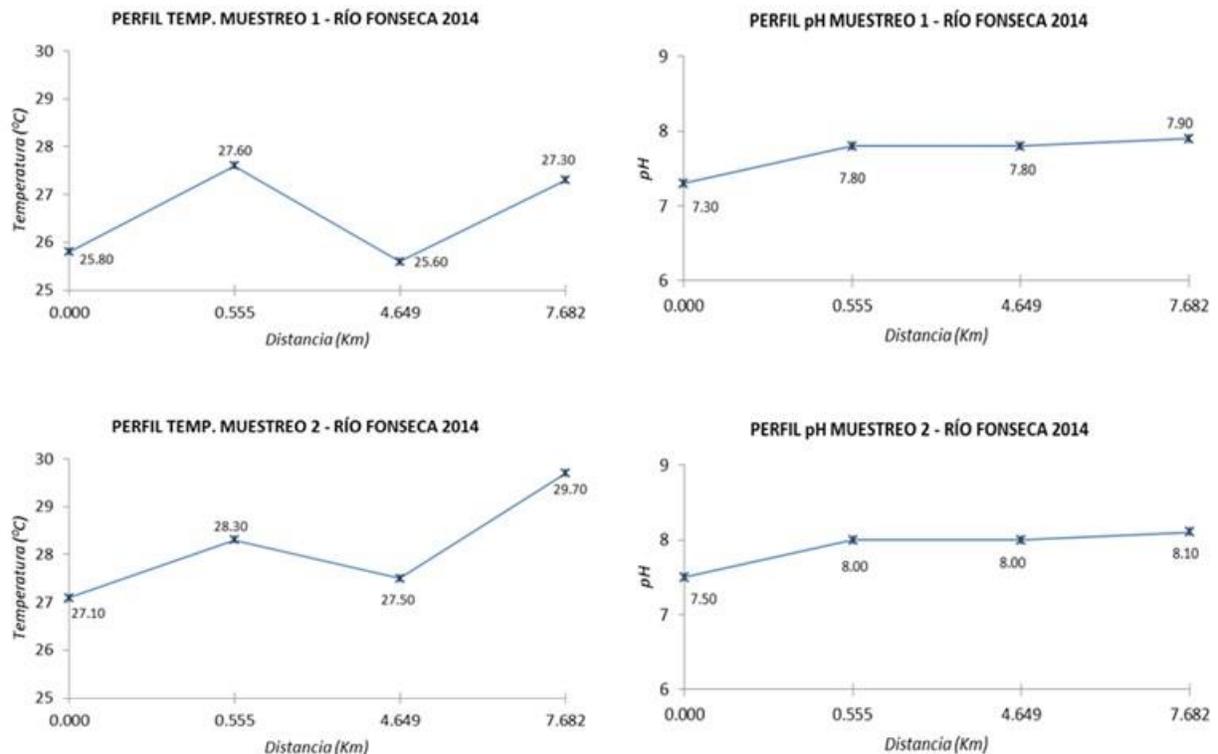


Figura 16. Perfiles de temperatura (del agua) y pH Río Fonseca - 2014

Nota. Fuente: Elaboración propia.

En el caso de la DBO_5 (Fig. 17) se observan comportamientos similares en los 3 muestreos realizados. Aunque la carga contaminante en la estación R1 del muestreo 3 resultó más baja en comparación a los dos primeros muestreos, sigue el mismo patrón, disminuyendo la DBO en la corriente a medida que avanza en el cauce.

Cabe destacar que debido a la tendencia presentada en los muestreos 1 y 2, para la estación R5 no se levantó muestra de DBO₅, usando en el caso de la modelación del muestreo 3 una media de los primeros dos muestreos.

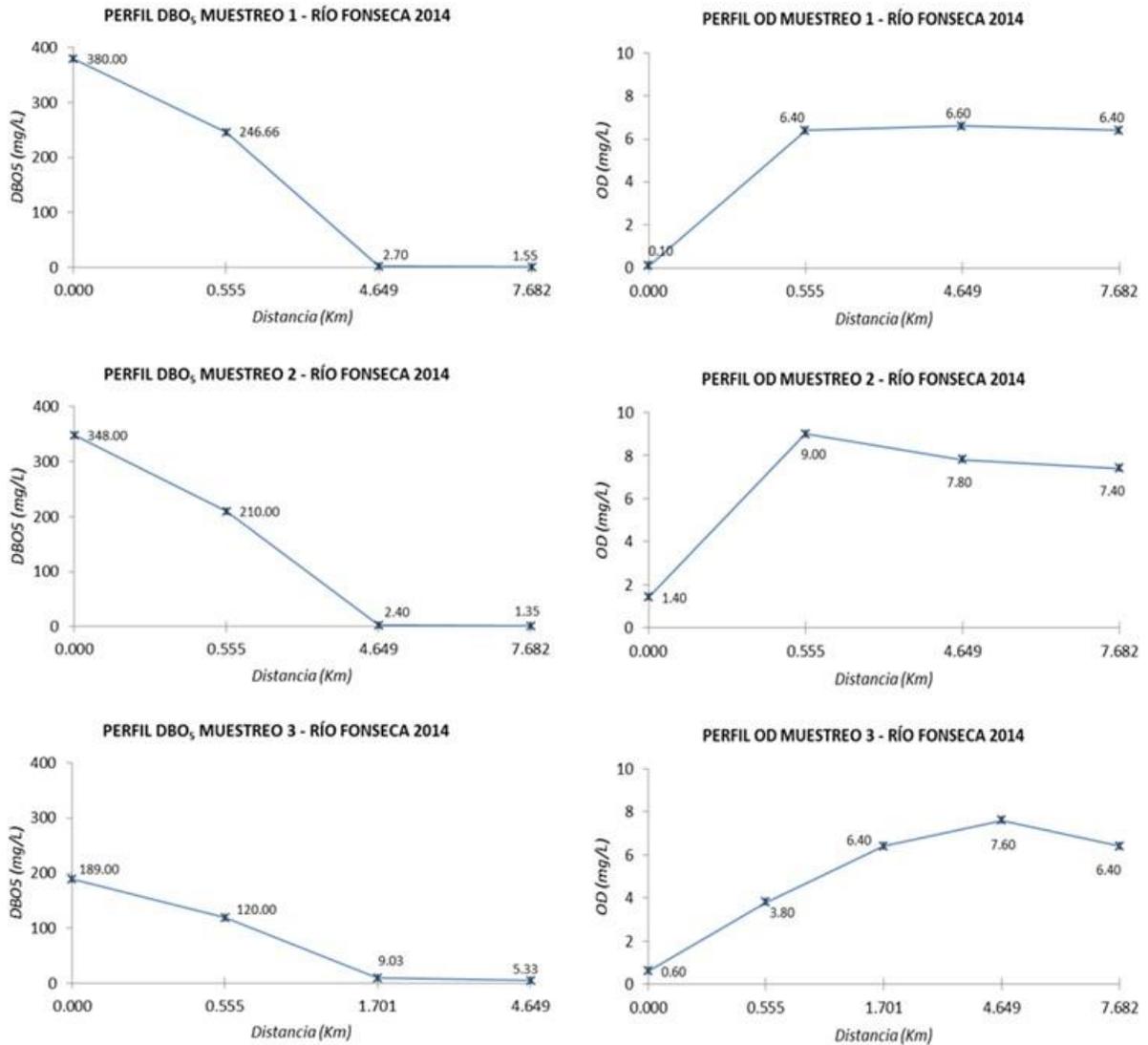


Figura 17. Perfiles de DBO₅ y OD Río Fonseca - 2014

Nota. Fuente: Elaboración propia.

Considerando la NTON 05 007-98, la DBO₅ registrada, para el final del tramo en R5, el agua cumple con el límite máximo establecido (2 m/L) para que el agua sea considerada como Tipo 1, subcategoría A, que solo requiere acondicionamiento con desinfección, presentando una remoción. Además el porcentaje de remoción de DBO₅ presentando en el tramo estudiado, alcanza en promedio un 99.6% en apenas 8.54 horas, considerado muy eficiente inclusive en procesos propios de plantas de tratamiento.

En cuanto al OD (Fig. 17), se observa un aumento significativo y bastante marcado entre la estación R1 y las estaciones siguientes, lo que en campo pudo ser constatado a simple vista, observándose una zona de descomposición activa, con agua sumamente turbia, con color y olor bastantes desagradables en la estación R1 (La Bombilla), pasando a aguas mucho más claras y con menos olores a partir de la estación R2 (Paso de Lajas 2). Debido a estas condiciones se infiere una reaireación bastante efectiva en la corriente, logrando recuperar en un tramo bastante corto condiciones aptas para la vida acuática.

El comportamiento del OD presenta además otra característica a partir de la estación R2 y es que no va en aumento sostenido hasta la estación R5, sino que hay tramos en que el OD del punto final es menor que el del punto inicial. Esta situación puede ser explicada considerando el valor de la concentración de saturación de oxígeno y el balance de OD en la corriente. A partir de la estación R2, se registraron valores de OD más elevados, inclusive cercanos a la saturación en algunos puntos, pero también se observó una menor turbulencia en la corriente.

En aguas menos turbulentas la concentración de OD tiende a estabilizarse hacia valores menores a los de saturación, existiendo además en estos tramos de aguas más claras, una menor transferencia de oxígeno desde la atmósfera hacia la corriente de agua, disminuyendo a su vez la actividad fotosintética y la eficiencia del proceso de reaireación.

Respecto al OD como parámetro de calidad, para el final del tramo estudiado el agua presenta valores por encima del límite mínimo permisible de al menos 4 mg/L (según la NTON 05 007-98), considerándose dentro del rango para agua Tipo 1, subcategoría A, que solo requiere acondicionamiento con desinfección.

Finalmente, en cuanto a coliformes (Fig. 18), se decidió no realizar un tercer muestreo debido a los costos asociados y a la marcada tendencia en los puntos muestreados tanto para coliformes totales como fecales (altos valores con exponenciales de 10^6 y patrones similares de disminución continua a partir de la estación R1 hasta la estación R5). Debido a esto el análisis de las coliformes se ha realizado en base a los primeros dos muestreos.

Considerando esto, de acuerdo a los valores monitoreados para la última estación en R5, el río aún no alcanza a cumplir con los parámetros requeridos por la NTON 05 007-98 para aguas Tipo 1, es decir que técnicamente en este punto esta agua no puede formar “parte de un producto o sub-producto destinado al consumo humano o que entre en contacto con él”.

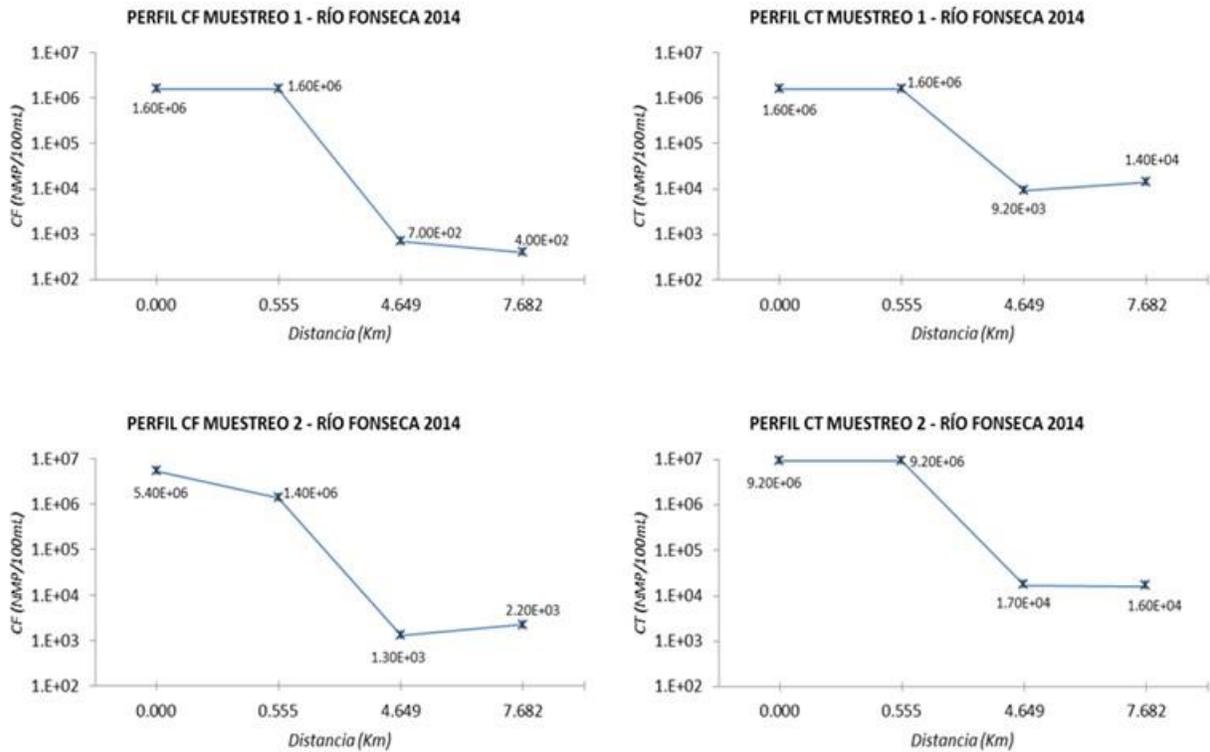


Figura 18. Perfiles de coliformes Río Fonseca - 2014

Nota. Fuente: Elaboración propia.

9.3. Análisis de la DBOCu

Dado que la modelación de calidad del agua requiere valores de carga última y de acuerdo a lo planteado en el acápite 7.8.2, se asumió un 65% de oxidación de la DBO a los 5 días, infiriendo así a través de una simple regla de tres, valores últimos para todos los muestreos, resultando en un K_d de botella (en condiciones de laboratorio) de 0.21 d^{-1} .

Este valor coincide con la bibliografía respecto al rango típico expuesto por Chapra para el nivel de tratamiento que reciben las aguas residuales vertidas a la corriente (entre 0.10 y 0.30 d^{-1}). Los datos de DBOCu estimados se presentan a continuación:

Tabla 21. Cálculo de la DBOCu

COD	Estación	Muestreo	DBO ₅ (mg/L)	DBOCu (mg/L)
R1	La Bombilla	1	380.00	584.62
		2	348.00	535.38
		3	189.00	290.77
R2	Paso de Lajas No.2	1	246.66	379.48
		2	210.00	323.08
		3	120.00	184.62
R3	Quinta Erlinda	3	9.03	13.89
R4	El Quebracho	1	2.70	4.15
		2	2.40	3.69
		3	5.33	8.20
R5	El Cascabel	1	1.55	2.38
		2	1.35	2.08
		3	1.45	2.23

Nota. Fuente: Elaboración propia.

Para indagar sobre la sensibilidad de variación, tanto de la carga última asumida como de las constantes K_d y K_r en la corriente, se realizó un análisis a manera de ejemplo, empleando los datos del muestreo 1, con un rango de valores cercanos para el K_d de botella en base a los valores recomendados en la bibliografía. La variación de la DBOCu se plantea en la Tabla 22 a continuación.

Tabla 22. Análisis de la DBOCu con diferentes Kd de botella

COD	DBOC ₅ (mg/L)	DBOCu Kd=0.18d ⁻¹ (mg/L)	DBOCu Kd=0.20d ⁻¹ (mg/L)	DBOCu Kd=0.21d ⁻¹ (mg/L)	DBOCu Kd=0.22d ⁻¹ (mg/L)
R1	380.0	640.3	601.2	584.6	569.6
R2	120.0	202.2	189.8	184.6	179.9
R3	9.0	15.2	14.3	13.9	13.5
R4	2.7	4.5	4.3	4.2	4.0
R5	1.6	2.6	2.5	2.4	2.3

Nota. Fuente: Elaboración propia.

Se precia que a medida que aumenta el Kd de botella disminuye la DBOCu, sin embargo teniendo como base el Kd de botella de 0.21 d⁻¹, estimado con el precepto de un 65% de oxidación a los 5 días, la variación de la DBOCu no supera el 10% bajo los Kd de botella en análisis. Considerando además que el valor empleado es muy cercano al expuesto en bibliografía como promedio (0.20 d⁻¹), se consideran aceptables para modelación los valores de DBOCu obtenidos en base a Kd=0.21d⁻¹.

Tabla 23. Análisis de Kd y Kr en la corriente con diferentes Kd de botella (muestreo 1)

Kd botella (d ⁻¹)	Muestreo 1	
	Kd ₂₀ (d ⁻¹)	Kr ₂₀ (d ⁻¹)
R1-R2		
0.18 (d ⁻¹)	12.36	5,028.00
0.20 (d ⁻¹)	12.36	4,722.00
0.21 (d ⁻¹)	12.36	4,593.20
0.22 (d ⁻¹)	12.36	4,474.00
R2-R4		
0.18 (d ⁻¹)	17.60	89.65
0.20 (d ⁻¹)	17.60	85.42
0.21 (d ⁻¹)	17.60	83.61
0.22 (d ⁻¹)	17.60	82.00
R4-R5		
0.18 (d ⁻¹)	2.94	8.40
0.20 (d ⁻¹)	2.94	7.91
0.21 (d ⁻¹)	2.94	7.70
0.22 (d ⁻¹)	2.94	7.52

Nota. Fuente: Elaboración propia.

En esta misma línea, se realizó así mismo un análisis de las variaciones de las constantes K_d y K_r , en base a las variaciones de $DBOC_u$ producidas por el rango de K_d de botella analizado. Estas variaciones de K_d y K_r , planteadas en la Tabla 23, se han estimado en base a despejes de las ecuaciones 3 y 13, para concentración de MO y estimación de déficit de oxígeno respectivamente, planteadas en el acápite 7.8. Modelo de Streeter-Phelps para DBO y OD.

De los datos estimados de las constantes de desoxigenación (K_d) y reaireación (K_r) en la corriente, se expone la constante K_r como más vulnerable a variaciones en dependencia de la carga última estimada, disminuyendo inversamente proporcional a medida que la K_d de botella aumenta, mientras que la constante K_d de mantiene constante ante estas variaciones. A pesar de esto, se considera que las variaciones presentadas no constituyen cambios significativos para el análisis de la calidad del agua de este estudio.

9.4. Análisis del OD saturado

Para conocer los valores de OD saturado, se usaron las ecuaciones del acápite 7.8, encontrándose los valores de OD saturado sin corregir (ODs) y OD saturado y corregido (ODsc) para las condiciones propias del sitio muestreado en cuanto a presión atmosférica y temperatura de la corriente. Los valores resultantes se presentan en la Tabla 24.

Tabla 24. Cálculo del ODs y ODsc

COD	Dist. desde R1 (m)	Altura (msnm)	OD medido (mg/L)			M1		M2		M3	
			M1	M2	M3	ODs M1 (mg/L)	ODsc M1 (mg/L)	ODs M2 (mg/L)	ODsc M2 (mg/L)	ODs M3 (mg/L)	ODsc M3 (mg/L)
R1	0.000	315	0.10	1.40	0.60	8.14	7.832	7.95	7.649	7.69	7.395
R2	0.555	307	6.40	9.00	3.80	7.88	7.589	7.79	7.495	7.69	7.403
R4	4.649	241	6.60	7.80	7.60	8.17	7.937	7.90	7.668	7.69	7.467
R5	7.682	212	6.40	7.40	6.40	7.93	7.729	7.60	7.408	7.69	7.499

Nota. Fuente: Elaboración propia.

Comparando los valores calculados para el ODsc con los datos obtenidos en los muestreos para OD, se aprecian algunos datos por encima del punto de saturación. La teoría sobre calidad de agua indica que estas condiciones suelen ser temporales, ya que aun en aguas limpias la transferencia de oxígeno entre el aire y la corriente buscará nuevamente un equilibrio que en la medida de lo posible será cercano a la saturación de oxígeno. Se destaca además que esta sobresaturación no es estable a través de los muestreos, siendo que además se presenta en zonas aun con alta carga contaminante.

Estas condiciones temporales de sobresaturación en la corriente pueden ser causadas por un aumento de velocidad en el sitio y el golpeteo del agua con las rocas presentes, además de la presencia en algunos puntos y en días concretos de plantas y hojas en la corriente, aumentando temporalmente el efecto de la fotosíntesis.

Considerando además que las fórmulas de Streeter-Phelps tienen como referencia el punto de saturación, para efectos de modelación modificaron estos datos en sobresaturación, por valores cercanos a la saturación siempre por debajo. Estos valores se presentan a continuación:

Tabla 25. Replanteamiento de valores de OD para modelaciones

Fecha	Muestreo	OD (mg/L)
30-03-14	1	0.10
06-04-14	2	1.40
11-05-14	3	0.60
30-03-14	1	6.40
06-04-14	2	7.40
11-05-14	3	3.80
11-05-14	3	6.40
30-03-14	1	6.60
06-04-14	2	7.60
11-05-14	3	7.40
30-03-14	1	6.40
06-04-14	2	7.40
11-05-14	3	6.40

Nota. Fuente: Elaboración propia.

9.5. Modelación de la DBO y el OD mediante Streeter-Phelps

Antes de modelar con el QUAL2K y para obtener una comparativa se decidió realizar una modelación tradicional de DBO y OD con el modelo de Streeter-Phelps (acápite 7.8 de este documento). Esto para encontrar las constantes K_d y K_r en base a los datos de los muestreos, de forma que se tuviera una referencia para los valores de estas constantes al momento de modelar con el software.

En canto a la modelación de DBO y OD se ha considerado lo siguiente:

- La DBO modelada corresponde a la DBOCu.
- En el caso de la DBO, dada la tendencia de los valores obtenidos para la estación R5 en los primeros 2 muestreos, para el valor del muestreo 3 en esta estación no se recolectó la muestra en campo y se decidió emplear un promedio de los muestreos 1 y 2.
- Con el fin de manipular al mínimo posible los valores registrados en la corriente, se decidió considerar la modelación de la estación R3 únicamente para el muestreo 3, considerando de esta forma 3 tramos para los muestreos 1 y 2 (R1-R2, R2-R4 y R4-R5) y 4 tramos para el muestreo 3 (R1-R2, R2-R3, R3-R4 y R4-R5).
- Para la simulación se plantearon dos escenarios de velocidad (0.25 y 0.20 m/s) para analizar la influencia de este parámetros en las velocidades de reacción en la corriente.

El resultado de esta modelación se plantea en las Tablas 27-31. Los valores de las constantes de desoxigenación (K_d) y reaeración (K_r) a 20 °C, se han estimado por prueba y error mediante el despeje de las ecuaciones 3 y 13 (para la concentración de MO y déficit de oxígeno respectivamente). Para las correcciones pertinentes de temperatura, se han empleado además las ecuaciones 6 (para corrección de K_d) y 22 (para corrección de K_r).

En el caso de la constante de desoxigenación (K_d), se observa que desde para el tramo de estudio R1 la $DBOC_u$ decae constantemente. Además para ambos escenarios de velocidades, se pueden observar reacciones más eficientes en las La Bombilla y Quinta Erlinda, siendo un patrón esperado dado que al reducirse cantidad de MO consumible también disminuye la velocidad de la reacción.

Cabe destacar que los valores de K_d obtenidos son superiores (valores de hasta 32 d^{-1}) a los planteados en bibliografías (menores a 1 d^{-1}). Sin embargo es de considerarse que esta reacción es particular para cada río y sus características propias, por lo que se estima que las velocidades de reacción encontradas concuerdan con los valores obtenidos para DBO en los puntos estudiados, valores que además coinciden con la inspección visual al momento de los muestreos.

En el caso del OD también se observan constantes de reaireación (K_r) por encima de las planteadas en bibliografía pero concordantes con los datos obtenidos y los cambios visuales observados en el río, teniéndose en el primer muestreo un cambio brusco en el primer tramo pasando de condiciones casi anóxicas (0.60 mg/L) a un valor capaz de soportar la vida acuática (6.40 mg/L), en apenas 555 m. Los valores encontrados para K_r además no coinciden con los obtenidos mediante las ecuaciones de O'Connor & Dobbins, Churchill y Owen & Gibbs, teniéndose valores experimentales mucho más eficientes a los planteados por esta bibliografía.

En cuanto a la variación de velocidad analizada, en las Figuras 19 y 20 puede observarse que los patrones de comportamiento de las reacciones para la DBO y el OD cambian, pero como es de esperarse ocurre en menos tiempo a medida que la velocidad aumenta. En este caso sin embargo las variaciones en tiempo no son significativas debido al tramo de estudio tan corto. Considerando además que la velocidad analizada de 0.20 m/s se acerca a velocidades de sedimentación, se considera que como herramienta de análisis predictivo se adecúa más la velocidad aforada de 0.25 m/s .

Tabla 26. Simulación Streeter-Phelps DBOCu-OD muestreo 1 (Vel. 0.25 m/s)

	Ttramo (d)	Xtramo (m)		DBOCu (mg/L)	ODsc M1 (mg/L)	D (mg/L)	OD (mg/L)	
Tramo	0.0000	0.00	Tprom. M1 (°C)	584.620	7.832	7.732	0.100	tc tramo (d)
R1-R2	0.0030	64.80	26.70	555.853	7.804	1.742	6.062	0.0000
Q (m3/s)	0.0060	129.60	Kd_{20°C} (d⁻¹)	528.502	7.775	1.656	6.119	Xc tramo (m)
0.223	0.0090	194.40	12.364	502.497	7.747	1.575	6.172	0.00
Vel. (m/s)	0.0120	259.20	Kd_T (d⁻¹)	477.771	7.719	1.497	6.221	
0.250	0.0150	324.00	16.819	454.262	7.690	1.423	6.267	
Vel. (m/d)	0.0180	388.80	Kr_{20°C} (d⁻¹)	431.910	7.662	1.353	6.308	
21,600.00	0.0210	453.60	4,593.200	410.657	7.634	1.287	6.347	
	0.0240	518.40	Kr _T (d ⁻¹)	390.451	7.605	1.224	6.382	
	0.0257	555.00	5,384.248	379.480	7.589	1.189	6.400	
Tramo	0.0000	0.00	Tprom. M1 (°C)	379.480	7.589	1.189	6.400	tc tramo (d)
R2-R4	0.0150	324.00	26.60	265.449	7.617	57.590	0.000	0.0190
Q (m3/s)	0.0300	648.00	Kd_{20°C} (d⁻¹)	185.684	7.644	53.379	0.000	Xc tramo (m)
0.223	0.0450	972.00	17.595	129.887	7.672	40.359	0.000	409.55
Vel. (m/s)	0.0600	1,296.00	Kd_T (d⁻¹)	90.857	7.699	28.929	0.000	
0.250	0.0750	1,620.00	23.825	63.555	7.727	20.397	0.000	
Vel. (m/d)	0.0900	1,944.00	Kr_{20°C} (d⁻¹)	44.458	7.754	14.305	0.000	
21,600.00	0.1050	2,268.00	83.610	31.098	7.782	10.015	0.000	
	0.1200	2,592.00	Kr _T (d ⁻¹)	21.754	7.809	7.007	0.802	
	0.1350	2,916.00	97.777	15.217	7.837	4.902	2.934	
	0.1500	3,240.00		10.644	7.864	3.429	4.435	
	0.1650	3,564.00		7.446	7.892	2.399	5.493	
	0.1800	3,888.00		5.208	7.919	1.678	6.241	
	0.1895	4,094.00		4.150	7.937	1.337	6.600	
R4-R5	0.0000	0.00	Tprom. M1 (°C)	4.150	7.937	1.337	6.600	tc tramo (d)
Q (m3/s)	0.0150	324.00	26.45	3.911	7.914	1.392	6.522	0.0586
0.223	0.0300	648.00	Kd _{20°C} (d ⁻¹)	3.685	7.892	1.427	6.465	Xc tramo (m)
Vel. (m/s)	0.0450	972.00	2.944	3.473	7.870	1.446	6.424	1,265.91
0.250	0.0600	1,296.00	Kd _T (d ⁻¹)	3.273	7.848	1.451	6.396	
Vel. (m/d)	0.0750	1,620.00	3.959	3.084	7.826	1.445	6.381	
21,600.00	0.0900	1,944.00	Kr _{20°C} (d ⁻¹)	2.906	7.803	1.429	6.374	
	0.1050	2,268.00	7.703	2.738	7.781	1.406	6.375	
	0.1200	2,592.00	Kr _T (d ⁻¹)	2.581	7.759	1.376	6.383	
	0.1350	2,916.00	8.977	2.432	7.737	1.342	6.395	
	0.1404	3,033.00		2.380	7.729	1.329	6.400	

Nota. Fuente: Elaboración propia.

Tabla 27. Simulación Streeter-Phelps DBOCu-OD muestreo 2 (Vel. 0.25 m/s)

	Ttramo (d)	Xtramo (m)		DBOCu (mg/L)	ODsc M2 (mg/L)	D (mg/L)	OD (mg/L)	
Tramo	0.0000	0.00	Tprom. M2 (°C)	535.380	7.649	6.249	1.400	tc tramo (d)
R1-R2	0.0030	64.80	27.70	504.721	7.631	0.148	7.483	0.0000
Q (m3/s)	0.0060	129.60	Kd_{20°C} (d⁻¹)	475.817	7.613	0.140	7.474	Xc tramo (m)
0.223	0.0090	194.40	13.802	448.569	7.595	0.132	7.464	0.00
Vel. (m/s)	0.0120	259.20	Kd_T (d⁻¹)	422.881	7.577	0.124	7.453	
0.250	0.0150	324.00	19.657	398.665	7.559	0.117	7.442	
Vel. (m/d)	0.0180	388.80	Kr_{20°C} (d⁻¹)	375.835	7.541	0.110	7.431	
21,600.00	0.0210	453.60	55,800.000	354.312	7.523	0.104	7.419	
	0.0240	518.40	Kr_T (d⁻¹)	334.022	7.505	0.098	7.407	
	0.0257	555.00	66,979.803	323.080	7.495	0.095	7.400	
Tramo	0.0000	0.00	Tprom. M2 (°C)	323.080	7.495	0.095	7.400	tc tramo (d)
R2-R4	0.0150	324.00	27.90	226.774	7.509	4.224	3.285	0.0031
Q (m3/s)	0.0300	648.00	Kd_{20°C} (d⁻¹)	159.176	7.523	2.965	4.558	Xc tramo (m)
0.223	0.0450	972.00	16.416	111.727	7.536	2.081	5.455	67.96
Vel. (m/s)	0.0600	1,296.00	Kd_T (d⁻¹)	78.423	7.550	1.461	6.089	
0.250	0.0750	1,620.00	23.596	55.046	7.564	1.025	6.538	
Vel. (m/d)	0.0900	1,944.00	Kr_{20°C} (d⁻¹)	38.638	7.577	0.720	6.858	
21,600.00	0.1050	2,268.00	1,070.000	27.120	7.591	0.505	7.086	
	0.1200	2,592.00	Kr_T (d⁻¹)	19.036	7.605	0.355	7.250	
	0.1350	2,916.00	1,290.486	13.362	7.618	0.249	7.370	
	0.1500	3,240.00		9.379	7.632	0.175	7.457	
	0.1650	3,564.00		6.583	7.646	0.123	7.523	
	0.1800	3,888.00		4.621	7.660	0.086	7.574	
	0.1895	4,094.00		3.690	7.668	0.069	7.600	
Tramo	0.0000	0.00	Tprom. M2 (°C)	3.690	7.668	0.068	7.600	tc tramo (d)
Q (m3/s)	0.0150	324.00	28.60	3.471	7.640	0.013	7.627	0.0000
0.223	0.0300	648.00	Kd_{20°C} (d⁻¹)	3.265	7.613	0.013	7.600	Xc tramo (m)
Vel. (m/s)	0.0450	972.00	2.750	3.071	7.585	0.012	7.573	0.00
0.250	0.0600	1,296.00	Kd_T (d⁻¹)	2.888	7.557	0.011	7.546	
Vel. (m/d)	0.0750	1,620.00	4.082	2.717	7.529	0.011	7.519	
21,600.00	0.0900	1,944.00	Kr_{20°C} (d⁻¹)	2.555	7.501	0.010	7.492	
	0.1050	2,268.00	860.000	2.404	7.474	0.009	7.464	
	0.1200	2,592.00	Kr_T (d⁻¹)	2.261	7.446	0.009	7.437	
	0.1350	2,916.00	1,054.577	2.127	7.418	0.008	7.410	
	0.1404	3,033.00		2.080	7.408	0.008	7.400	

Nota. Fuente: Elaboración propia.

Tabla 28. Simulación Streeter-Phelps DBOCu-OD muestreo 3 (Vel. 0.25 m/s)

Tramo	Ttramo (d)	Xtramo (m)		DBOCu (mg/L)	ODsc M1 (mg/L)	D (mg/L)	OD (mg/L)	
R1-R2	0.0000	0.00	Tprom. M3 (°C)	290.770	7.395	6.795	0.600	tc tramo (d)
Q (m3/s)	0.0030	64.80	29.00	275.751	7.396	5.452	1.944	0.0000
0.223	0.0060	129.60	Kd_{20°C} (d⁻¹)	261.508	7.397	5.108	2.289	Xc tramo (m)
Vel. (m/s)	0.0090	194.40	11.693	248.000	7.398	4.840	2.558	0.00
0.250	0.0120	259.20	Kd_T (d⁻¹)	235.190	7.399	4.590	2.809	
Vel. (m/d)	0.0150	324.00	17.678	223.042	7.400	4.353	3.047	
21,600.00	0.0180	388.80	Kr_{20°C} (d⁻¹)	211.521	7.401	4.128	3.273	
	0.0210	453.60	746.000	200.595	7.402	3.915	3.487	
	0.0240	518.40	Kr_T (d⁻¹)	190.234	7.403	3.713	3.690	
	0.0257	555.00	923.503	184.620	7.403	3.603	3.800	
R2-R3	0.0000	0.00	Tprom. M3 (°C)	184.620	7.403	3.603	3.800	tc tramo (d)
Q (m3/s)	0.0050	108.00	29.00	144.674	7.404	10.258	0.000	0.0035
0.223	0.0100	216.00	Kd_{20°C} (d⁻¹)	113.371	7.405	8.242	0.000	Xc tramo (m)
Vel. (m/s)	0.0150	324.00	32.253	88.842	7.405	6.465	0.941	76.67
0.250	0.0200	432.00	Kd_T (d⁻¹)	69.619	7.406	5.066	2.340	
Vel. (m/d)	0.0250	540.00	48.763	54.556	7.407	3.970	3.437	
21,600.00	0.0300	648.00	Kr_{20°C} (d⁻¹)	42.752	7.408	3.111	4.297	
	0.0350	756.00	580.700	33.502	7.408	2.438	4.971	
	0.0400	864.00	Kr_T (d⁻¹)	26.253	7.409	1.910	5.499	
	0.0450	972.00	718.872	20.573	7.410	1.497	5.913	
	0.0500	1,080.00		16.121	7.411	1.173	6.238	
	0.0531	1,146.00		13.890	7.411	1.011	6.400	
R3-R4	0.0000	0.00	Tprom. M3 (°C)	13.890	7.411	1.011	6.400	tc tramo (d)
Q (m3/s)	0.0130	280.80	29.00	13.210	7.417	0.110	7.307	0.0000
0.223	0.0260	561.60	Kd_{20°C} (d⁻¹)	12.563	7.422	0.103	7.319	Xc tramo (m)
Vel. (m/s)	0.0390	842.40	2.554	11.948	7.427	0.098	7.330	0.00
0.250	0.0520	1,123.20	Kd_T (d⁻¹)	11.363	7.433	0.093	7.340	
Vel. (m/d)	0.0650	1,404.00	3.861	10.807	7.438	0.088	7.350	
21,600.00	0.0780	1,684.80	Kr_{20°C} (d⁻¹)	10.278	7.443	0.084	7.359	
	0.0910	1,965.60	385.000	9.775	7.449	0.080	7.369	
	0.1040	2,246.40	Kr_T (d⁻¹)	9.296	7.454	0.076	7.378	
	0.1170	2,527.20	476.607	8.841	7.459	0.072	7.387	
	0.1300	2,808.00		8.408	7.465	0.069	7.396	
	0.1365	2,948.00		8.200	7.467	0.067	7.400	

Nota. Fuente: Elaboración propia.

Tabla 28. Simulación Streeter-Phelps DBOCu-OD muestreo 3 (Vel. 0.25 m/s) (Continuación)

Tramo	Ttramo (d)	Xtramo (m)		DBOCu (mg/L)	ODsc M1 (mg/L)	D (mg/L)	OD (mg/L)	
R4-R5	0.0000	0.00	Tprom. M3 (°C)	8.200	7.467	0.067	7.400	tc tramo (d)
Q (m3/s)	0.0150	324.00	29.00	7.135	7.471	0.920	6.550	0.0602
0.223	0.0300	648.00	Kd_{20°C} (d⁻¹)	6.208	7.474	1.381	6.093	Xc tramo (m)
Vel. (m/s)	0.0450	972.00	6.134	5.402	7.477	1.592	5.886	1,299.70
0.250	0.0600	1,296.00	Kd_T (d⁻¹)	4.701	7.481	1.648	5.833	
Vel. (m/d)	0.0750	1,620.00	9.274	4.090	7.484	1.610	5.874	
21,600.00	0.0900	1,944.00	Kr_{20°C} (d⁻¹)	3.559	7.488	1.520	5.968	
	0.1050	2,268.00	21.340	3.097	7.491	1.403	6.089	
	0.1200	2,592.00	Kr_T (d⁻¹)	2.695	7.495	1.274	6.220	
	0.1350	2,916.00	26.418	2.345	7.498	1.145	6.353	
	0.1404	3,033.00		2.230	7.499	1.099	6.400	

Nota. Fuente: Elaboración propia.

Tabla 29. Comparativa de velocidades de reacción a diferentes velocidades de la corriente (muestreo 1)

Tramo	Muestreo 1 (0.20 m/s)				Muestreo 1 (0.25 m/s)			
	Kd _(20°C)	Kd _(T)	Kr _(20°C)	Kr _(T)	Kd _(20°C)	Kd _(T)	Kr _(20°C)	Kr _(T)
R1-R2	9.891	13.455	3,673.000	4,305.570	12.364	16.819	4,593.200	5,384.248
R2-R4	14.076	19.060	66.900	78.236	17.595	23.825	83.610	97.777
R4-R5	2.355	3.167	6.160	7.178	2.944	3.959	7.703	8.977

Nota. Fuente: Elaboración propia.

Tabla 30. Comparativa de velocidades de reacción a diferentes velocidades de la corriente (muestreo 2)

Tramo	Muestreo 2 (0.20 m/s)				Muestreo 2 (0.25 m/s)			
	Kd _(20°C)	Kd _(T)	Kr _(20°C)	Kr _(T)	Kd _(20°C)	Kd _(T)	Kr _(20°C)	Kr _(T)
R1-R2	11.041	15.726	44,300.000	53,175.722	13.802	19.657	55,800.000	66,979.803
R2-R4	13.133	18.877	860.000	1,037.213	16.416	23.596	1,070.000	1,290.486
R4-R5	2.200	3.266	700.000	858.376	2.750	4.082	860.000	1,054.577

Nota. Fuente: Elaboración propia.

Tabla 31. Comparativa de velocidades de reacción a diferentes velocidades de la corriente (muestreo 3)

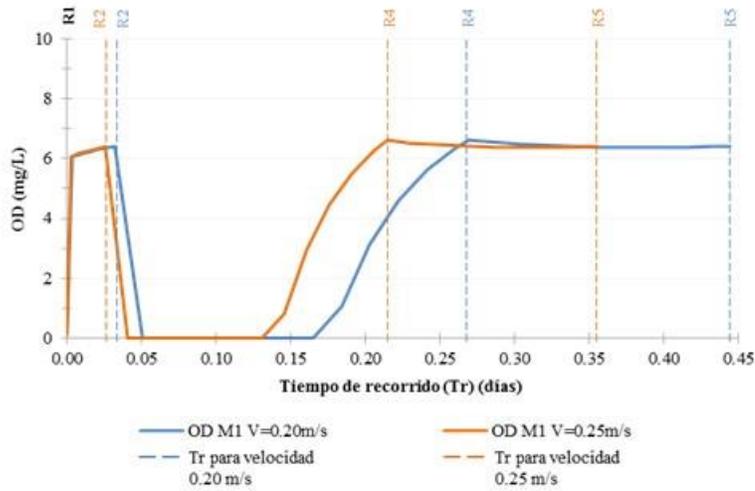
Tramo	Muestreo 3 (0.20 m/s)				Muestreo 3 (0.25 m/s)			
	Kd_(20°C)	Kd_(T)	Kr_(20°C)	Kr_(T)	Kd_(20°C)	Kd_(T)	Kr_(20°C)	Kr_(T)
R1-R2	9.354	14.143	596.800	738.803	11.693	17.678	746.000	923.503
R2-R3	25.802	39.010	464.500	575.023	32.253	48.763	580.700	718.872
R3-R4	2.044	3.090	305.00	377.57	2.554	3.861	385.000	476.607
R4-R5	4.907	7.419	17.070	21.132	6.134	9.274	21.340	26.418

Nota. Fuente: Elaboración propia.

Los valores de Kd y Kr presenta un patrón similar entre muestreos y velocidades analizadas, sin embargo tienen una conducta bastante irregular entre tramos, lo que resalta una mayor precisión de resultados predictivos mientras más cercanas sean las estaciones de muestreo. En este caso además se evidencia que los factores que influyen en el proceso de autodepuración no se mantienen constantes en los tramos entre estaciones muestreadas.

De la aplicación del modelo de Streeter-Phelps se desprenden además algunas deficiencias del modelo, por ejemplo al modelar el OD matemáticamente es posible obtener valores menores a 0, sin embargo en situaciones reales esto no existe, siendo que en condiciones anóxicas el oxígeno alcanza 0 mg/L.

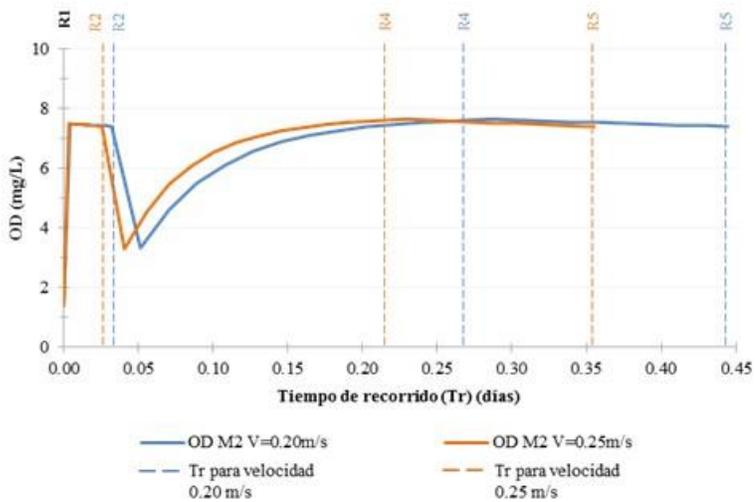
Cabe destacar además que para lograr aproximar al final del tramo el valor registrado en campo, los resultantes del modelo llevan cambios drásticos alcanzando rápidamente condiciones anóxicas y restableciendo el oxígeno en tramos sumamente cortos, o aumentando drásticamente el OD en tramos de distancias sumamente cortas, por lo que para tener certeza del comportamiento del OD y la DBO en estos tramos sería necesario realizar mediciones entre distancias bastante cortas para comprobar la conducta real de estos valores.



MUESTREO 1

Tramo	Kd (20°C)	
	0.20m/s	0.25m/s
R1-R2	9.9	12.4
R2-R4	14.1	17.6
R4-R5	2.4	2.9

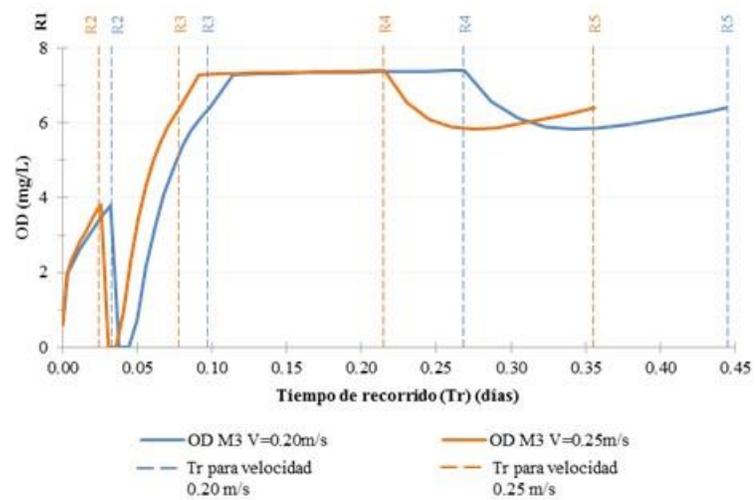
Tramo	Kr (20°C)	
	0.20m/s	0.25m/s
R1-R2	3,673.0	4,593.2
R2-R4	66.9	83.6
R4-R5	6.2	7.7



MUESTREO 2

Tramo	Kd (20°C)	
	0.20m/s	0.25m/s
R1-R2	11.0	13.8
R2-R4	13.1	16.4
R4-R5	2.2	2.8

Tramo	Kr (20°C)	
	0.20m/s	0.25m/s
R1-R2	44,300.0	55,800.0
R2-R4	860.0	1,070.0
R4-R5	700.0	860.0



MUESTREO 3

Tramo	Kd (20°C)	
	0.20m/s	0.25m/s
R1-R2	9.4	11.7
R2-R3	25.8	32.3
R3-R4	2.0	2.6
R4-R5	4.9	6.1

Tramo	Kr (20°C)	
	0.20m/s	0.25m/s
R1-R2	596.8	746.0
R2-R3	464.5	580.7
R3-R4	305.0	385.0
R4-R5	17.1	21.3

Figura 19. Comportamiento del OD frente a cambio de velocidad en la corriente

Nota. Fuente: Elaboración propia.

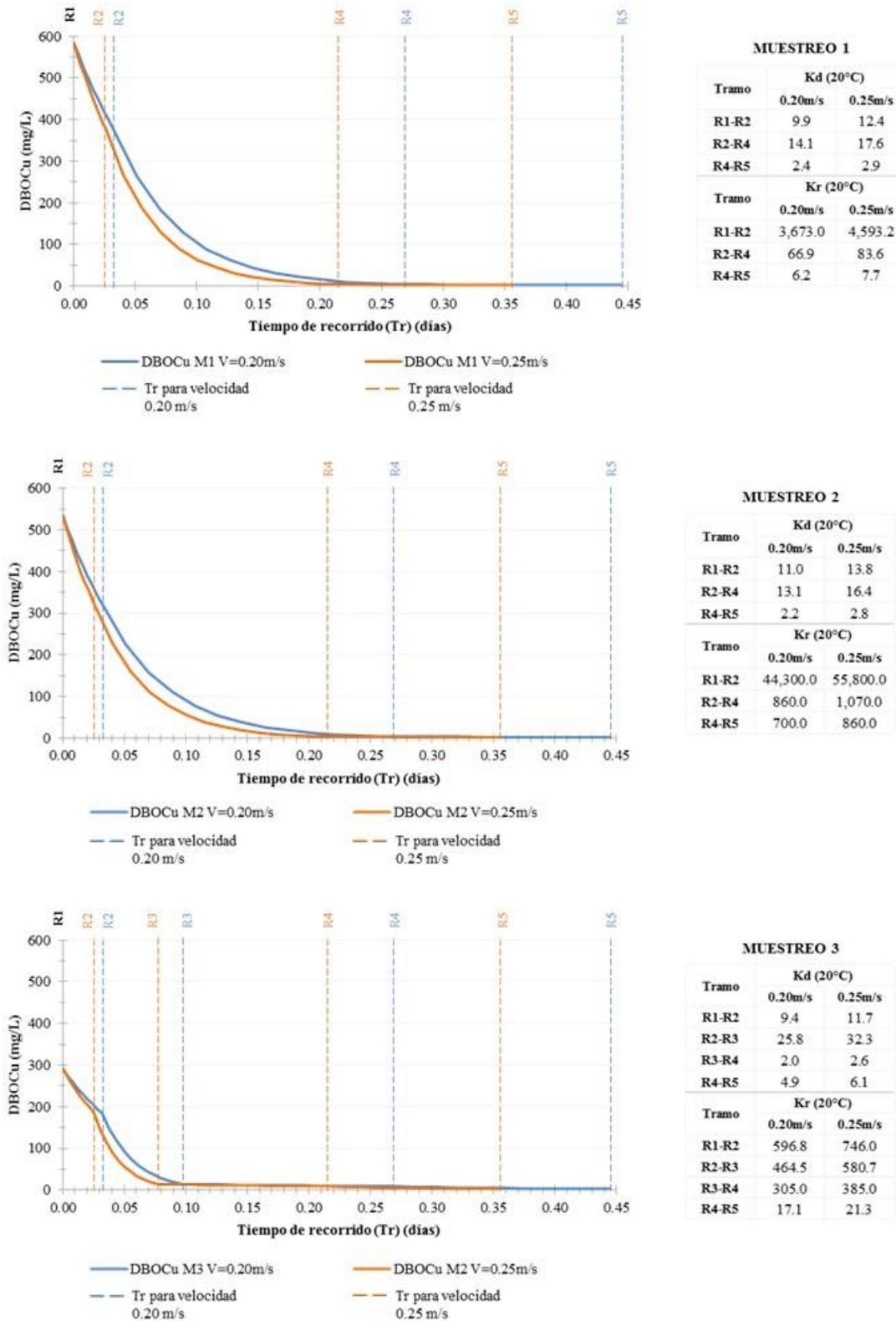


Figura 20. Comportamiento de la DBOCu frente a cambio de velocidad en la corriente

Nota. Fuente: Elaboración propia.

9.6. Simulación con el modelo QUAL2K

Para la simulación de la DBOCu y el OD con el software QUAL2K usualmente se sigue un proceso de calibración seguido por uno de verificación. La calibración suele realizarse mediante valores de algún muestreo con datos confiables del cuerpo de agua.

Los datos hidráulicos son introducidos para simular las condiciones del cauce y los datos de calidad de agua se introducen para la primera estación del estudio, calibrando para cada tramo las velocidades de reacción (ej. K_d y K_r) de forma que permitan crear datos que se ajusten de manera adecuada a los datos observados a lo largo de las estaciones muestreadas. Estos datos registrados también se introducen en el modelo para poder obtener graficas comparativas entre lo modelado y los datos recolectados en muestreos.

La verificación por su parte suele realizarse una vez calibrado el modelo, considerando muestreos adicionales y analizando nuevas velocidades de reacción que permitan la estimación de datos que permitan obtener valores razonables para cualquiera de los muestreos, siendo esta última modelación calibrada una excelente herramienta para el control de calidad de agua en las corrientes y los vertidos contaminantes a las mismas.

Para el caso de este estudio en particular, considerando que es una primera aproximación al modelo y que se pretende conocer que tan bien el software puede reproducir las condiciones reales en la corriente, se ha decidido simplemente calibrar el modelo de forma independiente para cada uno de los muestreos realizados, coincidiendo con los tramos propuestos en el estudio con la ecuación de Streeter-Phelps.

Se considera además que para obtener un modelo calibrado confiable, se tendría que realizar una campaña más extensa de muestreos, considerando obligatoriamente datos meteorológicos reales del sitio y no “dummy values”. Con esta extensión en tiempo además se podrían comparar valores realmente promedios en determinadas temporadas para estos parámetros de calidad del agua, analizando lo que podría considerarse como condiciones anómalas (ej. sobresaturación).

Como forma de ejemplo de introducción de datos al programa, en el Anexo 5 “Datos de entrada QUAL2K” se exponen las capturas de pantalla de los datos introducidos a la simulación del muestreo 1. Además los resultados de las simulaciones de los 3 muestreos se exponen en las Figuras 21-27. También las constantes K_d y K_r obtenidas se presentan en la Tabla 32.

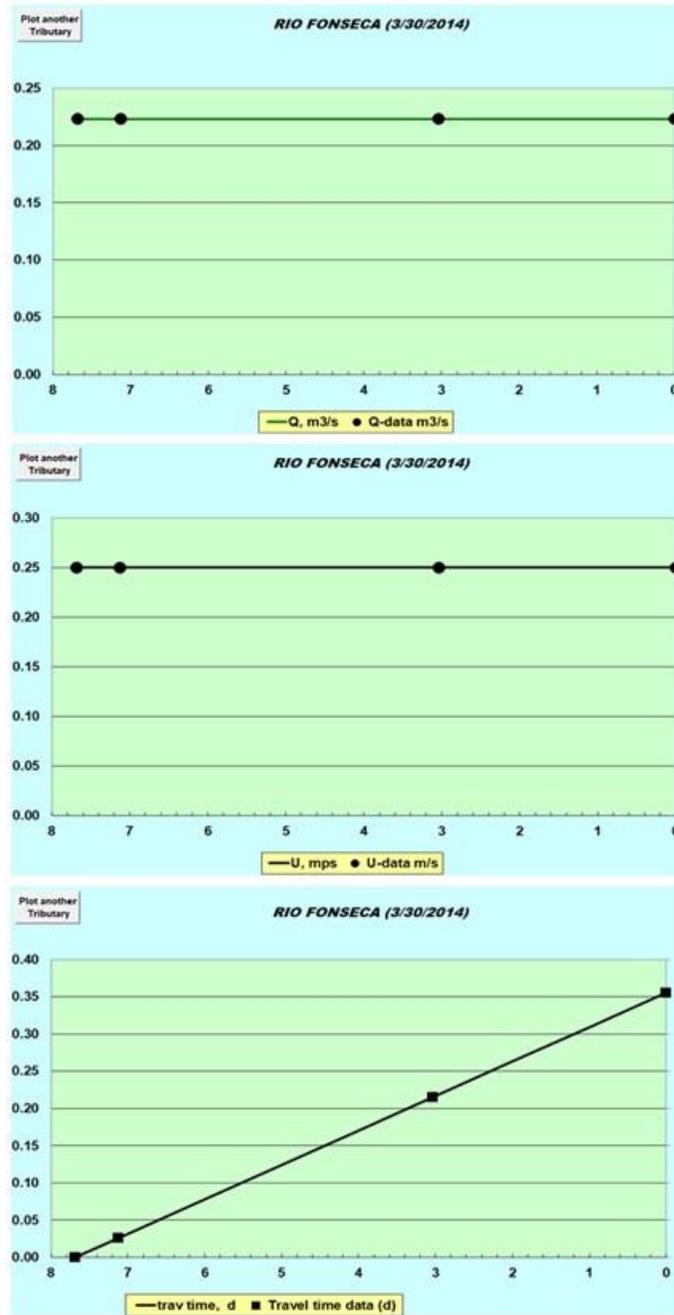


Figura 21. Simulación de condiciones hidráulicas QUAL2K (Iguales para muestreos 1,2 y 3)

Nota. Fuente: Elaboración propia.

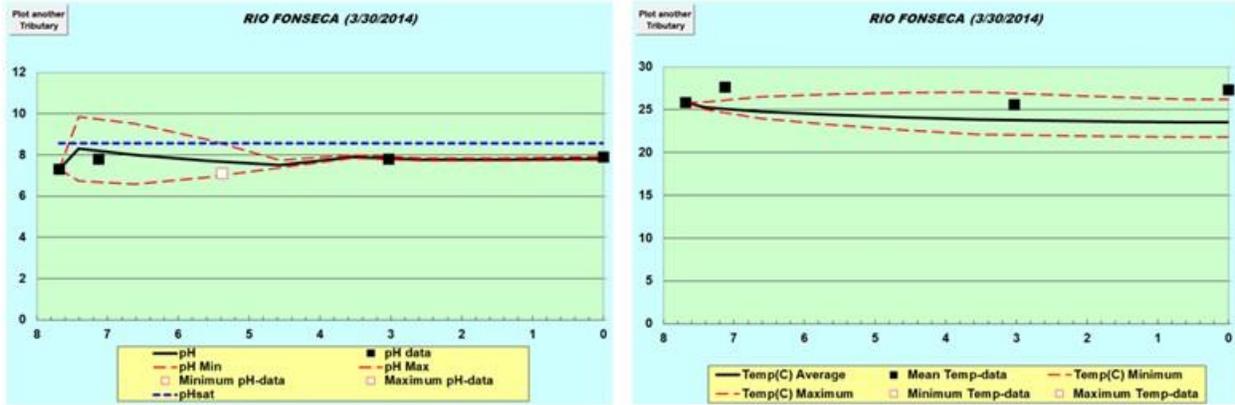


Figura 22. Modelación de pH y temperatura en QUAL2K (muestreo 1)

Nota. Fuente: Elaboración propia.

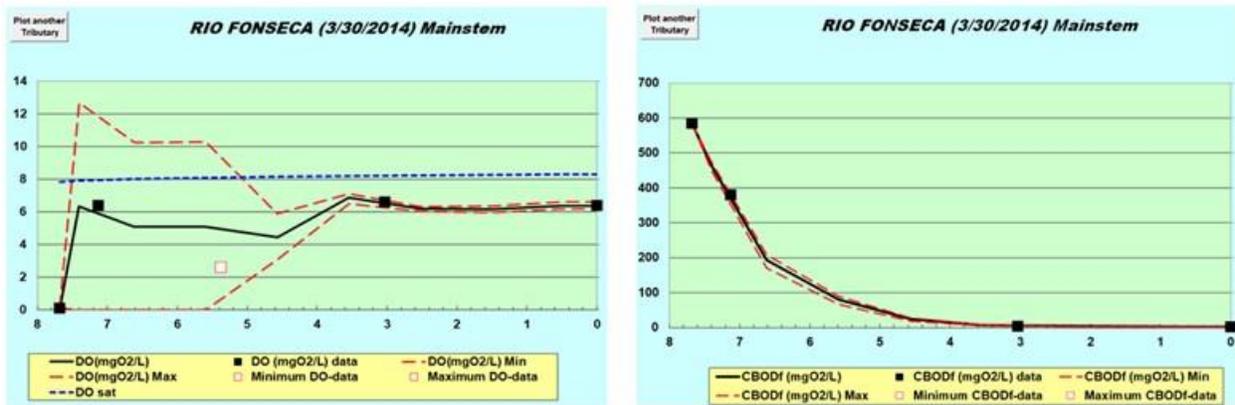


Figura 23. Modelación de OD y DBOCu en QUAL2K (muestreo 1)

Nota. Fuente: Elaboración propia.

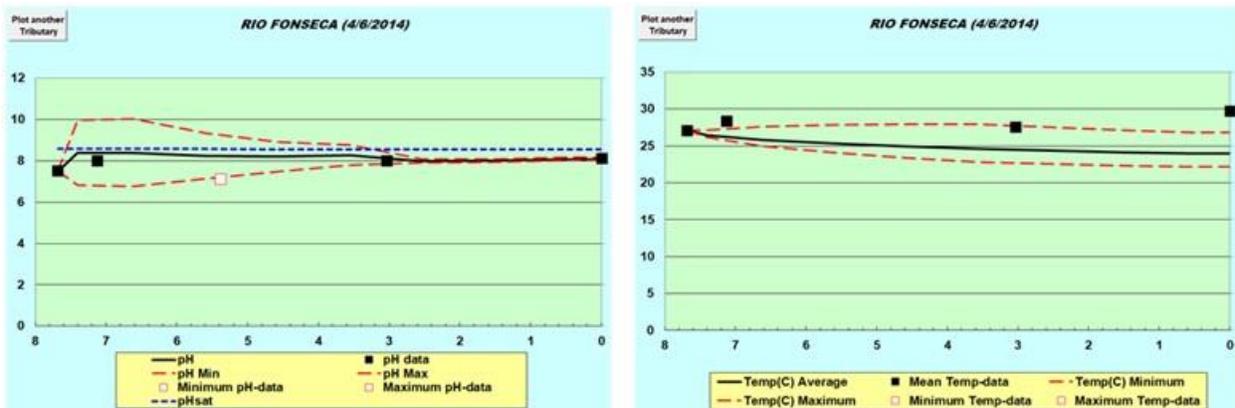


Figura 24. Modelación de pH y temperatura en QUAL2K (muestreo 2)

Nota. Fuente: Elaboración propia.

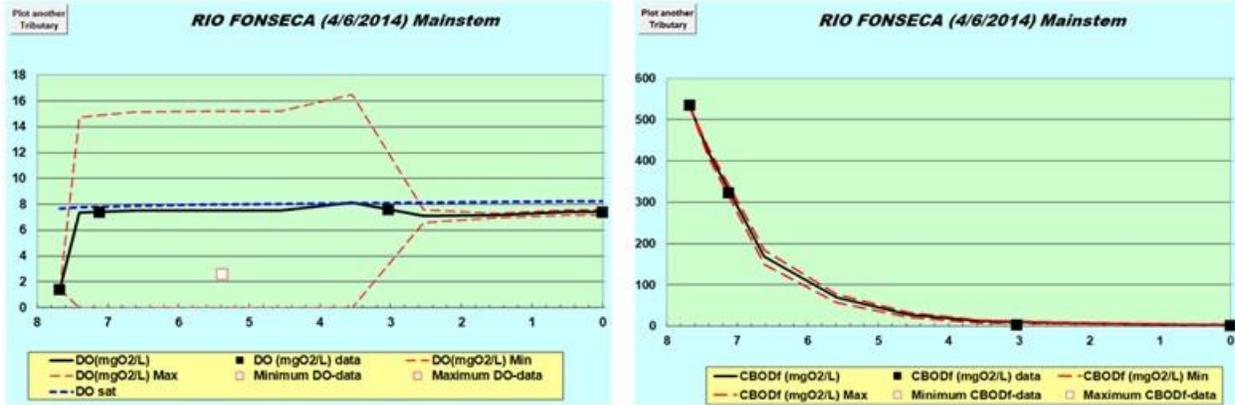


Figura 25. Modelación de OD y DBOCu en QUAL2K (muestreo 2)

Nota. Fuente: Elaboración propia.

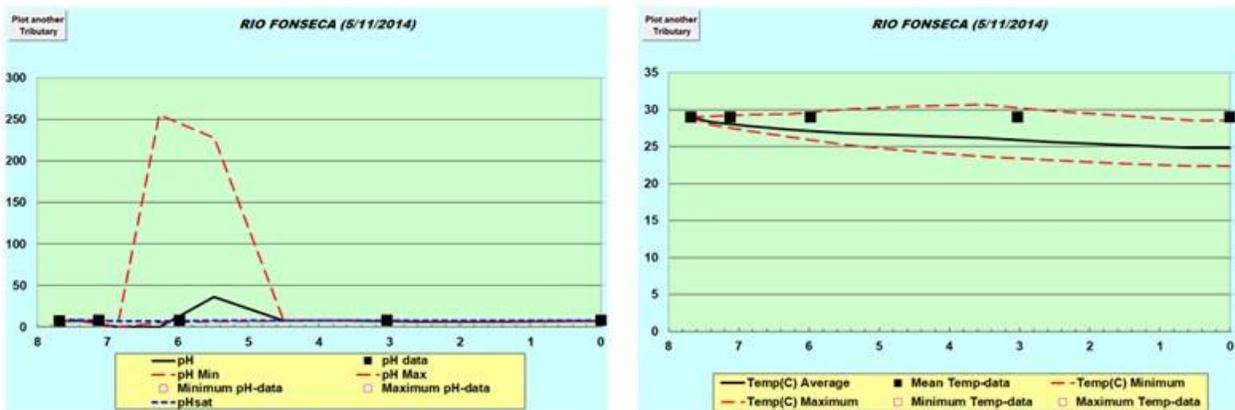


Figura 26. Modelación de pH y temperatura en QUAL2K (muestreo 3)

Nota. Fuente: Elaboración propia.

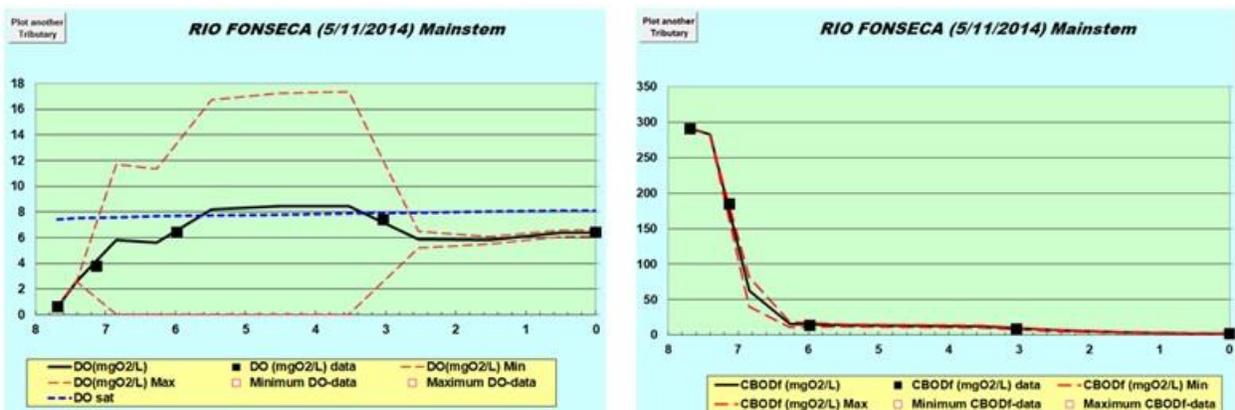


Figura 27. Modelación de OD y DBOCu en QUAL2K (muestreo 3)

Nota. Fuente: Elaboración propia.

Tabla 32. Constantes Kd y Kr resultantes de simulación QUAL2K

Tramo	Fecha	Kd(20°C)	Kr(20°C)
Muestreo 1			
R1 - R2		15.50	360.00
R2 - R4	30/03/14	45.20	290.00
R4 - R5		8.05	13.20
Muestreo 2			
R1 - R2		15.50	410.00
R2 - R4	06/04/14	45.20	425.00
R4 - R5		8.05	50.00
Muestreo 3			
R1 - R2		1.00	68.00
R2 - R3	11/05/14	145.00	315.00
R3 - R4		2.50	435.00
R1 - R2		13.30	25.00

Nota. Fuente: Elaboración propia.

De las simulaciones realizadas en QUAL2K se desprende que respecto a la DBOCu y OD, los modelos pueden calibrarse de forma que representen adecuadamente lo observado, sin embargo las constantes Kd y Kr obtenidas no se relacionan necesariamente con las de la simulación matemática con la ecuación de Streeter-Phelps. En esta situación debe considerarse que el modelo de Streeter-Phelps fue una punta de lanza y ha sido expandido desde su creación para incluir en el análisis de DBOCu y OD, las variables atmosféricas y la sinergia de diversos factores como la radiación, la sedimentación y la fotosíntesis, siendo todas estas relaciones consideradas en la modelación de softwares como el QUAL2K.

En este sentido cabe destacar que para llegar a modelar contaminantes en QUAL2K de forma confiable, es necesario tener velocidades de reacción calibradas dentro del programa, contándose especialmente con los cambios hidráulicos a lo largo del cauce estudiado y aforos en las estaciones muestreadas, además de datos meteorológicos confiables del sitios, de forma que se permita la obtención de parámetros aproximados a lo que realmente ocurre en la corriente.

9.7. Modelación del decaimiento bacteriano

El decaimiento bacteriano se ha analizado de forma tradicional, a través de la Ley de Chick. Se ha decidido no comparar datos con QUAL2K ya que el software no permite manipular velocidades de reacción por tramos y dados los diversos comportamientos de las coliformes entre tramos de estudio no se logra una modelación adecuada. El software además considera el efecto de la fotosíntesis y sedimentación, factores que no han sido analizados en este estudio.

En la Tabla 33 a continuación se presenta el análisis de las tasas de decaimiento bacteriano para coliformes fecales, considerando la velocidad aforada de 0.25 m/s.

Tabla 33. Decaimiento bacteriano (coliformes totales)

Tramo	Caudal (m ³ /s)	X (m)	Vel. (m/s)	Tr (d)	No (NMP/100mL)	N (NMP/100mL)	Tprom. (°C)	K _{b20°C} (d ⁻¹)	K _{bT} (d ⁻¹)	Extinción bact. (%)
Muestreo 1 (Velocidad 0.25 m/s)										
R1 - R2	0.223	555	0.25	0.0257	1.60E+06	1.60E+06	26.70	0.000	0.000	0.0
R2 - R4	0.223	4,094	0.25	0.1895	1.60E+06	9.20E+03	26.60	17.414	27.217	99.43
R4 - R5	0.223	3,033	0.25	0.1404	9.20E+03	1.40E+04	26.45	-1.933	-2.991	-52.2
Muestreo 2 (Velocidad 0.25 m/s)										
R1 - R2	0.223	555	0.25	0.0257	9.20E+06	9.20E+06	27.70	0.000	0.000	0.0
R2 - R4	0.223	4,094	0.25	0.1895	9.20E+06	1.70E+04	27.90	19.457	33.205	99.8
R4 - R5	0.223	3,033	0.25	0.1404	1.70E+04	1.60E+04	28.60	0.241	0.431	5.9

Nota. Fuente: Elaboración propia.

Como se observa, los muestreos 1 y 2 presentan una marcada tendencia en cuanto a valores de coliformes (tanto totales como fecales). Se presentan además comportamientos irregulares entre tramos y situaciones particulares observadas en los sitios de estudio.

El tramo R1-R2 presenta el mayor grado de contaminación bacteriana (zona más contaminada en general). Debido a ser el tramo con la ribera más accesible a los pobladores, se constató además la existencia a pocos metros de asentamientos humanos (La Bombilla y Paso de Lajas), los cuales no cuentan con conexión de alcantarillado sanitario. En esta zona, además de la descarga puntual de la PTAR de Boaco, hay descargas contaminantes dispersas y continuas hacia la corriente, evidenciado en una tasa de decaimiento casi nula en este tramo.

En el tramo R2-R3, a diferencia del anterior, se identificaron zonas de más difícil acceso al río, recibiendo menor contaminación hacia la corriente. Esto se infiere en los resultados de la Tabla 28, presentándose valores de K_b entre 6 y 8 d^{-1} , los cuales son más elevados que los sugeridos en bibliografía. Sin embargo, se destaca que dicha bibliografía referencia a valores de mayores caudales en ríos. Además los valores de los tramos R2-R3 son los que más se asemejan a las mediciones puntuales mencionadas por Gámez en el Río Grande de Matagalpa, producto de muestreos del año 1997 en el sitio.

En el tramo R3-R4, igualmente se observaron zonas de difícil acceso, rodeadas en muchos casos de terrenos baldíos. En este tramo se observaron inclusive valores superiores en cuanto a la tasa K_b (entre 17.3-21.6 d^{-1}), obteniéndose porcentajes excelentes de extinción de patógenos, cercanos en todos los casos al 99% de eficiencia.

En el caso del tramo R4-R5, en el primer muestreo ocurre una recontaminación por patógenos y en el segundo muestreo ocurre un decaimiento bastante deficiente (tasas de aprox. 0.2 d^{-1} con extinción deficiente de apenas un 5%).

Es de mencionar que en esta zona se encuentran las comunidades de El Quebracho y El Cascabel, con un buen acceso hasta el cauce del río. En este tramo además, el agua ya se percibe clara por la población, lo que ya les facilita realizar distintas actividades de aseo como bañarse, lavar ropa, carros, etc. Estas actividades propician un comportamiento irregular de los patógenos, de forma que para predecir este parámetro en este tramo sería necesario un monitoreo más extendido para estimar eficientemente los valores críticos.

Adicional a lo ya expuesto, cabe destacar que mediante un análisis macro de la extinción de coliformes en el tramo estudiado, a partir de 0+000 hasta 7+682, se identifica una remoción del 99.1%. Considerando la velocidad de 0.25 m/s, esto se logra en un período de 8.5 horas, lo que es excepcional considerando los tiempos de retención hidráulica para unidades que remueven hasta un 99% de coliformes: 3-7 días para los biofiltros de flujo horizontal (Proyecto Astec, 2005) y superiores a 5 días para lagunas de estabilización (Guías técnicas ENACAL).

X. CONCLUSIONES

1. La principal fuente de contaminación por materia orgánica identificada en el Río Fonseca, es el vertido de aguas residuales domésticas, originado tanto desde el efluente de la planta de tratamiento de la ciudad de Boaco, como de las aguas crudas que llegan desde cauces hasta la ribera del Río en el sector de La Bombilla.
2. En el tramo del río estudiado se observaron parámetros físicos eficientes para el proceso de autodepuración. El coeficiente de reaeración es gobernado por la velocidad de la corriente, con valores más altos en los primeros tramos de estudio y una corriente superficial (tirante promedio de 21 cm). En la consideración de este tirante tan bajo cabe destacar que el estudio se realizó en época seca y en la temporada más crítica para el río. Lo anterior, en conjunto con la turbulencia producida por el lecho rocoso en muchos tramos del cauce, conlleva a una alta transferencia de oxígeno desde la atmósfera hasta la masa de agua, estimando valores de K_r de hasta 435 d^{-1} , que se considera sumamente eficiente inclusive para ríos de montaña, de acuerdo a las referencias bibliográficas.
3. La corriente presenta una excelente capacidad natural de autodepuración en términos de DBO_5 , presentando para el tramo estudiado un porcentaje de remoción promedio del 99.6% en apenas 8.54 horas, considerado muy eficiente inclusive en procesos propios de plantas de tratamiento, pasando de valores de hasta 380 mg/L hasta 1.5 mg/L en la estación de El Cascabel.
4. De forma particular se observa una situación de recuperación de OD excelente en el primer tramo de estudio (R1-R2), en la cual el río pasa de condiciones anóxicas a una situación saludable por encima de los 6 mg/L de OD, permitiendo soportar la vida del ecosistema acuático. El OD como característica, permitió también identificar que la estación R1 se encuentra en una zona de descomposición activa, identificando a lo largo del cauce del río también zonas de recuperación y finalmente una zona de agua limpia hacia la última estación muestreada R5, en un recorrido de 7.682 km.

5. Es posible adoptar el software QUAL2K para la simulación de parámetros de calidad como DBO y OD en ríos locales, sin embargo el estudio ha demostrado que la confiabilidad del modelo generado está ligada a los datos meteorológicos del sitio, por lo que realizar un estudio sin estos datos, bajo recursos limitados conlleva a un modelo de predicción con mayor incertidumbre.

6. Considerando los datos de campo, se considera que para la última estación muestreada (R5), el Río Fonseca no alcanza a cumplir con los límites permisibles, en cuanto a coliformes totales, establecidos en la NTON 05 007-98, para ser catalogado como una fuente apta para consumo humano.

XI. RECOMENDACIONES

1. De forma fundamental, en cualquier plan de gestión integral del Río Fonseca, se requiere implementar un programa de educación ambiental permanente, que incluya la gestión de las aguas residuales y los desechos sólidos, dirigido a la población en general que sea capaz de transmitir de forma eficaz las consecuencias del continuo deterioro del río a la sociedad boaqueña, promoviendo el cuidado hacia el río con prácticas correctas de disposición de desechos y alternativas adecuadas para los sectores con limitado acceso al alcantarillado.
2. Para poder llegar a establecer parámetros de calidad de efluentes que desemboquen al Río Fonseca, se recomienda un monitoreo extendido, principalmente en las zonas cercanas a la descarga. Esta disponibilidad de datos de calidad de agua y de las condiciones ambientales asociadas, brindarían una herramienta a las autoridades para predecir el comportamiento de la corriente bajo diferentes cargas contaminantes y establecer valores límites adecuados para el río, asegurando su recuperación mediante la autodepuración.
3. El presente trabajo sirve como piloto para la realización de este tipo de estudios en ríos del país. Considerando los resultados obtenidos y los requerimientos encontrados en el proceso, para implementaciones futuras del QUAL2K en trabajos de investigación se recomienda la participación de INETER, considerando que la obtención de algunas variables meteorológicas solo se pueden recolectar con dispositivos especializados disponibles en este tipo de instituciones, garantizando datos de entrada más completos para el programa y una modelación más confiable del proceso natural en la corriente.

XII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alcaldía Municipal de Boaco (2006). *Plan ambiental del municipio de Boaco*. Boaco.
- Báez, R. & Martínez, R. (2015). *Diagnóstico socio-ambiental de aguas residuales emitidas en el II semestre del año 2014 por la planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR Boaco) Boaco, 2014*. Tesis de licenciatura no publicada, UNAN, Chontales, Nicaragua.
- Buitrago, N. (2005). *Evaluación del potencial hídrico del entorno de la ciudad de Boaco*. Tesis de maestría no publicada, Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua, Managua, Nicaragua.
- Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza [CATIE] (2008). *Diseño, elaboración y validación en forma participativa del plan de manejo integral de la subcuenca del Río Malacatoya*. Managua.
- Chapra, S. (2008). *Surface Water Quality Modeling*. Illinois: Waveland Press, Inc.
- Chapra, S.; Pelletier, G. & Tao, H. (2012). *QUAL2K: A modeling framework for simulating river and stream water quality*.
- China-UK WRDMAP (2010). *Advisory Note 1.5: Use of QUAL2K Water Quality Model in IWRM Planning*.
- Comisión Nacional del Agua [CONAGUA] (2015). *Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento. Diseño plantas de tratamiento de aguas residuales municipales: lagunas de estabilización*. México.
- Empresa Nicaragüense de Acueductos y Alcantarillados [ENACAL] (2006). *ABC sobre el recurso agua y su situación en Nicaragua*. Managua.
- Environmental Protection Agency [EPA] (s.f.). *Stream Water Quality Model (QUAL2K)*.
- Fundación Internacional para el Desafío Económico Global [FIDEG] (2012). *Caracterización de 15 municipios pobres de Nicaragua*.
- Gámez, S. (2004). *Apuntes de contaminación de aguas. Maestría en ciencias ambientales*. Managua: CIEMA-UNI.
- García, M. (2009). *Biología y geología*.
- Instituto Nicaragüense de Acueductos y Alcantarillados [INAA] (2000). *NTON 05 007-98. Normas para la clasificación de los recursos hídricos*.
- Instituto Nicaragüense de Acueductos y Alcantarillados [INAA] (1999). *NTON 09003 – 99. Normas para el diseño de sistemas de abastecimiento y potabilización de las aguas*.
- Instituto Nicaragüense de Fomento Municipal [INIFOM] (s.f.). *Ficha del municipio de Boaco*.

- Jiménez, M. (2008). *MUTC – Un modelo de transporte en ríos: Aplicación al Río Sinú*. Tesis de maestría no publicada, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia.
- Karia, G. & Christian, R. (2013). *Wastewater treatment. Concepts and design approach*. New Delhi: Prentice Hall.
- Martínez, A. (27 de enero de 2011). Escasez de agua en Boaco. *Diario La Prensa*, 7B. Managua, Nicaragua.
- Martínez, A. (14 de junio de 2013). Río Fonseca en riesgo. *Diario La Prensa*, 9A. Managua, Nicaragua.
- Mejía, E. & Rosas, G. (2016). *Cálculo de la velocidad media y el caudal con base en la velocidad superficial del agua en pequeñas corrientes*. Tesis de grado no publicada. Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá D.C., Colombia.
- Ministerio del Ambiente y los Recursos Naturales [MARENA] (s.f.). *Reglamento para los vertidos de aguas residuales a cuerpos receptores y alcantarillado sanitario*.
- Monte, R. (2013). *Metodología para evaluar la modificación de la capacidad de autodepuración de los ríos por efecto del cambio climático*. Tesis de doctorado no publicada. Universidad Nacional Autónoma de México, México D.F., México.
- Montelongo, R.; Gordillo, A.; Otazo, E.; Villagómez, J. Acevedo, O. & Prieto, F. (2008). Modelación de la calidad del agua del Río Tula, Estado de Hidalgo, México. *Dyna*, 154, 5-18.
- Pastora, D. (2010). *Evaluación de la fórmula de Manning en el Río Ostua*. Tesis de maestría no publicada. Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala., Guatemala.
- Presidencia de la República (2017). *Disposiciones para el vertido de aguas residuales*. Managua.
- Penn, M.; Pauer, J & Mihelcic, J. (2009). Biochemical oxygen demand – Volume 2. En A. Sabljic (Ed.), *Environmental and ecological chemistry* (pp. 278-297). Eolss Publishers.
- Red Interamericana de Academias de Ciencias [IANAS] (2012). *Diagnóstico del agua en las Américas*. México: Foro Consultivo Científico y Tecnológico [FCCyT].
- Ríos, S.; Agudelo, R. & Gutiérrez, L. (2017). Patógenos e indicadores microbiológicos de calidad de agua para consumo humano. *Facultad Nacional de Salud Pública*, 35, 236-247.
- Rodríguez, M. (29 de mayo de 2015). Aislados y en la pobreza. *Diario La Prensa*, 4A. Managua, Nicaragua.
- Santamaría, F. (2013). *Análisis simplificado de oxígeno disuelto en el Río Ubaté por el modelo QUAL2K*. Tesis de maestría no publicada, Escuela Colombiana de Ingeniería, Bogotá, Colombia.
- Sainz, J. (2007). *Tecnologías para la sostenibilidad. Procesos y operaciones unitarias en depuración de aguas residuales*. Madrid: Editorial Fundación EOI.

- Sampieri, R.; Fernández, C. & Baptista, M. (2010). *Metodología de la investigación*. (5ta Edición). México: McGraw Hill / Interamericana Editores S.A. de C.V.
- Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú [SENAMHI] (2011). *Guía de hidrometría: Estimación del caudal por el método de flotadores*. Lima.
- Suárez, J. (2008). *Calidad de aguas en ríos. Autodepuración*. Recuperado el 27 de julio de 2013 en: http://ceres.udc.es/Master_en_Ingenieria_del_Agua/master%20antiguo_antes%20del%202012/Segundo_Curso/Modelos_de_Calidad_de_Aguas/material%202010-2011/MCA_Tema_5__MODELOS_DE_CALIDAD_DE_AGUAS_EN_RÍOS.pdf
- Torres, M. (2009). *Estudio de los procesos de transporte y decaimiento de organismos patógenos en ríos de montaña colombianos. Río Teusacá, Río Subachoque*. Tesis de maestría no publicada, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia.
- Torres, F. (2009). *Desarrollo y aplicación de un índice de calidad de agua para ríos en Puerto Rico*. Tesis de maestría no publicada, Universidad de Puerto Rico, Mayagüez, Puerto Rico.
- Vélez, A. (2017). *Modelización de la calidad del agua en el segmento norte del Estero Macache del Cantón Quevedo, Provincia de los Ríos*. Tesis de ingeniería no publicada, Universidad Técnica Estatal del Quevedo, Quevedo, Ecuador.
- Vera, I. (2007). *Aplicación de técnica de optimización mediante algoritmos genéticos para calibración de modelo QUAL2K como una aproximación a la modelación de la calidad del agua de los principales ríos de la zona urbana de Bogotá D.C.* Bogotá.
- Villalobos, H. (2008). *Calibración del modelo matemático QUAL2K para el análisis de calidad del agua para el caso de un río específico en Costa Rica*. Tesis de licenciatura no publicada, Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica.

ANEXOS

ANEXO 1. Descripción de las variables más significativas en el estudio de la calidad del agua

A continuación se presenta una breve descripción de las variables más significativas en el estudio de la calidad del agua, presentada por Torres en su estudio de desarrollo y aplicación de índices de calidad de agua de 2009:

1. Coliformes fecales

El grupo de coliformes representa a especies bacterianas con características en común, relevantes como indicadores de contaminación en agua y alimentos, debido a que son más resistentes que las bacterias patógenas y en su mayoría son de origen fecal, por lo que suelen ser indicadores de contaminación por aguas residuales.

Estas bacterias se encuentran principalmente en el intestino de humanos y animales de sangre caliente, siendo introducidas al medio a través de las heces. Por esto, se deduce que la mayoría de las heces en el medio son de origen fecal. Sin embargo, las coliformes también se encuentran en la naturaleza, en especial en suelos, semillas y vegetales.

2. Oxígeno disuelto (OD)

Es la cantidad de oxígeno presente en el agua. Aunque no es un contaminante, suele indicar cuan contaminada está el agua y cuanto sustento puede brindar a la vida animal y vegetal, por tanto el OD es una de las variables empleadas como indicador general de la calidad de un sistema acuático.

En cierta medida, el nivel de OD determina el tipo de procesos (aeróbicos o anaeróbicos), que tienen lugar durante la oxidación o reducción de material introducido naturalmente o antrópicamente en un cuerpo de agua, entre los que se encuentran la reaireación, la oxidación de materia orgánica (DBO), la nitrificación, la respiración de algas, entre otros.

Niveles de OD más altos indican mejor calidad de agua mientras que niveles demasiado bajos no permiten la supervivencia de peces y otros microorganismos, además de aumentar malos olores y sabores como consecuencia de la descomposición anaerobia.

La cantidad de oxígeno en el agua en gran medida proviene del oxígeno del aire, del producto de la fotosíntesis de las plantas acuática y de las turbulencias en las corrientes que atrapa oxígeno bajo el agua. Además se puede ver afectada por las temperaturas, ya que el agua fría guarda más oxígeno que la caliente.

3. pH

El pH es un indicador de acidez o basicidad de un compuesto, definido como la concentración del ion hidrógeno en el agua. El pH puede variar entre 0 y 14, catalogándose como básicos los valores por encima de 7 y ácidos los valores debajo del 7. La acidez es una de las propiedades más importantes del agua para la disolución de todos los iones.

El pH ayuda a definir la capacidad de autodepuración de la corriente y por ende su contenido de MO, además de otros contaminantes. Es importante para los ecosistemas acuáticos, al ser relevante en ciertos procesos químicos y biológicos.

4. Nitrato

El nitrato (NO_3) es un compuesto inorgánico que usualmente no es peligroso a menos que sea reducido a nitrito (NO_2). La contaminación por nitratos en aguas superficiales usualmente proviene de fuentes no puntuales, asociándose a actividades agrícolas y ganaderas. En las aguas subterráneas en cambio, se asocia con el nitrógeno no removido proveniente de los sistemas de tratamiento con disposición por infiltración. Los nitratos son además indicadores de posible presencia de contaminantes más peligrosos como bacterias o pesticidas.

5. Fósforo total

El fósforo es un nutriente requerido por todos los microorganismos para sus procesos básicos de vida, es además un elemento natural que puede encontrarse en la MO. También puede encontrarse en altas concentraciones en áreas con actividad humana, debido a su alto uso en fertilizantes y químicos, lo que puede llevar a la eutrofización de los cuerpos de agua.

El fósforo total como parámetro es una medida de todas las formas de fósforo existente en el agua, incluyendo las disueltas o las partículas que incluyen componentes como ortofosfatos, polifosfatos y fósforo orgánico. El parámetro se determina convirtiendo todas estas formas en ortofosfatos que si se pueden obtener por análisis químicos.

6. Demanda bioquímica de Oxígeno (DBO5)

La DBO es un parámetro de estudio en la calidad de aguas municipales, industriales y residuales. Esta mide la MO biodegradable, a través del requerimiento de oxígeno que ocupan los microorganismos para degradar tal materia. Tiene una gran aplicación en los estándares de calidad de la mayoría de países, para regular las descargas de efluentes domésticos e industriales y sus efectos en los cuerpos receptores.

A medida que aumenta la MO en el agua, más oxígeno emplean los microorganismos para degradarla, lo que brinda un criterio con límites cuantitativos que ayudan a decidir si se requiere o no un tratamiento previo, para la descarga en determinado cuerpo receptor. Usualmente se utiliza el resultado de la prueba a los 5 días (DBO₅), pudiendo variar por la temperatura, la clase y cantidad de microorganismos y nutrientes presentes. Cabe destacar que la regulación de este parámetro indirectamente permite asegurar también el cumplimiento del estándar de OD en el cuerpo receptor.

7. Nitrógeno de amonio

El nitrógeno de amonio es una porción del nitrógeno total, el cual incluye además nitrógeno orgánico, nitrito y nitrato. En los análisis regulares, se suele determinar el nitrógeno total Kjeldahl, que incluye el nitrógeno de amonio y el orgánico. A pesar de ser nutrientes esenciales para el crecimiento, los compuestos de nitrógeno en exceso pueden llevar a la eutrofización de los cuerpos de agua.

La eutrofización es un enriquecimiento de nutrientes que causa un crecimiento excesivo de plantas acuáticas e incrementan la actividad de microorganismos anaerobios, propiciando un descenso de los niveles de OD.

8. Sedimentos suspendidos

Las sustancias pueden existir en el agua ya sea de forma disuelta, suspendida o como coloide. Los sólidos suspendidos son partículas suficientemente grandes como para permanecer en suspensión en el agua o ser removidas por simple filtración. Aunque no se presenta un rango para estos sólidos en las fuentes de agua, se considera que los sólidos provenientes de fuentes de aguas usadas no deben ocasionar asentamientos o perjudicar los usos existentes o designados de los cuerpos de agua.

9. Mercurio

El mercurio es un metal que se encuentra en forma natural en el medio ambiente. A altas temperaturas se transforma en un gas tóxico, inodoro e incoloro. Puede transferirse al ser humano a través de las cadenas alimenticias, por ejemplo a través del consumo de peces o consumo de vegetales o cultivos en que se han aplicado aerosoles. Los principales efectos causados por el mercurio en el ser humano son: daños al sistema nervioso, funciones del cerebro, ADN y cromosomas, reacciones alérgicas, irritaciones de la piel, cansancio y dolor de cabeza, efectos negativos en la reproducción, defectos de nacimiento e incluso abortos.

10.Plomo

El plomo es un metal inorgánico que pertenece a un grupo de tóxicos acumulativos bioadaptables, siendo este el mecanismo por el cual los residuos de estos elementos se introducen en la cadena alimenticia que va del suelo a los vegetales, a los animales y al hombre, teniendo efectos muy serios sobre todo en bebés o en niños en formación.

11.Temperatura

La temperatura es una medida de calor o energía térmica de las partículas en una sustancia. Tiene gran importancia dado que influye en los microorganismos que requieren determinadas condiciones para subsistir, además afecta el comportamiento de otros parámetros como el pH, OD, conductividad eléctrica y otras variables físico-químicas.

Específicamente para el OD, a medida que aumenta la temperatura se produce la disminución de la solubilidad de oxígeno proveniente de la atmósfera. Por esto, las condiciones críticas en cuanto a deficiencia de oxígeno, ocurren con mayor frecuencia en períodos de verano (Jiménez, 2008).

Además debe de considerarse que con temperaturas elevadas disminuye la solubilidad de gases como el oxígeno, aumentando a su vez reacciones del metabolismo que aumentan la putrefacción.

ANEXO 2. Operacionalización de variables de estudio

Tabla A.1. Operacionalización de variables de estudio

Variable	Definición operacional	Unidades	Norma de referencia	Escala permisible
Caudal del río	Volumen de agua que circula por un cauce en un área y tiempo dados	m ³ /s	---	Variable
Coliformes totales	Microorganismos de origen entérico que indican contaminación de aguas y alimentos	NMP/100mL	NTON 05 007-98	Promedio mensual menor de 2000 NMP por cada 100 ml (aguas Tipo 1A) Promedio mensual menor de 10000 NMP por cada 100 ml (aguas Tipo 1B)
Coliformes fecales	Subgrupo de las coliformes totales, encontradas en el intestino de seres humanos y animales de sangre caliente	NMP/100mL	---	---
Demanda bioquímica de oxígeno (DBO)	Cantidad de materia disponible para el consumo de medios biológicos	mg/L	NTON 05 007-98	< 2 mg/L (aguas Tipo 1A) < 4 mg/L (aguas Tipo 1B)
Oxígeno disuelto	Cantidad de oxígeno disuelto en el agua	mg/L		> 4 mg/L (aguas Tipo 1A) > 4 mg/L (aguas Tipo 1B)
pH	Medida de acidez o basicidad de una solución acuosa	Adimensional	NTON 05 007-98	6 - 8.5 (aguas Tipo 1A) 6 - 8.5 (aguas Tipo 1B)
Temperatura**	Percepción medible de caliente, tibio o frío	°C	NTON 09003-99	18 - 30

Nota. Fuente: Elaboración propia.

ANEXO 3. Relación de aforos usando Manning

A continuación se presenta la información comparativa de los aforos realizados en el río Fonseca (mediante flotadores y con molinete). A pesar de que existe mayor precisión usando el molinete para medir la velocidad, se puede apreciar que no hay una variación significativa si se suponen las mismas condiciones geométricas del cauce y puede establecerse una relación razonable entre ambos aforos de verano e invierno mediante la ecuación de Manning.

Tabla A.2. Datos de aforo 2 con molinete (junio 2017)

Sección	Subsecc.	H1 (m)	H2 (m)	B (m)	A (m ²)	V ₁ (m/s)	V ₂ (m/s)	V _m (m/s)	Q (m ³ /s)	P _m (m)
1	1	0.00	0.15	0.60	0.05	---	0.30	0.30	0.01	0.62
1	2	0.15	0.18	0.60	0.10	0.30	0.40	0.35	0.03	0.60
1	3	0.18	0.25	0.60	0.13	0.40	0.30	0.35	0.05	0.60
1	4	0.25	0.30	0.60	0.17	0.30	0.40	0.35	0.06	0.60
1	5	0.30	0.30	0.60	0.18	0.40	0.40	0.40	0.07	0.60
1	6	0.30	0.27	0.60	0.17	0.40	0.60	0.50	0.09	0.60
1	7	0.27	0.25	0.60	0.16	0.60	0.80	0.70	0.11	0.60
1	8	0.25	0.25	0.60	0.15	0.80	0.90	0.85	0.13	0.60
1	9	0.25	0.18	0.60	0.13	0.90	0.80	0.85	0.11	0.60
1	10	0.18	0.18	0.60	0.11	0.80	0.70	0.75	0.08	0.60
1	11	0.18	0.00	0.40	0.04	0.70	---	0.70	0.03	0.44
					1.37				0.76	6.47
2	1	0.00	0.30	0.60	0.09	---	0.10	0.10	0.01	0.64
2	2	0.30	0.40	0.60	0.21	0.10	0.10	0.10	0.02	0.60
2	3	0.40	0.42	0.60	0.25	0.10	0.20	0.15	0.04	0.61
2	4	0.42	0.42	0.60	0.25	0.20	0.30	0.25	0.06	0.60
2	5	0.42	0.50	0.60	0.28	0.30	0.20	0.25	0.07	0.61
2	6	0.50	0.50	0.60	0.30	0.20	0.30	0.25	0.08	0.60
2	7	0.50	0.52	0.60	0.31	0.30	0.30	0.30	0.09	0.60
2	8	0.52	0.48	0.60	0.30	0.30	0.30	0.30	0.09	0.60
2	9	0.48	0.45	0.60	0.28	0.30	0.20	0.25	0.07	0.60
2	10	0.45	0.40	0.60	0.26	0.20	0.30	0.25	0.06	0.61
2	11	0.40	0.36	0.60	0.23	0.30	0.30	0.30	0.07	0.60
2	12	0.36	0.36	0.60	0.22	0.30	0.20	0.25	0.05	0.60
2	13	0.36	0.24	0.60	0.18	0.20	0.20	0.20	0.04	0.61
2	14	0.24	0.00	0.70	0.08	0.20	---	0.20	0.02	0.74
					3.22				0.76	8.63

Nota. Fuente: Elaboración propia.

Tabla A.3. Comprobación con Manning Aforo 1 (Flotadores)

SECCIÓN 1		SECCIÓN 2	
Sitio	R5	Sitio	R5
Fecha	11-May-14	Fecha	11-May-14
Bsección (m)	3.40	Bsección (m)	4.90
Asección (m²)	0.33	Asección (m²)	1.45
Pm (m)	3.50	Pm (m)	5.45
Rh (m)	0.10	Rh (m)	0.27
Comprobación Ec. Continuidad			
Dist/secc. (m)		6.60	
Am (m²)		0.89	
Vm (m/s)		0.25	
Q (m³/s)		0.22	
Comprobación Ec. Manning			
n		0.05	
Am (m²)		0.89	
Rm (m)		0.18	
S tramo (m/m)		0.0015	
Q (m³/s)		0.22	

Nota. Fuente: Elaboración propia.

Tabla A.4. Comprobación con Manning Aforo 2 (Molinete Global Water FP211)

SECCIÓN 1		SECCIÓN 2	
Sitio	R5	Sitio	R5
Fecha	11-Jun-17	Fecha	11-Jun-17
Bsección (m)	6.40	Bsección (m)	8.50
Asección (m²)	1.37	Asección (m²)	3.22
Pm (m)	6.47	Pm (m)	8.63
Rh (m)	0.21	Rh (m)	0.37
Comprobación Ec. Manning			
Dist/secc. (m)		6.60	
Am (m²)		2.30	
Q (m³/s)		0.76	
Vm (m/s)		0.33	
COMPROBACIÓN EC. MANNING			
n		0.05	
Am (m²)		2.30	
Rm (m)		0.29	
S tramo (m/m)		0.0015	
Q (m³/s)		0.78	

Nota. Fuente: Elaboración propia.

ANEXO 4. Resultados de análisis de laboratorio



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
Programa de Investigación Estudios Nacionales y Servicios Ambientales



LABORATORIO AMBIENTAL

CERTIFICADO DE ENSAYOS

LA-AAR1404-0032

EMPRESA / PROYECTO / PERSONA		DIRECCIÓN: Calle, Municipio; Comunidad; Departamento		TELÉFONO
Tesis Linda Jenifer Cerda Urbina.		Rotonda Bello Horizonte 1c. Al Norte, 1c. Este, 2 1/2 Norte.		8959-7654
ATENCIÓN:		CARGO	EMAIL	Célular
Ing. Linda Jenifer Cerda Urbina.		Estudiante Maestría	NR	8959-7654
FECHAS DE PROCESAMIENTO DE MUESTRA EN EL LABORATORIO				FECHA DE EMISIÓN DE CERTIFICADO DE ANALISIS
CADENA DE CUSTODIA		NUMERO DE MUESTRAS		
INGRESO:	INICIO DE ANALISIS:	FINAL DE ANALISIS:		
31/03/2014	31/03/2014	11/04/2014	29/04/2014	1748
Fecha y Hora de Muestreo		30/03/2014, 10:10 AM	30/03/2014, 11:15 AM	Rango o valor máximo permisible
Muestreado por		Ing. Jenifer Cerda, Ing. Sergio Gamez		
Supervisor de Muestreo en Campo		NR		
Fuente		La Bombilla	Paso de Lajas	
Tipo de Muestra		Agua Superficial		
Observaciones de Ubicación		NR	NR	
Coordenadas		NR	NR	
Codificación PIENSA		LA-1403-0170	LA-1403-0171	Art. No. *
METODO SM // EPA	ENSAYO REALIZADO PARAMETRO	Unidad	VALOR DE CONCENTRACION	
			La Bombilla	Paso de Lajas
4500-O	Oxígeno Disuelto	mg/l	< 0.1	6.40
5510-B	Demanda Bioquímica de Oxígeno	mg/l	380.00	246.66
				NE
				NE

LEYENDA DE REPORTE DE RESULTADOS: Se reporta por parámetro de acuerdo a la Unidad que se indica en la columna y línea respectiva.
 s al Límite de Detección que se especifica por parámetro NE= No especificada en la Norma NR= No Reporta.
 SM: Metodo Utilizado del Standard Methods 21st edition, 2005. *Decreto 33-95 EPA = Environmental Protection Agency

OBSERVACIONES: La muestra fue recolectada, custodiada e ingresada al laboratorio por el cliente.

Los resultados reportados corresponden a los ensayos solicitados por el cliente

PhD. Leandro Páramo Aguilera
Coordinador Técnico Laboratorios Ambientales PIENSA-UNI

Declaramos que este informe de resultados será de uso exclusivo del cliente, el laboratorio garantiza la confidencialidad e imparcialidad del informe.

000080

Teléfono: 2278-1462 / 2270-5613 / 2270-1517 • Atención al Cliente: 8152 7314, Lab.: 8100 0421
E-mail: atencion.cliente@piensa.uni.edu.ni • Web: www.piensa.uni.edu.ni • Managua, Nicaragua.

Figura A.1. Resultados muestreo 1: estaciones R1 & R2 (OD & DBO)

Nota. Fuente: Resultados Laboratorio PIENSA.



LABORATORIO AMBIENTAL

CERTIFICADO DE ENSAYOS

LA-AAR1404-0032

EMPRESA / PROYECTO / PERSONA			DIRECCIÓN: Calle, Municipio; Comunidad; Departamento		TELÉFONO	
Tesis Linda Jenifer Cerda Urbina.			Rotonda Bello Horizonte 1c. Al Norte, 1c. Este, 2 1/2 Norte.		8959-7654	
ATENCIÓN:		CARGO	EMAIL		Célular	
Ing. Linda Jenifer Cerda Urbina.		Estudiante Maestría	NR		8959-7654	
FECHAS DE PROCESAMIENTO DE MUESTRA EN EL LABORATORIO						
INGRESO:	INICIO DE ANALISIS:	FINAL DE ANALISIS:	FECHA DE EMISION DE CERTIFICADO DE ANALISIS	CADENA DE CUSTODIA	NUMERO DE MUESTRAS	
31/03/2014	31/03/2014	11/04/2014	29/04/2014	1748	Cuatro (4)	
Fecha y Hora de Muestreo			30/03/2014, 1:30 PM	30/03/2014, 3:30 PM	Rango o valor máximo permisible	
Muestreado por			Ing. Jenifer Cerda, Ing. Sergio Gamez			
Supervisor de Muestreo en Campo			NR			
Fuente			El Quebracho	El Cascabel		
Tipo de Muestra			Agua Superficial			
Observaciones de Ubicación			NR	NR		
Coordenadas			NR	NR		
Codificación PIENSA			LA-1403-0172	LA-1403-0173		
METODO SM // EPA	ENSAYO REALIZADO PARAMETRO	Unidad	VALOR DE CONCENTRACION			Art. No. *
			El Quebracho	El Cascabel		
4500-O	Oxígeno Disuelto	mg/l	6.60	6.40	NE	
5510-B	Demanda Bioquímica de Oxígeno	mg/l	2.70	1.55	NE	

LEYENDA DE REPORTE DE RESULTADOS: Se reporta por parámetro de acuerdo a la Unidad que se indica en la columna y línea respectiva. s al Limite de Detección que se especifica por parámetro NE= No especificada en la Norma NR= No Reporta.
SM: Metodo Utilizado del Standard Methods 21st edition, 2005. *Decreto 33-95 EPA = Environmental Protection Agency

OBSERVACIONES: La muestra fue recolectada, custodiada e ingresada al laboratorio por el cliente.

Los resultados reportados corresponden a los ensayos solicitados por el cliente

PhD. Leandro Páramo Aguilera
Coordinador Técnico Laboratorios Ambientales PIENSA-UNI

Declaramos que este informe de resultados será de uso exclusivo del cliente, el laboratorio garantiza la confidencialidad e imparcialidad del informe.

1000802

Teléfono: 2278-1462 / 2270-5613 / 2270-1517 • Atención al Cliente: 8152 7314, Lab.: 8100 0421
E-mail: atencion.cliente@piensa.uni.edu.ni • Web: www.piensa.uni.edu.ni • Managua, Nicaragua.

Figura A.2. Resultados muestreo 1: estaciones R4 & R5 (OD & DBO)

Nota. Fuente: Resultados Laboratorio PIENSA.



LABORATORIOS AMBIENTALES

EMPRESA / PROYECTO / PERSONA				DIRECCIÓN		MB1403-0031	
Tesis Jennifer Cerda				Rotonda Bello Horizonte, 1c norte, 1 c este, 2½ c norte		TELEFONO	
ATENCIÓN				CARGO		EMAIL	
Ing. Jennifer Cerda				Estudiante MIA		jenjer55@gmail.com	
FECHAS DE PROCESAMIENTO DE MUESTRA EN EL LABORATORIO				FECHA DE EMISION DE CERTIFICADO DE ANALISIS		CADENA CUSTODIA	
INGRESO		INICIO DE ANALISIS		FINAL DE ANALISIS		NUMERO DE MUESTRAS	
31/03/2014		31/03/2014		04/04/2014		04/04/2014	
Fecha y Hora de Muestreo				30/03/14; 10:50 AM		1748	
Muestreado por				Jennifer Cerda/Ing. Sergio Gámez		Rango o valor máximo permisible	
Supervisor de Muestreo en Campo				NR			
Fuente				M1.1			
Tipo de muestra				Agua superficial			
Observaciones de Ubicación				Río Fonseca, Boaco			
Coordenadas				NR			
Codificación PIENSA				LA-1403-0170		Norma CAPRE*	
METODO SM // EPA	ENSAYO REALIZADO PARAMETRO		Unidad	VALOR DE CONCENTRACION			
9221B	Coliforme total		NMP/100ml	>1.6*10 ⁶		Neg	
9221E	Coliforme fecal		NMP/100ml	>1.6*10 ⁶		Neg	

LEYENDA DE REPORTE DE RESULTADOS: Se reporta por parámetro de acuerdo a la Unidad que se indica en la columna y línea respectiva.
 <: menor al Límite de Detección que se especifica por parámetro. NE= No especificada en la Norma, NR= No Reporta, Neg= Negativo
 Metodos, Normas y/o Decreto empleados: SM = Standard Methods, 21th.2005 EPA = Environmental Protection Agency
 * Norma regional de calidad del agua para consumo humano

Los resultados reportados corresponden a los análisis solicitados por el cliente

P.D. Leandro Páramo Aguilera
Coordinador Técnico Laboratorios Ambientales PIENSA-UNI

Declaramos que este informe de resultados será de uso exclusivo del cliente, el laboratorio garantiza la confidencialidad e imparcialidad del informe.

0000504
FPT-5.10-01

Teléfono: 2278-1462 / 2270-5613 / 2270-1517 • Atención al Cliente: 8152 7314, Lab.: 8100 0421
 E-mail: atencion.cliente@piensa.uni.edu.ni • Web: www.piensa.uni.edu.ni • Managua, Nicaragua.

Pág. 1 de 1

Figura A.3. Resultados muestreo 1: estación R1 (CT & CF)

Nota. Fuente: Resultados Laboratorio PIENSA.



LABORATORIOS AMBIENTALES

CERTIFICADO DE ENSAYOS					MB1403-0031
EMPRESA / PROYECTO / PERSONA			DIRECCIÓN		TELEFONO
Tesis Jennifer Cerda			Rotonda Bello Horizonte, 1c norte, 1 c este, 2½ c norte		89597654
ATENCIÓN			CARGO	EMAIL	CELULAR
Ing. Jennifer Cerda			Estudiante MIA	jenjer55@gmail.com	89597654
FECHAS DE PROCESAMIENTO DE MUESTRA EN EL LABORATORIO					FECHA DE EMISION DE CERTIFICADO DE ANALISIS
INGRESO	INICIO DE ANALISIS	FINAL DE ANALISIS	CADENA CUSTODIA		
31/03/2014	31/03/2014	04/04/2014	04/04/2014	1748	NUMERO DE MUESTRAS
Fecha y Hora de Muestreo			30/03/14; 3:30 PM		
Muestreado por			Jennifer Cerda/Ing. Sergio Gámez		
Supervisor de Muestreo en Campo			NR		
Fuente			M1.4		
Tipo de muestra			Agua superficial		
Observaciones de Ubicación			Río Fonseca, Boaco		
Coordenadas			NR		
Codificación PIENSA			LA-1403-0173		
METODO SM // EPA	ENSAYO REALIZADO PARAMETRO	Unidad	VALOR DE CONCENTRACION		
9221B	Coliforme total	NMP/100ml	>1.6*10 ⁸		
9221E	Coliforme fecal	NMP/100ml	>1.6*10 ⁶		
					Rango o valor máximo permisible
					Norma CAPRE*
					Neg
					Neg

LEYENDA DE REPORTE DE RESULTADOS: Se reporta por parámetro de acuerdo a la Unidad que se indica en la columna y línea respectiva.

<: menor al Límite de Detección que se especifica por parámetro. NE= No especificada en la Norma, NR= No Reporta, Neg= Negativo

Metodos, Normas y/o Decreto empleados: SM = Standard Methods, 21th.2005 EPA = Environmental Protection Agency

* Norma regional de calidad del agua para consumo humano

Los resultados reportados corresponden a los ensayos solicitados por el cliente

LABORATORIOS AMBIENTALES
COORDINACIÓN
PhD. Leandro Parame Aguilera
Coordinador Técnico Laboratorios Ambientales PIENSA-UNI

Declaramos que este informe de resultados será de uso exclusivo del cliente, el laboratorio garantiza la confidencialidad e imparcialidad del informe.

0000007
FPT-5.10-01

Teléfono: 2278-1462 / 2270-5613 / 2270-1517 • Atención al Cliente: 8152 7314, Lab.: 8100 0421
E-mail: atencion.cliente@piensa.uni.edu.ni • Web: www.piensa.uni.edu.ni • Managua, Nicaragua.

Pág. 1 de 1

Figura A.4. Resultados muestreo 1: estación R2 (CT & CF)

Nota. Fuente: Resultados Laboratorio PIENSA.



LABORATORIOS AMBIENTALES

CERTIFICADO DE ENSAYOS				MB1403-0031	
EMPRESA / PROYECTO / PERSONA			DIRECCIÓN		TELÉFONO
Tesis Jennifer Cerda			Rotonda Bello Horizonte, 1c norte, 1 c este, 2½ c norte		89597654
ATENCIÓN			CARGO	EMAIL	CELULAR
Ing. Jennifer Cerda			Estudiante MIA	jenier55@gmail.com	89597654
FECHAS DE PROCESAMIENTO DE MUESTRA EN EL LABORATORIO					
INGRESO	INICIO DE ANALISIS	FINAL DE ANALISIS	FECHA DE EMISION DE CERTIFICADO DE ANALISIS	CADENA CUSTODIA	NUMERO DE MUESTRAS
31/03/2014	31/03/2014	04/04/2014	04/04/2014	1748	Una (1)
Fecha y Hora de Muestreo			30/03/14; 11:15 AM		
Muestreado por			Jennifer Cerda/Ing. Sergio Gámez		
Supervisor de Muestreo en Campo			NR		
Fuente			M1.2		
Tipo de muestra			Agua superficial		
Observaciones de Ubicación			Río Fonseca, Boaco		
Coordenadas			NR		
Codificación PIENSA			LA-1403-0171		
METODO SM // EPA	ENSAYO REALIZADO PARAMETRO	Unidad	VALOR DE CONCENTRACION		Norma CAPRE*
9221B	Coliforme total	NMP/100ml	9.2*10 ³		Neg
9221E	Coliforme fecal	NMP/100ml	7.0*10 ²		Neg

LEYENDA DE REPORTE DE RESULTADOS: Se reporta por parámetro de acuerdo a la Unidad que se indica en la columna y línea respectiva.

<: menor al Límite de Detección que se especifica por parámetro. NE= No especificada en la Norma, NR= No Reporta, Neg= Negativo

Metodos, Normas y/o Decreto empleados: SM = Standard Methods, 21th.2005 EPA = Environmental Protection Agency

* Norma regional de calidad del agua para consumo humano

Los resultados reportados corresponden a los ensayos solicitados por el cliente

(Handwritten signature)
COORDINACION TECNICA
PhD. Leandro Páramo Aguilera
Coordinador Técnico Laboratorios Ambientales PIENSA-UNI

Declaramos que este informe de resultados será de uso exclusivo del cliente, el laboratorio garantiza la confidencialidad e imparcialidad del informe.

000905
FPT-5.10-01

Teléfono: 2278-1462 / 2270-5613 / 2270-1517 • Atención al Cliente: 8152 7314, Lab.: 8100 0421
E-mail: atencion.cliente@piensa.uni.edu.ni • Web: www.piensa.uni.edu.ni • Managua, Nicaragua.

Pág. 1 de 1

Figura A.5. Resultados muestreo 1: estación R4 (CT & CF)

Nota. Fuente: Resultados Laboratorio PIENSA.



LABORATORIOS AMBIENTALES

CERTIFICADO DE ENSAYOS					MB1403-0031
EMPRESA / PROYECTO / PERSONA			DIRECCIÓN		TELÉFONO
Tesis Jennifer Cerda			Rotonda Bello Horizonte, 1c norte, 1 c este, 2½ c norte		89597654
ATENCIÓN			CARGO	EMAIL	CELULAR
Ing. Jennifer Cerda			Estudiante MIA	jenjer55@gmail.com	89597654
FECHAS DE PROCESAMIENTO DE MUESTRA EN EL LABORATORIO					FECHA DE EMISIÓN DE CERTIFICADO DE ANALISIS
INGRESO	INICIO DE ANALISIS	FINAL DE ANALISIS	CADENA CUSTODIA	NUMERO DE MUESTRAS	
31/03/2014	31/03/2014	04/04/2014	04/04/2014	1748	Una (1)
Fecha y Hora de Muestreo			30/03/14; 1:30 PM		
Muestreado por			Jennifer Cerda/Ing. Sergio Gámez		
Supervisor de Muestreo en Campo			NR		
Fuente			M1.3		
Tipo de muestra			Agua superficial		
Observaciones de Ubicación			Río Fonseca, Boaco		
Coordenadas			NR		
Codificación PIENSA			LA-1403-0172		
METODO SM // EPA	ENSAYO REALIZADO PARAMETRO	Unidad	VALOR DE CONCENTRACION		Norma CAPRE*
9221B	Coliforme total	NMP/100ml	1.4*10 ⁴		Neg
9221E	Coliforme fecal	NMP/100ml	4.0*10 ²		Neg

LEYENDA DE REPORTE DE RESULTADOS: Se reporta por parámetro de acuerdo a la Unidad que se indica en la columna y línea respectiva.

<: menor al Límite de Detección que se especifica por parámetro. NE= No especificada en la Norma, NR= No Reporta, Neg= Negativo
Metodos, Normas y/o Decreto empleados: SM = Standard Methods, 21th.2005 EPA = Environmental Protection Agency

* Norma regional de calidad del agua para consumo humano

Los resultados reportados corresponden a los ensayos solicitados por el cliente

PhD. Leandro Páramo Aguilón
Coordinador Técnico Laboratorios Ambientales PIENSA-UNI

Declaramos que este informe de resultados será de uso exclusivo del cliente, el laboratorio garantiza la confidencialidad e imparcialidad del informe.

0000506

FPT-5.10-01

Teléfono: 2278-1462 / 2270-5613 / 2270-1517 • Atención al Cliente: 8152 7314, Lab.: 8100 0421
E-mail: atencion.cliente@piensa.uni.edu.ni • Web: www.piensa.uni.edu.ni • Managua, Nicaragua.

Pág. 1 de 1

Figura A.6. Resultados muestreo 1: estación R5 (CT & CF)

Nota. Fuente: Resultados Laboratorio PIENSA.



LABORATORIO AMBIENTAL

CERTIFICADO DE ENSAYOS

LA-AAR1404-0033

EMPRESA / PROYECTO / PERSONA		DIRECCIÓN: Calle, Municipio; Comunidad; Departamento		TELEFONO
Tesis Linda Jenifer Cerda Urbina.		Rotonda Bello Horizonte 1c. Al Norte, 1c. Este, 2 1/2 Norte.		8959-7654
ATENCIÓN:		CARGO	EMAIL	Celular
Ing. Linda Jenifer Cerda Urbina.		Estudiante Maestría	NR	8959-7654
FECHAS DE PROCESAMIENTO DE MUESTRA EN EL LABORATORIO				FECHA DE EMISION DE CERTIFICADO DE ANALISIS
INGRESO:	INICIO DE ANALISIS:	FINAL DE ANALISIS:	CADENA DE CUSTODIA	
06/04/2014	07/04/2014	23/04/2014	29/04/2014	1756
Fecha y Hora de Muestreo		06/04/2014, 10:40 AM	06/04/2014, 9:45 AM	Rango o valor máximo permisible
Muestreado por		Ing. Jenifer Cerda, Ing. Sergio Gamez		
Supervisor de Muestreo en Campo		NR		
Fuente		Paso de Lajas 1.2	La Bombilla 1.1	
Tipo de Muestra		Agua Superficial		
Observaciones de Ubicación		NR	NR	
Coordenadas		NR	NR	
Codificación PIENSA		LA-1404-0191	LA-1404-0192	Art. No. *
METODO SM // EPA	ENSAYO REALIZADO PARAMETRO	Unidad	VALOR DE CONCENTRACION	
			Paso de Lajas 1.2 La Bombilla 1.1	
4500-O	Oxigeno Disuelto	mg/l	9.00 1.40	NE
5510-B	Demanda Bioquímica de Oxigeno	mg/l	210.00 348.00	NE

LEYENDA DE REPORTE DE RESULTADOS: Se reporta por parámetro de acuerdo a la Unidad que se indica en la columna y línea respectiva. ≤ al Limite de Detección que se especifica por parámetro NE= No especificada en la Norma NR= No Reporta.

SM: Metodo Utilizado del Standard Methods 21st edition, 2005. *Decreto 33-95 EPA = Environmental Protection Agency

OBSERVACIONES: La muestra fue recolectada, custodiada e ingresada al laboratorio por el cliente.

Los resultados reportados corresponden a los ensayos solicitados por el cliente

PhD. Leandro Parame Aguilera
Coordinador Técnico Laboratorios Ambientales PIENSA-UNI

Declaramos que este informe de resultados será de uso exclusivo del cliente, el laboratorio garantiza la confidencialidad e imparcialidad del informe.

0000804

Teléfono: 2278-1462 / 2270-5613 / 2270-1517 • Atención al Cliente: 8152 7314, Lab.: 8100 0421
E-mail: atencion.cliente@piensa.uni.edu.ni • Web: www.piensa.uni.edu.ni • Managua, Nicaragua.

Figura A.7. Resultados muestreo 2: estaciones R1 & R2 (OD & DBO)

Nota. Fuente: Resultados Laboratorio PIENSA.



LABORATORIO AMBIENTAL

CERTIFICADO DE ENSAYOS

LA-AAR1404-0033

EMPRESA / PROYECTO / PERSONA		DIRECCIÓN: Calle, Municipio; Comunidad; Departamento		TELEFONO	
Tesis Linda Jenifer Cerda Urbina.		Rotonda Bello Horizonte 1c. Al Norte, 1c. Este, 2 1/2 Norte.		8959-7654	
ATENCIÓN:		CARGO	EMAIL	Célular	
Ing. Linda Jenifer Cerda Urbina.		Estudiante Maestría	NR	8959-7654	
FECHAS DE PROCESAMIENTO DE MUESTRA EN EL LABORATORIO					
INGRESO:	INICIO DE ANALISIS:	FINAL DE ANALISIS:	FECHA DE EMISION DE CERTIFICADO DE ANALISIS	CADENA DE CUSTODIA	
06/04/2014	07/04/2014	23/04/2014	29/04/2014	1756	
Fecha y Hora de Muestreo		06/04/2014, 11:50 AM	06/04/2014, 11:15 AM	Rango o valor máximo permisible	
Muestreado por		Ing. Jenifer Cerda, Ing. Sergio Gamez			
Supervisor de Muestreo en Campo		NR			
Fuente		El Cascabel 1.4	El Quebracho 1.3		
Tipo de Muestra		Agua Superficial			
Observaciones de Ubicación		NR	NR		
Coordenadas		NR	NR		
Codificación PIENSA		LA-1404-0189	LA-1404-0190		
METODO SM // EPA	ENSAYO REALIZADO PARAMETRO	Unidad	VALOR DE CONCENTRACION		Art. No. *
4500-O	Oxigeno Disuelto	mg/l	7.40 7.80		NE
5510-B	Demanda Bioquímica de Oxigeno	mg/l	1.35 2.40	NE	

LEYENDA DE REPORTE DE RESULTADOS: Se reporta por parámetro de acuerdo a la Unidad que se indica en la columna y línea respectiva. s al Limite de Detección que se especifica por parámetro NE= No especificada en la Norma NR= No Reporta.

SM: Metodo Utilizado del Standard Methods 21st edition, 2005. *Decreto 33-95 EPA = Environmental Protection Agency

OBSERVACIONES: La muestra fue recolectada, custodiada e ingresada al laboratorio por el cliente.

Los resultados reportados corresponden a los ensayos solicitados por el cliente


 Ph.D. Leandro Páramo Aguilera
 Coordinador Técnico Laboratorios Ambientales PIENSA-UNI

Declaramos que este informe de resultados será de uso exclusivo del cliente, el laboratorio garantiza la confidencialidad e imparcialidad del informe.

0000303

Teléfono: 2278-1462 / 2270-5613 / 2270-1517 • Atención al Cliente: 8152 7314, Lab.: 8100 0421
E-mail: atencion.cliente@piensa.uni.edu.ni • Web: www.piensa.uni.edu.ni • Managua, Nicaragua.

Figura A.8. Resultados muestreo 2: estaciones R4 & R5 (OD & DBO)

Nota. Fuente: Resultados Laboratorio PIENSA.



LABORATORIOS AMBIENTALES

CERTIFICADO DE ENSAYOS				MB1404-0033	
EMPRESA / PROYECTO / PERSONA			DIRECCIÓN		TELÉFONO
Tesis Jennifer Cerda			Rotonda Bello Horizonte, 1c norte, 1 c este, 2½ c norte		89597654
ATENCIÓN			CARGO	EMAIL	CELULAR
Ing. Jennifer Cerda			Estudiante MIA	linjer55@gmail.com	89597654
FECHAS DE PROCESAMIENTO DE MUESTRA EN EL LABORATORIO				FECHA DE EMISIÓN DE CERTIFICADO DE ANALISIS	CADENA CUSTODIA
INGRESO	INICIO DE ANALISIS	FINAL DE ANALISIS	29/04/2014	1756	NUMERO DE MUESTRAS
07/04/2014	07/04/2014	11/04/2014			Una (1)
Fecha y Hora de Muestreo			06/04/14; 9:45 AM		
Muestreado por			Jennifer Cerda/Ing. Sergio Gámez		
Supervisor de Muestreo en Campo			NR		
Fuente			La Bombilla		
Tipo de muestra			Agua superficial		
Observaciones de Ubicación			Río Fonseca, Boaco		
Coordenadas			NR		
Codificación PIENSA			LA-1404-0192		
METODO SM // EPA	ENSAYO REALIZADO PARAMETRO	Unidad	VALOR DE CONCENTRACION		Norma CAPRE*
9221B	Coliforme total	NMP/100ml	9.2*10 ⁶		Neg
9221E	Coliforme fecal	NMP/100ml	5.4*10 ⁶		Neg

LEYENDA DE REPORTE DE RESULTADOS: Se reporta por parámetro de acuerdo a la Unidad que se indica en la columna y línea respectiva.

<: menor al Límite de Detección que se especifica por parámetro. NE= No especificada en la Norma, NR= No Reporta, Neg= Negativo
Metodos, Normas y/o Decreto empleados: SM = Standard Methods, 21th.2005 EPA = Environmental Protection Agency

* Norma regional de calidad del agua para consumo humano

Los resultados reportados corresponden a los ensayos solicitados por el cliente


Ph.D. Leandro Páramo Aguilera
Coordinador Técnico Laboratorios Ambientales PIENSA-UNI

Declaramos que este informe de resultados será de uso exclusivo del cliente, el laboratorio garantiza la confidencialidad e imparcialidad del informe.

0000655
FPI-5.10-01

Teléfono: 2278-1462 / 2270-5613 / 2270-1517 • Atención al Cliente: 8152 7314, Lab.: 8100 0421
E-mail: atencion.cliente@piensa.uni.edu.ni • Web: www.piensa.uni.edu.ni • Managua, Nicaragua.

Pág. 1 de 1

Figura A.9. Resultados muestreo 2: estación R1 (CT & CF)

Nota. Fuente: Resultados Laboratorio PIENSA.



LABORATORIOS AMBIENTALES

CERTIFICADO DE ENSAYOS				MB1404-0033	
EMPRESA / PROYECTO / PERSONA			DIRECCIÓN		TELÉFONO
Tesis Jennifer Cerda			Rotonda Bello Horizonte, 1c norte, 1 c este, 2½ c norte		89597654
ATENCIÓN		CARGO	EMAIL		CELULAR
Ing. Jennifer Cerda		Estudiante MIA	linjer55@gmail.com		89597654
FECHAS DE PROCESAMIENTO DE MUESTRA EN EL LABORATORIO				FECHA DE EMISIÓN DE CERTIFICADO DE ANALISIS	CADENA CUSTODIA
INGRESO	INICIO DE ANALISIS	FINAL DE ANALISIS	29/04/2014	1756	NUMERO DE MUESTRAS
07/04/2014	07/04/2014	11/04/2014			Una (1)
Fecha y Hora de Muestreo			06/04/14; 10:40 AM		
Muestreado por			Jennifer Cerda/Ing. Sergio Gámez		
Supervisor de Muestreo en Campo			NR		
Fuente			Paso Las Lajas		
Tipo de muestra			Agua superficial		
Observaciones de Ubicación			Río Fonseca, Boaco		
Coordenadas			NR		
Codificación PIENSA			LA-1404-0191		
METODO SM // EPA	ENSAYO REALIZADO PARAMETRO	Unidad	VALOR DE CONCENTRACION		Norma CAPRE*
9221B	Coliforme total	NMP/100ml	9.2*10 ⁸		Neg
9221E	Coliforme fecal	NMP/100ml	1.4*10 ⁸		Neg

LEYENDA DE REPORTE DE RESULTADOS: Se reporta por parámetro de acuerdo a la Unidad que se indica en la columna y línea respectiva.
 <: menor al Límite de Detección que se especifica por parámetro. NE= No especificada en la Norma, NR= No Reporta, Neg= Negativo
 Metodos, Normas y/o Decreto empleados: SM = Standard Methods, 21th.2005 EPA = Environmental Protection Agency
 * Norma regional de calidad del agua para consumo humano

Los resultados reportados corresponden a los análisis solicitados por el cliente

Ph.D. Leandro Páramo Aguilera
Coordinador Técnico Laboratorios Ambientales PIENSA-UNI

Declaramos que este informe de resultados será de uso exclusivo del cliente, el laboratorio garantiza la confidencialidad e imparcialidad del informe.

0000654
FPT-5.10-01

Teléfono: 2278-1462 / 2270-5613 / 2270-1517 • Atención al Cliente: 8152 7314, Lab.: 8100 0421
 E-mail: atencion.cliente@piensa.uni.edu.ni • Web: www.piensa.uni.edu.ni • Managua, Nicaragua.

Pág. 1 de 1

Figura A.10. Resultados muestreo 2: estación R2 (CT & CF)

Nota. Fuente: Resultados Laboratorio PIENSA.



LABORATORIOS AMBIENTALES

CERTIFICADO DE ENSAYOS

MB1404-0033

EMPRESA / PROYECTO / PERSONA			DIRECCIÓN		TELÉFONO
Tesis Jennifer Cerda			Rotonda Bello Horizonte, 1c norte, 1 c este, 2½ c norte		89597654
ATENCIÓN			CARGO	EMAIL	CELULAR
Ing. Jennifer Cerda			Estudiante MIA	linjer55@gmail.com	89597654
FECHAS DE PROCESAMIENTO DE MUESTRA EN EL LABORATORIO					FECHA DE EMISIÓN DE CERTIFICADO DE ANALISIS
INGRESO	INICIO DE ANALISIS	FINAL DE ANALISIS		CADENA CUSTODIA	
07/04/2014	07/04/2014	11/04/2014		29/04/2014	1756
Fecha y Hora de Muestreo			06/04/14; 11:15 AM		
Muestreado por			Jennifer Cerda/Ing. Sergio Gámez		
Supervisor de Muestreo en Campo			NR		
Fuente			El Quebracho		
Tipo de muestra			Agua superficial		
Observaciones de Ubicación			Río Fonseca, Boaco		
Coordenadas			NR		
Codificación PIENSA			LA-1404-0190		
METODO SM // EPA	ENSAYO REALIZADO PARAMETRO	Unidad	VALOR DE CONCENTRACION		Norma CAPRE*
9221B	Coliforme total	NMP/100ml	1.7*10 ⁴		Neg
9221E	Coliforme fecal	NMP/100ml	1.3*10 ³		Neg

LEYENDA DE REPORTE DE RESULTADOS: Se reporta por parámetro de acuerdo a la Unidad que se indica en la columna y línea respectiva.

<: menor al Límite de Detección que se especifica por parámetro. NE= No especificada en la Norma, NR= No Reporta, Neg= Negativo

Metodos, Normas y/o Decreto empleados: SM = Standard Methods, 21th.2005 EPA = Environmental Protection Agency

* Norma regional de calidad del agua para consumo humano

Los resultados reportados corresponden a los ensayos solicitados por el cliente


Ph.D. Leandro Páramo Aguilera
Coordinador Técnico Laboratorios Ambientales PIENSA-UNI

Declaramos que este informe de resultados será de uso exclusivo del cliente, el laboratorio garantiza la confidencialidad e imparcialidad del informe.

0000553
FPI-S-10-01

Teléfono: 2278-1462 / 2270-5613 / 2270-1517 • Atención al Cliente: 8152 7314, Lab.: 8100 0421
E-mail: atencion.cliente@piensa.uni.edu.ni • Web: www.piensa.uni.edu.ni • Managua, Nicaragua.

Pág. 1 de 1

Figura A.11. Resultados muestreo 2: estación R4 (CT & CF)

Nota. Fuente: Resultados Laboratorio PIENSA.



LABORATORIOS AMBIENTALES

CERTIFICADO DE ENSAYOS

MB1404-0033

EMPRESA / PROYECTO / PERSONA		DIRECCIÓN			TELEFONO
Tesis Jennifer Cerda		Rotonda Bello Horizonte, 1c norte, 1 c este, 2½ c norte			89597654
ATENCIÓN		CARGO	EMAIL		CELULAR
Ing. Jennifer Cerda		Estudiante MIA	linjer55@gmail.com		89597654
FECHAS DE PROCESAMIENTO DE MUESTRA EN EL LABORATORIO			FECHA DE EMISION DE CERTIFICADO DE ANALISIS	CADENA CUSTODIA	NUMERO DE MUESTRAS
INGRESO	INICIO DE ANALISIS	FINAL DE ANALISIS			
07/04/2014	07/04/2014	11/04/2014	29/04/2014	1756	Una (1)
Fecha y Hora de Muestreo			06/04/14; 11:50 AM		
Muestreado por			Jennifer Cerda/Ing. Sergio Gámez		
Supervisor de Muestreo en Campo			NR		
Fuente			El Cascabel		
Tipo de muestra			Agua superficial		
Observaciones de Ubicación			Río Fonseca, Boaco		
Coordenadas			NR		
Codificación PIENSA			LA-1404-0189		
METODO SM // EPA	ENSAYO REALIZADO PARAMETRO	Unidad	VALOR DE CONCENTRACION		Norma CAPRE*
9221B	Coliforme total	NMP/100ml	1.6*10 ⁴		Neg
9221E	Coliforme fecal	NMP/100ml	2.2*10 ³		Neg

LEYENDA DE REPORTE DE RESULTADOS: Se reporta por parámetro de acuerdo a la Unidad que se indica en la columna y línea respectiva.

<: menor al Limite de Detección que se especifica por parámetro. NE= No especificada en la Norma, NR= No Reporta, Neg= Negativo

Metodos, Normas y/o Decreto empleados: SM = Standard Methods, 21th.2005 EPA = Environmental Protection Agency

* Norma regional de calidad del agua para consumo humano

Los resultados reportados corresponden a los análisis solicitados por el cliente


Ph.D. Leandro Páramo Aguilera
Coordinador Técnico Laboratorios Ambientales PIENSA-UNI

Declaramos que este informe de resultados será de uso exclusivo del cliente, el laboratorio garantiza la confidencialidad e imparcialidad del informe.

0000652

Teléfono: 2278-1462 / 2270-5613 / 2270-1517 • Atención al Cliente: 8152 7314, Lab.: 8100 0421
E-mail: atencion.cliente@piensa.uni.edu.ni • Web: www.piensa.uni.edu.ni • Managua, Nicaragua.

Pág. 1 de 1

Figura A.12. Resultados muestreo 2: estación R5 (CT & CF)

Nota. Fuente: Resultados Laboratorio PIENSA.



LABORATORIO AMBIENTAL

CERTIFICADO DE ENSAYOS

LA-AAR1405-0043

EMPRESA / PROYECTO / PERSONA			DIRECCIÓN: Calle, Municipio; Comunidad; Departamento		TELÉFONO
Tesis Linda Jenifer Cerda Urbina.			Rotonda Bello Horizonte 1c. Al Norte, 1c. Este, 2 1/2 Norte.		8959-7654
ATENCIÓN:			CARGO	EMAIL	Célular
Ing. Linda Jenifer Cerda Urbina.			Estudiante Maestría	NR	8959-7654
FECHAS DE PROCESAMIENTO DE MUESTRA EN EL LABORATORIO					
INGRESO:	INICIO DE ANALISIS:	FINAL DE ANALISIS:	FECHA DE EMISION DE CERTIFICADO DE ANALISIS	CADENA DE CUSTODIA	NUMERO DE MUESTRAS
12/05/2014	12/05/2014	19/05/2014	28/05/2014	1782	Cinco (5)
Fecha y Hora de Muestreo		11/05/2014, 09:45 AM		11/05/2014, 9:15 AM	
Muestreado por			Ing. Sergio Gamez		
Supervisor de Muestreo en Campo			NR		
Fuente			Paso de Lajas	La Bombilla 7	
Tipo de Muestra			Agua Superficial		
Observaciones de Ubicación			NR	NR	
Coordenadas			NR	NR	
Codificación PIENSA			LA-1405-271	LA-1405-0270	
METODO SM // EPA	ENSAYO REALIZADO PARAMETRO	Unidad	VALOR DE CONCENTRACION		Art. No. *
			Paso de Lajas	La Bombilla 7	
4500-O	Oxigeno Disuelto	mg/l	3.80	0.60	NE
5510-B	Demanda Bioquímica de Oxigeno	mg/l	120.00	189.00	NE

LEYENDA DE REPORTE DE RESULTADOS: Se reporta por parámetro de acuerdo a la Unidad que se indica en la columna y línea respectiva. s al Limite de Detección que se especifica por parámetro NE= No especificada en la Norma NR= No Reporta.

SM: Metodo Utilizado del Standard Methods 21st edition, 2005. *Decreto 33-95 EPA = Environmental Protection Agency

OBSERVACIONES: La muestra fue recolectada, custodiada e ingresada al laboratorio por el cliente.

Los resultados reportados corresponden a los ensayos solicitados por el cliente

PhD. Leandro Páramo Aguilera
Coordinador Técnico Laboratorios Ambientales PIENSA-UNI

Declaramos que este informe de resultados será de uso exclusivo del cliente, el laboratorio garantiza la confidencialidad e imparcialidad del informe.

0000973

Teléfono: 2278-1462 / 2270-5613 / 2270-1517 • Atención al Cliente: 8152 7314, Lab.: 8100 0421
E-mail: atencion.cliente@piensa.uni.edu.ni • Web: www.piensa.uni.edu.ni • Managua, Nicaragua.

Figura A.13. Resultados muestreo 3: estaciones R1 & R2 (OD & DBO)

Nota. Fuente: Resultados Laboratorio PIENSA.



LABORATORIO AMBIENTAL

CERTIFICADO DE ENSAYOS

LA-AAR1405-0043

EMPRESA / PROYECTO / PERSONA Tesis Linda Jenifer Cerda Urbina.			DIRECCIÓN: Calle, Municipio; Comunidad; Departamento Rotonda Bello Horizonte 1c. Al Norte, 1c. Este, 2 1/2 Norte.		TELEFONO 8959-7654		
ATENCIÓN: Ing. Linda Jenifer Cerda Urbina.			CARGO Estudiante Maestria	EMAIL NR	Célular 8959-7654		
FECHAS DE PROCESAMIENTO DE MUESTRA EN EL LABORATORIO							
INGRESO: 12/05/2014	INICIO DE ANALISIS: 12/05/2014	FINAL DE ANALISIS: 19/05/2014	FECHA DE EMISION DE CERTIFICADO DE ANALISIS 28/05/2014	CADENA DE CUSTODIA 1782	NUMERO DE MUESTRAS Cinco (5)		
Fecha y Hora de Muestreo		11/05/2014, 10:30 AM		11/05/2014, 11:15 AM			
Muestreado por			Ing. Sergio Gamez				
Supervisor de Muestreo en Campo			NR				
Fuente			Quinta Erlinda	El Quebracho			
Tipo de Muestra			Agua Superficial				
Observaciones de Ubicación			NR	NR			
Coordenadas			NR	NR			
Codificación PIENSA			LA-1405-0272	LA-1405-0273			
METODO SM // EPA			ENSAYO REALIZADO PARAMETRO	Unidad	VALOR DE CONCENTRACION	Rango o valor máximo permisible Art. No. *	
					Quinta Erlinda		El Quebracho
4500-O			Oxigeno Disuelto	mg/l	6.40		7.60
5510-B			Demanda Bioquímica de Oxigeno	mg/l	9.03	5.33	NE

LEYENDA DE REPORTE DE RESULTADOS: Se reporta por parámetro de acuerdo a la Unidad que se indica en la columna y línea respectiva. \leq al Limite de Detección que se especifica por parámetro NE= No especificada en la Norma NR= No Reporta. SM: Metodo Utilizado del Standard Methods 21st edition, 2005. *Decreto 33-95 EPA = Environmental Protection Agency

OBSERVACIONES: La muestra fue recolectada, custodiada e ingresada al laboratorio por el cliente.

Los resultados reportados corresponden a los ensayos solicitados por el cliente

PhD. Leandro Páramo Aguilera
Coordinador Técnico Laboratorios Ambientales PIENSA UNI

Declaramos que este informe de resultados será de uso exclusivo del cliente, el laboratorio garantiza la confidencialidad e imparcialidad del informe.

0000972

Teléfono: 2278-1462 / 2270-5613 / 2270-1517 • Atención al Cliente: 8152 7314, Lab.: 8100 0421
E-mail: atencion.cliente@piensa.uni.edu.ni • Web: www.piensa.uni.edu.ni • Managua, Nicaragua.

Figura A.14. Resultados muestreo 3: estaciones R3 & R4 (OD & DBO)

Nota. Fuente: Resultados Laboratorio PIENSA.



LABORATORIO AMBIENTAL

CERTIFICADO DE ENSAYOS

LA-AAR1405-0043

EMPRESA / PROYECTO / PERSONA		DIRECCIÓN: Calle, Municipio; Comunidad; Departamento		TELEFONO
Tesis Linda Jenifer Cerda Urbina.		Rotonda Bello Horizonte 1c. Al Norte, 1c. Este, 2 1/2 Norte.		8959-7654
ATENCIÓN:		CARGO	EMAIL	Célular
Ing. Linda Jenifer Cerda Urbina.		Estudiante Maestría	NR	8959-7654
FECHAS DE PROCESAMIENTO DE MUESTRA EN EL LABORATORIO				
INGRESO:	INICIO DE ANALISIS:	FINAL DE ANALISIS:	FECHA DE EMISION DE CERTIFICADO DE ANALISIS	CADENA DE CUSTODIA
12/05/2014	12/05/2014	19/05/2014	28/05/2014	1782
Fecha y Hora de Muestreo		11/05/2014, 09		
Muestreado por		Ing. Jenifer Cerda, Ing. Sergio Gamez		
Supervisor de Muestreo en Campo		NR		
Fuente		El Cascabel		
Tipo de Muestra		Agua Superficial		
Observaciones de Ubicación		NR		
Coordenadas		NR		
Codificación PIENSA		LA-1405-271		
METODO SM // EPA	ENSAYO REALIZADO PARAMETRO	Unidad	VALOR DE CONCENTRACION	Art. No. *
4500-O	Oxigeno Disuelto	mg/l	6.40	NE

LEYENDA DE REPORTE DE RESULTADOS: Se reporta por parámetro de acuerdo a la Unidad que se indica en la columna y línea respectiva.
 s al Limite de Detección que se especifica por parámetro NE= No especificada en la Norma NR= No Reporta.
 SM: Metodo Utilizado del Standard Methods 21st edition, 2005. *Decreto 33-95 EPA = Environmental Protection Agency

OBSERVACIONES: La muestra fue recolectada, custodiada e ingresada al laboratorio por el cliente.

Los resultados reportados corresponden a los ensayos solicitados por el cliente


 Ph.D. Leandro Páramo Aguilera
 Coordinador Técnico Laboratorios Ambientales PIENSA-UNI

Declaramos que este informe de resultados será de uso exclusivo del cliente, el laboratorio garantiza la confidencialidad e imparcialidad del informe.

0000974

Teléfono: 2278-1462 / 2270-5613 / 2270-1517 • Atención al Cliente: 8152 7314, Lab.: 8100 0421
 E-mail: atencion.cliente@piensa.uni.edu.ni • Web: www.piensa.uni.edu.ni • Managua, Nicaragua.

Figura A.15. Resultados muestreo 3: estación R5 (OD)

Nota. Fuente: Resultados Laboratorio PIENSA.

ANEXO 5. Datos de entrada QUAL2K

Para ilustrar sobre la colocación de datos en las hojas de QUAL2K, a continuación se presenta un ejemplo basado en la modelación realizada para el muestreo 1. Cabe destacar que para los parámetros no registrados se emplearon los recomendados para QUAL2K.

QUAL2K FORTRAN
Stream Water Quality Model
Steve Chapra, Hua Tao and Greg Pelletier
Version 2.11b8

Open Old File

Run Fortran

System ID:	
River name	RIO FONSECA
Saved file name	Rio Fonseca Muestreo 1
Directory where file saved	C:\QUAL2K
Month	3
Day	30
Year	2014
Local time hours to UTC	-6
Daylight savings time	No
Calculation:	
Calculation step	0.1 hours
Final time	30 day
Solution method (integration)	Euler
Solution method (pH)	Newton-Raphson
Time zone	Central Standard Time
Program determined calc step	0.093750 hours
Time of last calculation	0.03 minutes
Time of sunrise	5:34 AM
Time of solar noon	11:41 AM
Time of sunset	5:48 PM
Photoperiod	12.23 hours

Figura A.16. Ejemplo de datos de entrada en el software QUAL2K: Hoja “QUAL2K”

Nota. Fuente: Elaboración propia en base a resultados QUAL2K.

QUAL2K
Stream Water Quality Model
RIO FONSECA (3/30/2014)
Headwater Data:

Open Old File

Run Fortran

Number of Headwaters	1																
Headwater 0 (Mainstem)																	
Headwater label	Reach No	Flow (m ³ /s)	Elevation (m)	Weir				Rating Curves				Manning Formula				Prescribed Dispersion m ² /s	
				Height (m)	Width (m)	adam	bdam	Velocity		Depth		Channel Slope	Manning n	Bot Width m	Side Slope		Side Slope
Mainstem headwater	1	0.223	315.000			1.2500	0.9000	0.4766	0.430	0.4125	0.450	0.0144	0.0500	4.25	0.00	0.00	0.00
Water Quality Constituents	Units	12:00 a.m.	1:00 a.m.	2:00 a.m.	3:00 a.m.	4:00 a.m.	5:00 a.m.	6:00 a.m.	7:00 a.m.	8:00 a.m.	9:00 a.m.	10:00 a.m.	11:00 a.m.	12:00 p.m.	1:00 p.m.	2:00 p.m.	3:00 p.m.
Temperature	C	25.80															
Conductivity	umhos																
Inorganic Solids	mgD/L																
Dissolved Oxygen	mg/L	0.10															
CBODslow	mgO2/L																
CBODfast	mgO2/L	584.62															
Organic Nitrogen	ugNIL																
NH4 Nitrogen	ugNIL																
NO3 Nitrogen	ugNIL																
Organic Phosphorus	ugP/L																
Inorganic Phosphorus (SRP)	ugP/L																
Phytoplankton	ugA/L																
Internal Nitrogen (INP)	ugA/L																
Internal Phosphorus (IPP)	ugP/L																
Detritus (POM)	mgD/L																
Pathogen	cfu/100 mL	1.60E+06															
Alkalinity	mgCaCO3/L	100.00															
Constituent i																	
Constituent ii																	
Constituent iii																	
pH	s.u.	7.30															

Figura A.17. Ejemplo de datos de entrada en el software QUAL2K: Hoja “Headwater”

Nota. Fuente: Elaboración propia en base a resultados QUAL2K.

QUAL2K Stream Water Quality Model RIO FONSECA (3/30/2014) Reach Data:												Open Old File		Run Fortran	
Reach for diel plot		2													
Element for diel plot		1		Reach		Headwater		Reach		Location		Element		Elevation	
Reach		Downstream		Number		Reach		length		Downstream		Upstream		Downstream	
Label		end of reach label						(km)		Latitude		Longitude		(km)	
R1 - R2				1		Yes		0.56		12.46		84.33		7.682	
R2 - R4				2				4.09		12.45		84.31		7.127	
R4 - R5				3				3.03		12.44		84.29		3.033	
												0.000		3	
												315.000		307.000	
												307.000		241.000	
												241.000		212.000	

Hydraulic Model (Weir Overrides Manning Formula; Manning Formula Override Rating Curves)																									
Downstream						Weir				Rating Curves				Manning Formula											
Latitude		Longitude		Height		Width		adam		bdam		Velocity		Depth		Channel		Manning		Bot Width		Side		Side	
Degrees	Minutes	Seconds	Degrees	Minutes	Seconds	(m)	(m)					Coefficient	Exponent	Coefficient	Exponent	Slope	n	m	Slope	Slope	Slope	Slope	Slope	Slope	
12.00	27	47	-85.0	40	9.2274	0.0000	0.0000	1.2500	0.9000	0.4766	0.430	0.4125	0.450	0.0144	0.0500	4.25	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	
12.00	26	51	-85.0	41	26.5914	0.0000	0.0000	1.2500	0.9000	0.4766	0.430	0.4125	0.450	0.0161	0.0500	4.25	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	
12.00	26	38	-85.0	42	36.756	0.0000	0.0000	1.2500	0.9000	0.4766	0.430	0.4125	0.450	0.0096	0.0500	4.25	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	

Figura A.18. Ejemplo de datos de entrada en el software QUAL2K: Hoja “Reach”

Nota. Fuente: QUAL2K.

QUAL2K Stream Water Quality Model RIO FONSECA (3/30/2014) Reach Rates and Velocities:				Run F	
Reach		Reach		Fast CBOD	
Number		Label		Prescribed Reaeration Rate	
				/d	
1		R1 - R2		360.00	
2		R2 - R4		290.00	
3		R4 - R5		13.20	
				8.05	

Figura A.19. Ejemplo de datos de entrada en el software QUAL2K: Hoja “Reach Rates”

Nota. Fuente: QUAL2K.

QUAL2K Stream Water Quality Model RIO FONSECA (3/30/2014) Air Temperature Data:						Open Old File		Run Fortran											
Upstream		Reach		Downstream		12:00 a.m.		1:00 a.m.		2:00 a.m.		3:00 a.m.		4:00 a.m.		5:00 a.m.		6:00 a.m.	
Label		Label		Distance		Distance		Hourly air temperature for each reach (degrees C)											
Mainstem headwater		R1 - R2		1		7.68		7.13		27.30									
		R2 - R4		2		7.13		3.03		29.20									
		R4 - R5		3		3.03		0.00		31.90									

Figura A.20. Ejemplo de datos de entrada en el software QUAL2K: Hoja “Air Temperature”

Nota. Fuente: QUAL2K.

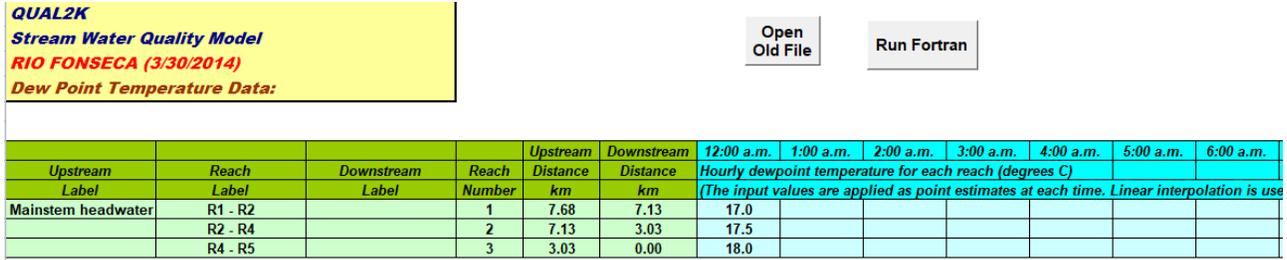


Figura A.21. Ejemplo de datos de entrada en el software QUAL2K: Hoja “Dew Point Temperature”

Nota. Fuente: QUAL2K.

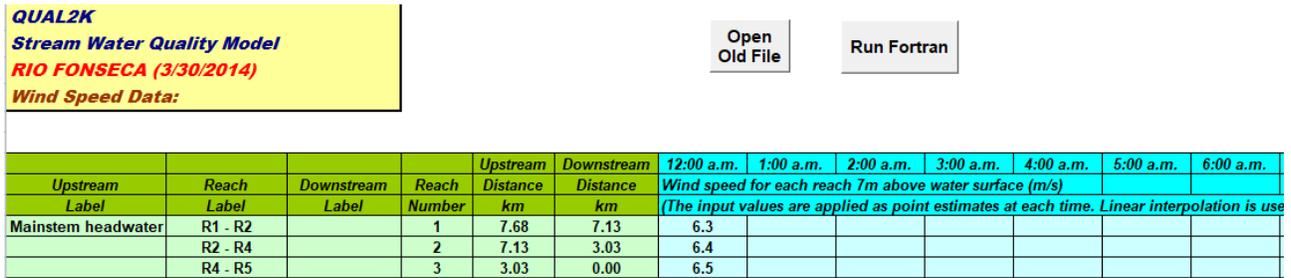


Figura A.22. Ejemplo de datos de entrada en el software QUAL2K: Hoja “Wind Speed”

Nota. Fuente: QUAL2K.

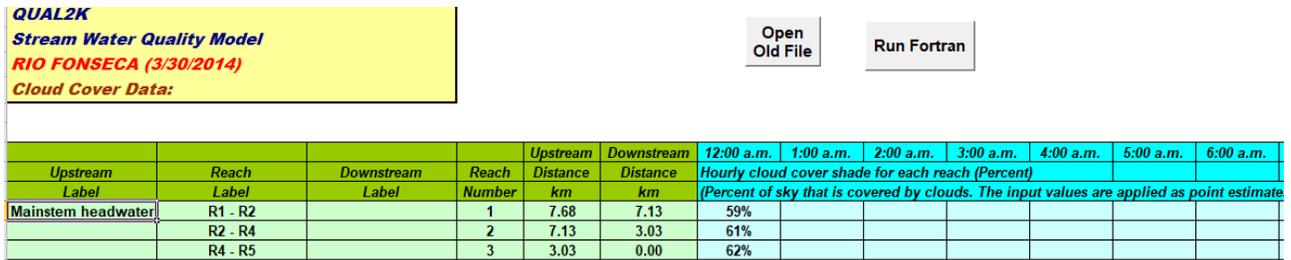


Figura A.23. Ejemplo de datos de entrada en el software QUAL2K: Hoja “Cloud Cover”

Nota. Fuente: QUAL2K.

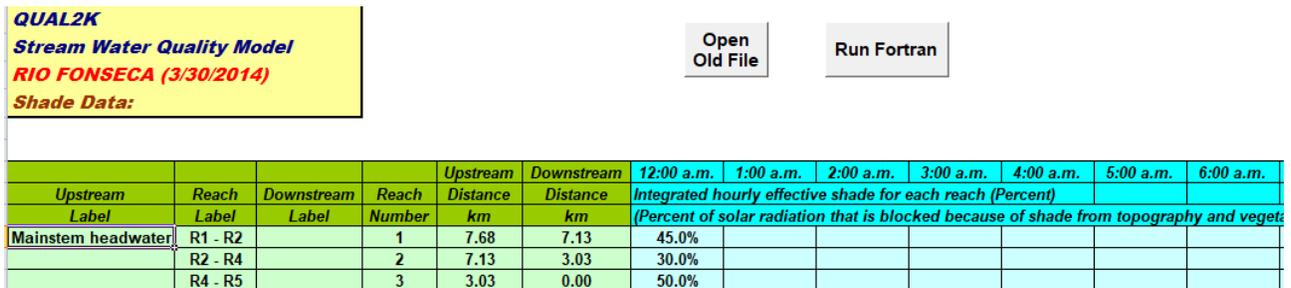


Figura A.24. Ejemplo de datos de entrada en el software QUAL2K: Hoja “Shade”

Nota. Fuente: QUAL2K.

QUAL2K			
Stream Water Quality Model			
RIO FONSECA (3/30/2014)			
Water Column Rates			
Parameter	Value	Units	Symbol
Stoichiometry:			
Carbon	40	gC	gC
Nitrogen	7.2	gN	gN
Phosphorus	1	gP	gP
Dry weight	100	gD	gD
Chlorophyll	1	gA	gA
Inorganic suspended solids:			
Settling velocity	1	m/d	v_i
Oxygen:			
Reaeration model	Churchill		
User reaeration coefficient α	0		α
User reaeration coefficient β	0		β
User reaeration coefficient γ	0		γ
Temp correction	1.024		θ_a
Reaeration wind effect	None		
O2 for carbon oxidation	2.69	gO ₂ /gC	r_{oc}
O2 for NH ₄ nitrification	4.57	gO ₂ /gN	r_{on}
Oxygen inhib model CBOD oxidation	Exponential		
Oxygen inhib parameter CBOD oxidation	0.60	L/mgO ₂	K_{sof}
Oxygen inhib model nitrification	Exponential		
Oxygen inhib parameter nitrification	0.60	L/mgO ₂	K_{sona}
Oxygen enhance model denitrification	Exponential		
Oxygen enhance parameter denitrification	0.60	L/mgO ₂	K_{sodn}
Oxygen inhib model phyto resp	Exponential		
Oxygen inhib parameter phyto resp	0.60	L/mgO ₂	K_{sop}
Oxygen enhance model bot alg resp	Exponential		
Oxygen enhance parameter bot alg resp	0.60	L/mgO ₂	K_{sob}
Slow CBOD:			
Hydrolysis rate		/d	k_{hc}
Temp correction	1.047		θ_{hc}
Oxidation rate		/d	k_{dc}
Temp correction	1.047		θ_{dc}
Fast CBOD:			
Oxidation rate	4	/d	k_{dc}
Temp correction	1.047		θ_{dc}
Organic N:			
Hydrolysis		/d	k_{hn}
Temp correction	1.07		θ_{hn}
Settling velocity	0	m/d	v_{on}
Ammonium:			
Nitrification		/d	k_{na}
Temp correction	1.07		θ_{na}
Nitrate:			
Denitrification		/d	k_{dn}
Temp correction	1.07		θ_{dn}
Sed denitrification transfer coeff	0	m/d	v_{ds}
Temp correction	1.07		θ_{ds}
Organic P:			
Hydrolysis		/d	k_{hp}
Temp correction	1.07		θ_{hp}
Settling velocity	1	m/d	v_{op}
Inorganic P:			
Settling velocity	0	m/d	v_{ip}
Inorganic P sorption coefficient	0.073	L/mgD	K_{dpt}
Sed P oxygen attenuation half sat constant	1.831	mgO ₂ /L	k_{spt}

Figura A.25. Ejemplo de datos de entrada en el software QUAL2K: Hoja “Rates (1/3)”

Nota. Fuente: QUAL2K (Introducción de valores recomendados).

Phytoplankton:			
Max Growth rate		/d	k_{gp}
Temp correction	1.07		θ_{gp}
Respiration rate		/d	k_{rp}
Temp correction	1.07		θ_{rp}
Excretion rate	0	/d	k_{ep}
Temp correction	1.07		θ_{ep}
Death rate	0	/d	k_{dp}
Temp correction	1		θ_{dp}
External Nitrogen half sat constant	15	ugN/L	k_{sNp}
External Phosphorus half sat constant	2	ugP/L	k_{sPp}
Inorganic carbon half sat constant	2.00E-05	moles/L	k_{sCp}
Light model	Half saturation		
Light constant	57.6	langleys/d	K_{Lp}
Ammonia preference	25	ugN/L	k_{hNp}
Subsistence quota for nitrogen	0	mgN/mgA	q_{0Np}
Subsistence quota for phosphorus	0	mgP/mgA	q_{0Pp}
Maximum uptake rate for nitrogen	0	mgN/mgA/d	ρ_{mNp}
Maximum uptake rate for phosphorus	0	mgP/mgA/d	ρ_{mPp}
Internal nitrogen half sat constant	0	mgN/mgA	K_{qNp}
Internal phosphorus half sat constant	0	mgP/mgA	K_{qPp}
Settling velocity	0.15	m/d	v_s
Bottom Algae:			
Growth model	Zero-order		
Max Growth rate	999.991	mgA/m ² /d or /d	C_{gb}
Temp correction	1.07		θ_{gb}
First-order model carrying capacity	1000	mgA/m ²	$a_{b,max}$
Respiration rate	1	/d	k_{rb}
Temp correction	1.07		θ_{rb}
Excretion rate	0.5	/d	k_{eb}
Temp correction	1.05		θ_{eb}
Death rate	0.09	/d	k_{db}
Temp correction	1.07		θ_{db}
External nitrogen half sat constant	300	ugN/L	k_{sNp}
External phosphorus half sat constant	100	ugP/L	k_{sPb}
Inorganic carbon half sat constant	1.00E-05	moles/L	k_{sCb}
Light model	Half saturation		
Light constant	50	langleys/d	K_{Lb}
Ammonia preference	25	ugN/L	k_{hNp}
Subsistence quota for nitrogen	0	mgN/mgA	q_{0N}
Subsistence quota for phosphorus	0	mgP/mgA	q_{0P}
Maximum uptake rate for nitrogen	0	mgN/mgA/d	ρ_{mN}
Maximum uptake rate for phosphorus	0	mgP/mgA/d	ρ_{mP}
Internal nitrogen half sat constant	0	mgN/mgA	K_{qN}
Internal phosphorus half sat constant	0	mgP/mgA	K_{qP}
Detritus (POM):			
Dissolution rate	0	/d	k_{dt}
Temp correction	1.07		θ_{dt}
Fraction of dissolution to fast CBOD	0.00		F_f
Settling velocity	0	m/d	v_{dt}
Pathogens:			
Decay rate	0.8	/d	k_{dc}
Temp correction	1.07		θ_{dc}
Settling velocity	1	m/d	v_s
Light efficiency factor	1.00		α_{path}

Figura A.26. Ejemplo de datos de entrada en el software QUAL2K: Hoja "Rates (2/3)"

Nota. Fuente: QUAL2K (Introducción de valores recomendados).

Detritus (POM):			
Dissolution rate	0	/d	k_{dt}
Temp correction	1.07		θ_{dt}
Fraction of dissolution to fast CBOD	0.00		F_f
Settling velocity	0	m/d	v_{dt}
Pathogens:			
Decay rate	0.8	/d	k_{dx}
Temp correction	1.07		θ_{dx}
Settling velocity	1	m/d	v_x
Light efficiency factor	1.00		α_{path}
pH:			
Partial pressure of carbon dioxide	347	ppm	p_{CO2}
Constituent i			
First-order reaction rate	0	/d	
Temp correction	1		θ_{dx}
Settling velocity	0	m/d	v_{dt}
Constituent ii			
First-order reaction rate	0	/d	
Temp correction	1		θ_{dx}
Settling velocity	0	m/d	v_{dt}
Constituent iii			
First-order reaction rate	0	/d	
Temp correction	1		θ_{dx}
Settling velocity	0	m/d	v_{dt}
Detritus (POM):			
Dissolution rate	0	/d	k_{dt}
Temp correction	1.07		θ_{dt}
Fraction of dissolution to fast CBOD	0.00		F_f
Settling velocity	0	m/d	v_{dt}
Pathogens:			
Decay rate	0.8	/d	k_{dx}
Temp correction	1.07		θ_{dx}
Settling velocity	1	m/d	v_x
Light efficiency factor	1.00		α_{path}
pH:			
Partial pressure of carbon dioxide	347	ppm	p_{CO2}
Constituent i			
First-order reaction rate	0	/d	
Temp correction	1		θ_{dx}
Settling velocity	0	m/d	v_{dt}
Constituent ii			
First-order reaction rate	0	/d	
Temp correction	1		θ_{dx}
Settling velocity	0	m/d	v_{dt}
Constituent iii			
First-order reaction rate	0	/d	
Temp correction	1		θ_{dx}
Settling velocity	0	m/d	v_{dt}

Figura A.27. Ejemplo de datos de entrada en el software QUAL2K: Hoja “Rates (3/3)”

Nota. Fuente: QUAL2K (Introducción de valores recomendados).

QUAL2K Stream Water Quality Model RIO FONSECA (3/30/2014) Light Parameters and Surface Heat Transfer Models:			
Parameter	Value	Unit	
Photosynthetically Available Radiation	0.47		
Background light extinction	0.2	/m	k_{sb}
Linear chlorophyll light extinction	0.0088	1/m-(ugA/L)	α_p
Nonlinear chlorophyll light extinction	0.054	1/m-(ugA/L) ^{2/3}	α_{pn}
ISS light extinction	0.052	1/m-(mgD/L)	α_s
Detritus light extinction	0.174	1/m-(mgD/L)	α_o
Solar shortwave radiation model			
Atmospheric attenuation model for solar	Bras		
<i>Bras solar parameter (used if Bras solar model is selected)</i>			
atmospheric turbidity coefficient (2=clear, 5=smoggy, default=2)	2		n_{fac}
<i>Ryan-Stolzenbach solar parameter (used if Ryan-Stolzenbach solar model is selected)</i>			
atmospheric transmission coefficient (0.70-0.91, default 0.8)	0.8		a_{rc}
Downwelling atmospheric longwave IR radiation			
atmospheric longwave emissivity model	Brunt		
Evaporation and air convection/conduction			
wind speed function for evaporation and air convection/conduction	Brady-Graves-Geyer		
Sediment heat parameters			
Sediment thermal thickness	10	cm	H_s
Sediment thermal diffusivity	0.005	cm ² /s	α_s
Sediment density	1.6	g/cm ³	ρ_s
Water density	1	g/cm ³	ρ_w
Sediment heat capacity	0.4	cal/(g °C)	C_{ps}
Water heat capacity	1	cal/(g °C)	C_{pw}
Sediment diagenesis model			
Compute SOD and nutrient fluxes	Yes		

Figura A.28. Ejemplo de datos de entrada en el software QUAL2K: Hoja “Light and Heat”

Nota. Fuente: QUAL2K (Introducción de valores recomendados).

QUAL2K Stream Water Quality Model RIO FONSECA (3/30/2014) Hydraulics Data:					
Tributary No.	Distance x(km)	Q-data m ³ /s	H-data m	U-data m/s	Travel time data (d)
0	7.682	0.223	0.210	0.250	0.000
0	7.127	0.223	0.210	0.250	0.026
0	3.033	0.223	0.210	0.250	0.215
0	0.000	0.223	0.210	0.250	0.356

Figura A.29. Ejemplo de datos de entrada en el software QUAL2K: Hoja “Hydraulics Data)”

Nota. Fuente: QUAL2K.

QUAL2K
Stream Water Quality Model
RIO FONSECA (3/30/2014)
Temperature Data:

Tributary No.	Distance x(km)	Mean Temp-data	Minimum Temp-data	Maximum Temp-data
0	7.68	25.80		
0	7.13	27.60		
0	3.03	25.60		
0	0.00	27.30		

Figura A.30. Ejemplo de datos de entrada en el software QUAL2K: Hoja “Temperature Data”

Nota. Fuente: QUAL2K.

QUAL2K
Stream Water Quality Model
RIO FONSECA (3/30/2014)
Water Quality Data:

Open Old File

Tributary No.	Distance km	DO (mgO2/L) data	CBODf (mgO2/L) data	Pathogens (cfu/100 mL) data	pH data
0	7.682	0.10	584.62	1.60E+06	7.30
0	7.127	6.40	379.48	1.60E+06	7.80
0	3.033	6.60	4.15	9.20E+03	7.80
0	0.000	6.40	2.38	1.40E+04	7.90

Figura A.31. Ejemplo de datos de entrada en el software QUAL2K: Hoja “WQ Data”

Nota. Fuente: QUAL2K.