

Universidad Nacional

Facultad de Ciencias de la Tierra y Mar

Escuela de Ciencias Ambientales

Licenciatura en Ingeniería en Gestión Ambiental

Proyecto de graduación

Tema de Investigación:

Modelación del efecto que produce el aumento de la temperatura sobre la capacidad de autodepuración del Río Bermúdez producto del cambio climático mediante el modelo QUAL2KW (2019-2020)

Trabajo de Graduación sometido a consideración del Tribunal Examinador de la Escuela de Ciencias Ambientales de la Universidad Nacional para optar al grado de Licenciatura en Ingeniería en Gestión Ambiental.

Estudiante: Bernny José Chavarría García

Heredia, Costa Rica

2022

Trabajo de graduación aprobado por el Tribunal Examinador de la Escuela de Ciencias Ambientales de la universidad Nacional de Costa Rica, para optar al grado de Licenciatura de **Ingeniería en Gestión Ambiental**.

MIEMBROS DEL TRIBUNAL EXAMINADOR

.....

Dra. Marilyn Romero Vargas

Representante Decanato de la Facultad de Ciencias de la Tierra y Mar

.....

Dr. Pablo Ramírez Granados

Representante de EDECA

.....

M.S.c. José Félix Rojas Marín

Tutor

.....

M.S.c Diana Mora Campos

Lectora

.....

Bach. Bernny Chavarría García

Postulante del trabajo

Agradecimiento

A mi familia principalmente a mi madre y abuela, que son mi pilar y sostén en los momentos complicados de vida. Ellas son mi ejemplo de vida, y la inspiración para permitirme ser mejor persona y lograr todos los retos y proyectos propuestos.

Resumen

El presente trabajo estudia los posibles efectos o variaciones que pueda presentar el proceso de autodepuración en la microcuenca del río Bermúdez, debido principalmente al incremento de temperatura del aire a futuro producto de la influencia del cambio climático y considerando variables como la carga orgánica y caudales. El impacto de la variabilidad se midió por medio del modelo ambiental QUAL2KW, tanto en condiciones actuales como para escenarios de cambio climático a futuro. Para la obtención de los datos necesarios para el proceso de modelación se realizaron trabajos de campo y tres campañas de muestreos en las épocas transición lluviosa-seca, época seca y época lluviosa. El escenario actual se evaluó por medio de datos recolectados durante los años 2019-2020, para los escenarios futuros se contempló proyecciones de variaciones climatológicas por medio de estudio elaborado por el Instituto Meteorológico Nacional para el 2050 y 2080, obteniendo modelaciones que describe el comportamiento y tendencia de los parámetros evaluados. Respecto con el análisis de los escenarios, presentan un comportamiento muy similar tanto para el escenario actual como para los escenarios futuros relacionados al cambio climático, en las distintas campañas evaluadas. Los resultados reflejan una variación poco significativa de comportamiento de los principales parámetros fisicoquímicos claves para el proceso de autodepuración del río.

Palabras clave: modelación de calidad del agua, QUAL2KW, calibración, escenarios, Oxígeno Disuelto, Demanda Biológica de Oxígeno, cambio climático, temperatura.

Tabla de Contenido

CAPITULO 1. Introducción	4
1.2 Justificación	4
1.3 Problema de investigación	6
1.4 Objetivos	8
1.4.1 Objetivo General	8
1.4.2 Objetivos Específicos	8
CAPITULO 2. Marco Teórico	9
2.1 Contaminación de los cuerpos de agua	9
2.1.1 Autodepuración de los cuerpos de agua	12
2.1.2 Normativa Nacional	13
2.2 Cambio Climático y su relación con las cuencas hidrográficas	14
2.3. Modelación Ambiental	15
2.3.1 Modelo QUAL2KW	16
2.3.2 Composición del modelo Qual2kw	20
2.3.2.1 Datos requeridos por el modelo QUAL2KW	22
2.3.2.2 Parámetros fisicoquímicos y biológicos	23
2.3.3 Calibración del modelo	25
2.4 Microcuenca del rio Bermúdez	25
CAPITULO 3. Metodología	27
3.1. Proceso metodológico	27
3.1.1. ETAPA 1. Determinar la hidrodinámica de la zona de estudio para la caracterización de los parámetros físico, químicos por medio de los muestreos, necesarios para la modelación.	29
3.1.1.1 Investigación previa	29
3.1.1.2. Inspección de campo	30
3.1.1.3. Representación del área de estudio	31
3.1.1.4. Caracterización hidráulica	32

3.1.2. ETAPA 2. Realizar un ajuste del modelo QUAL2KW de los principales parámetros fisicoquímicos para la obtención de un menor nivel de incertidumbre y mejor representatividad.	34
3.1.2.1 Campañas de toma de muestras	35
3.1.2.2 Análisis de muestras	37
3.1.2.3 Modelación preliminar	37
3.1.3.4 Calibración del modelo	38
3.1.3 ETAPA 3. Realizar la modelación en el QUAL2KW bajo los escenarios actual y futuro contemplando las variaciones de cambio climático para la estimación del cambio en el proceso de autodepuración del río	38
3.1.3.1 Modelación en condiciones futuras	38
3.1.3.2 Análisis de datos	40
CAPITULO 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	41
4.1 ETAPA 1	41
4.1.1 Caracterización física de la microcuenca	41
4.1.2 Caracterización de la cuenca	44
4.1.3 Mediciones en el río Bermúdez	49
4.1.4 Parámetros fisicoquímicos	53
4.1.5 Resultados de parámetros hidráulicos	61
4.2 ETAPA 2	62
4.2.1 Calibración de la modelación	62
4.3 ETAPA 3	69
4.3.1 Modelaciones de escenarios a futuro	69
4.3.2 Análisis Estadístico de los escenarios climáticos	72
4.3.2.1 Oxígeno Disuelto	74
4.3.2.2 Demanda Biológica de Oxígeno	75
4.3.2.3 Analisis de ANOVA multifactorial	76
CAPITULO 5. CONCLUSIONES	78
CAPITULO 6. RECOMENDACIONES	79
CAPITULO 7. REFERENCIAS	80
Anexos	87

Lista de Abreviaturas

SST: Sólidos Suspendidos Totales

DBO: Demanda Biológica de Oxígeno

OD: Oxígeno Disuelto

CO: Carga Orgánica

DBO ultima: Demanda Biológica de Oxígeno a 20 días

MO: Materia Orgánica

IMN: Instituto Meteorológico Nacional

Esc actual: Escenario Base del proyecto 2019-2020

Esc 1 2050: Escenario 1 para el año 2050

Esc 2 2080: Escenario 2 para el año 2080

CAPITULO 1. Introducción

1.2 Justificación

A nivel país, una de las problemáticas a nivel ambiental es la contaminación hacia los ríos producto de aguas residuales. Según el Informe del Estado de la Nación (2018) el tratamiento de agua residual por medio de cobertura de alcantarillado aumentó del 4,2% en el 2014 al 14,4% para el 2017, siendo este, un avance significativo para el país, pero muy por debajo de la media mundial de un 60%. Lo que implica que, si no se realiza un manejo y tratamiento adecuado de las aguas residuales, ocasionan contaminación de las cuencas hidrográficas (Suárez et al, 2015).

Existen eventos externos como el cambio climático que modifican la calidad del agua de los ríos y pueden incrementar el agravante en términos de contaminación del agua. Alteraciones extremas en las condiciones regulares de un sitio, como precipitaciones más intensas, o sequías más prolongadas alteran la calidad y dinámica de los ríos debido a los aportes o reducciones del caudal de los ríos que alteran las velocidades de estos y el efecto de la reaeración natural modificando el balance natural de oxígeno disuelto. Además, aumentos en temperatura, demuestran un incremento en demanda biológica de oxígeno (DBO), sólidos suspendidos (SS) y actúan directamente en la reducción del oxígeno disuelto, limitando la capacidad de autodepuración. (Montes et al., 2013).

Con respecto al cambio climático, el IMN (2012) realizó proyecciones para el 2050 y 2080 de variaciones de temperatura atmosférica y cambios porcentuales de precipitación producto de la influencia del cambio climático en Costa Rica. En la Región Central, una disminución media anual del 10 % a 15 % para el 2050 en relación con la precipitación media actual, mientras que para la temperatura atmosférica aumentará en la media 1.91 °C para el 2050, mientras tanto para el 2080, tendría aumento del 3.36 °C en relación con la temperatura actual. Con base a lo anterior, el proyecto busca reflejar la variación en el proceso de autodepuración y la calidad del agua que puede ocasionar los cambios proyectados de

temperatura y precipitación en años futuros producto del cambio climático mediante modelaciones controladas para visualizar escenarios futuros.

El proyecto de investigación actual, al derivarse de la estructuración y planteamiento de un proyecto de investigación definido por el Laboratorio de Análisis Ambiental de la Universidad Nacional, se definió la microcuenca del río Bermúdez como objeto de estudio al ser determinada según (Herrera et al, 2013) como una de las microcuencas más contaminadas de la subcuenca del río Virilla, por lo que toma relevancia en cómo eventos externos como el cambio climático pueda incidir en la calidad del agua del río. Además, se planteó el uso de la herramienta ambiental QUAL2KW como medio de simulación de las condiciones presentes y futuras por parte del río en cuestión.

Ya que el modelo QUAL2KW al ser un medio que permite modelar las condiciones de un cuerpo de agua y conocer el estado actual en términos químicos, físico y biológicos puede implementar proyecciones a futuro determinando cual es la posible afectación al mismo y las variaciones presentadas producto del cambio climático (Amarilla, 2017).

Por último, los resultados pueden determinar puntos críticos y considerarse como línea base para incorporar herramientas ambientales tecnológicas para el estudio del análisis de calidad del agua ante eventos de contaminación antropogénica y escenarios futuros influenciados por factores como el cambio climático, para la obtención de fundamento científico en la toma de acciones de mitigación por parte de instituciones públicas y sociedad en general, en pro de un mejoramiento ambiental en la calidad de los ecosistemas hídricos.

1.3 Problema de investigación

A nivel mundial la contaminación del agua relacionado a las actividades humanas mediante el crecimiento demográfico, el desarrollo industrial y urbanístico que amenaza con una mayor contaminación de las cuencas hidrográficas y mantos acuíferos (United Nations Environment, 2019). Existe en la actualidad una amenaza a nivel global que puede incrementar las repercusiones negativas de los ríos, como lo es el cambio climático, el cual produce variaciones en la temperatura que influye en las características físicas, químicas y biológicas del agua; específicamente el aumento de esta tiene un efecto en el proceso de autodepuración de los ríos (Montes et al, 2013).

En Costa Rica, específicamente en el Gran Área Metropolitana la contaminación elevada de los ríos es influenciado mediante procesos de urbanización y desarrollo industrial. La falta de procesos de tratamiento de aguas residuales, los vertidos hacia los ríos y percolación de tanques sépticos genera una alta contaminación hacia los ríos (Solano, 2011).

La problemática del presente proyecto es fundamentada por el estudio de calidad de aguas superficiales realizado por (Herrera et al., 2013), en el cual se realizó estudios de calidad del agua por un rango de cinco años de las 17 microcuencas que componen la subcuenca del río Virilla, ubicada en el Gran Área Metropolitana (GAM), determinó mediante la implementación del modelo ambiental Streeter-Phelps, que el río Bermúdez es uno de los ríos más contaminados de la subcuenca mencionada, la cual desemboca en la cuenca del río Tárcoles. En el estudio los parámetros fisicoquímicos del río Bermúdez reflejan un incrementado entre un 8 % y 9 % los niveles de contaminación reflejados en los parámetros fisicoquímicos de Demanda Química de Oxígeno (DQO), Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) y Solidos Suspendidos Totales (SST) por causa de la contaminación de aguas residuales provenientes de actividades antropogénicas, lo que refleja un problema ambiental para las condiciones de calidad del agua y ecosistema de la microcuenca del río Bermúdez.

La problemática de contaminación de ríos repercute en diversos ámbitos como la influencia negativa y repercusiones directas o indirectas a la salud de las comunidades a causa

de la contaminación de la microcuenca del río Bermúdez dentro de un contexto social. Además, un contexto económico en gastos monetarios en temas de salud para el gobierno y una mala imagen en términos ambientales, además de inversión por parte de los municipios para gestión y acciones de mejoramiento ambiental dentro de las cuencas. Por último, en un contexto político, existen actualmente acciones legales como el voto 07-005894 de la Sala Constitucional de Costa Rica voto de garabito, que responsabiliza de la alta contaminación de la cuenca del río Tárcoles en la cual está incorporada dicha microcuenca y obliga a implementar acciones de mejora a instituciones públicas relacionadas a nivel ambiental de la Gran Área Metropolitana (Nación, 2007).

Finalmente, considerando todo lo anterior, el río Bermúdez al ser uno de los más contaminados de la GAM, es importante realizar estudio de las condiciones actuales de calidad del agua de la microcuenca del río Bermúdez, determinar sus puntos críticos en términos de concentración de oxígeno disuelto y concentraciones elevadas de carga orgánica. Posteriormente, conocer mediante modelaciones con el QUAL2KW, determinar con condiciones esperables de cambios de temperatura atmosférica y precipitación, cómo esto puede modificar los comportamientos de autodepuración del río los escenarios futuros que se puede enfrentar el río ante modificaciones de temperatura atmosférica y variación de precipitación producto del cambio climático y cómo estos puede modificar el proceso de autodepuración del río, con ello el proyecto busca responder a la pregunta ¿Cuál es el nivel de afectación que produce el cambio climático por medio del aumento de temperatura, hacia la calidad del agua del Río Bermúdez?.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo General

Modelar el comportamiento de autodepuración del Río Bermúdez mediante el modelo QUAL2KW para la determinación de la afectación del cambio climático debido a las variaciones de temperatura y precipitación proyectadas para escenarios futuros.

1.4.2 Objetivos Específicos

- Determinar la hidrodinámica de la zona de estudio para la caracterización de los parámetros fisicoquímicos por medio de los muestreos, necesarios para la modelación.
- Realizar un ajuste del modelo QUAL2KW de los principales parámetros fisicoquímicos para la obtención de un menor nivel de incertidumbre y mejor representatividad.
- Realizar la modelación en el QUAL2KW bajo los escenarios actual y futuro contemplando las variaciones de cambio climático para la estimación del cambio en el proceso de autodepuración del río.

CAPITULO 2. Marco Teórico

2.1 Contaminación de los cuerpos de agua

Los cuerpos de aguas superficiales en su trayectoria particular sufren gran cantidad de procesos naturales físicos, químicos y biológicos (Valencia, 2007). Dichos comportamientos están ligados a las características de la topografía y morfología hidrodinámica que predomina, así como agentes externos (Valencia, 2007). La contaminación que experimentan los cuerpos de aguas proviene de diferentes fuentes de origen tanto naturales como antropogénicas (Valencia, 2007). Las repercusiones que presenta las aguas superficiales serán directamente afectadas en su composición y calidad (Valencia, 2007). Una de las características importantes de países con alta pobreza y bajo índice de desarrollo, es que las fuentes de contaminación serán en su mayoría de contaminación orgánica, caso contrario, países con un importante desarrollo industrial, tiene mayor posibilidad de presentar fuentes de contaminación potencialmente peligrosas, como metales tóxicos, ácidos, plaguicidas, entre otros. (Valencia,2007)

La contaminación del agua por fuente antropogénica puede ser ocasionadas por fuentes puntuales las son llamadas comúnmente vertidos, debido a que desembocan a cuerpos receptores (Solano, 2016). Sin embargo, también existe otra fuente no tan mencionada llamada contaminación por fuente difusa que se origina principalmente de actividades que utilizan grandes extensiones de terreno como lo son la ganadería y agricultura que, por escorrentía ocasionada por la precipitación, contamina el agua de componentes tanto orgánicos como inorgánicos, que, al no poder cuantificarse puntualmente dicha fuente de contaminación, se asocia a una importante incertidumbre. (Solano, 2016).

Los contaminantes hacia el agua implican una entrada de materia orgánica, inorgánica y microorganismos, que, dependiendo de su composición, (Sánchez, 2019) presentarán diferentes fenómenos físicos en el agua:

- Sedimentación de los componentes orgánicos e inorgánicos en el fondo del río, influenciada por su densidad (mayor al agua) y tamaño lo cual no puede ser arrastrado con facilidad por el río.
- Flotación de los componentes como sólidos, grasas y detergentes, influenciados por la densidad (menor al agua), y ser fácilmente arrastrados por la corriente.
- Suspensión de los componentes orgánicos e inorgánicos en la columna de agua, por el tamaño y principalmente tener densidad similar al agua.

En la siguiente Tabla 1 se detalla el origen de los contaminantes tanto orgánicos, inorgánicos y microbiológicos que se vierten a los cuerpos de agua por medio de vertidos puntuales y difusas, además de su fuente de origen debido a actividades antropogénicas propias de las zonas aledañas a los cuerpos de agua y su recorrido, por último, la descripción asociada al contaminante.

Tabla 1.
Descripción de contaminantes hacia cuerpos superficiales

Contaminante	Fuente	Descripción
Orgánicos	Fuentes industriales, domésticas, asentamientos humanos.	Se descomponen en el agua y disminuyen el oxígeno disuelto, induciendo la eutrofización.
Nutrientes	Fuentes domésticas, industriales, esorrentía agrícola.	Incluyen principalmente fosfatos y nitratos, su incremento en el agua induce a una eutrofización
Metales pesados	Fuentes industriales, mineras, asentamientos humanos,	Se originan principalmente alrededor de centros industriales y mineros
Contaminación microbiológica	Fuentes municipales, y domésticas.	Desechos domésticos no tratados, criaderos de animales (E. coli, protistos, amebas, etc.).
Compuestos tóxicos orgánicos	Fuentes industriales, asentamientos humanos, esorrentía agrícola	Químicos industriales, dioxinas, plásticos, pesticidas agrícolas, hidrocarburos de petróleo, hidrocarburos policíclicos generados de la combustión del petróleo. Compuestos orgánicos persistentes
Químicos traza y compuestos farmacéuticos	Industria química y farmacia.	Desechos hospitalarios, son sustancias peligrosas no removidos
Partículas suspendidas	Industria, asentamientos humanos, esorrentía agrícola y cambios en el uso de la tierra.	Pueden ser orgánicas o inorgánicas y se originan principalmente de prácticas agrícolas y erosión de tierras
Acidificación	Fuentes industriales y fuentes municipales.	Está relacionada con un pH bajo del agua dado por la deposición sulfúrica producida por la actividad industrial y por las emisiones urbanas

Fuente: Adaptado de Escobar, 2002

2.1.1 Autodepuración de los cuerpos de agua

Los cuerpos de agua superficiales, principalmente los ríos, manejan cierta capacidad de asimilación de los contaminantes o también llamado autodepuración de los ríos que engloba procesos físicos, químicos y biológicos en los que un río realiza un proceso de recuperación de la calidad del agua ante un episodio de contaminación de fuentes antropológicas o naturales como se visualiza en el (Anexo 1).

Como parámetro fundamental en el proceso se encuentra el oxígeno disuelto, primordial para la vida acuática; el cual puede presentar disminuciones de su concentración en el río por factores como: aumento de temperatura, procesos de degradación de la materia por parte de bacterias aerobias presentes en el medio acuático, por ende, conforme se presente mayor contaminación en el río, menor oxígeno disuelto (Montes et al, 2013). Cabe destacar que, si la contaminación es baja, los cuerpos de agua pueden fijar naturalmente los contaminantes sin que se refleje negativamente por un tiempo prolongado en la calidad de esta. La capacidad de autodepuración va ligada con las características del río, por tanto, ríos caudalosos o en presencia de rápidos con frecuencia, aumenta la capacidad de auto depurarse debido a la constante aireación natural que sufre el río producto de la turbulencia. (Bozal & Cabrezizo, 2016)

Un aspecto importante para destacar en el proceso de autodepuración y calidad de los ríos, son las condiciones ambientales externas, que influye positiva o negativamente en los procesos. Dentro de ello, se puede mencionar el cambio climático y su efecto en la calidad del agua. Según Monte et al (2013), eventos extremos como precipitaciones o sequías, así como el incremento en la temperatura promedio del aire como consecuencia del calentamiento global puede afectar la calidad del agua. La estrecha relación de temperatura del aire y temperatura del agua hace que sea una variable para considerar, por ser uno de los factores primordiales para la estabilidad de oxígeno disuelto y a su vez la capacidad de autodepuración de los ríos. Por ende, incrementos en la temperatura del agua, llevan por consecuencia reducción en el oxígeno disuelto.

2.1.2 Normativa Nacional

A nivel nacional, existe el decreto N 33903-MINAE-S Reglamento para la evaluación y Clasificación de la Calidad de Cuerpos de Agua Superficiales, el cual evalúa y clasifica los cuerpos de agua superficiales, estableciendo cinco categorías de clasificación y uso del agua, dependiendo de los resultados establecidos métodos fisicoquímicos como el índice holandés y clasificación biológica por monitoreo de organismos indicadores.

En lo referente al Sistema de Índice Holandés de valoración de calidad del agua Tabla 2, establece una asignación de puntajes de los parámetros de DBO, nitrógeno amoniacal, y porcentaje de saturación que representa el oxígeno disuelto en forma de porcentaje.

Tabla 2.
Puntajes asignados según Sistema de Índice holandés

Puntos	PSO (%)	DBO (mg/L)	N-NH₄⁺ (mg/L)
1	91 – 100	≤ 3	< 0,50
2	71 – 90 111 – 120	3,1 – 6,0	0,50 – 1,0
3	51 – 70 121 – 130	6,1 – 9,0	1,1 – 2,0
4	31 – 50	9,1 – 15	2,1 – 5,0
5	≤ 30 y > 130	> 15	> 5,0

Fuente: Adaptado de *Decreto Ejecutivo 33903-MINAE-S*, 2007

Finalizada la asignación de puntos de acuerdo con las concentraciones percibidas, se procede a sumatoria de puntos y asignación de clase de calidad de agua. Cada clase representa un color y una interpretación de calidad del agua (Tabla 3).

Tabla 3.
Asignación de clase de calidad del agua según Sistema Índice Holandés.

Clase	Sumatoria de puntos	Código de color	Interpretación de calidad
1	3	Azul	Sin contaminación
2	4 – 6	Verde	Contaminación Incipiente
3	7 – 9	Amarillo	Contaminación moderada
4	10 – 12	Anaranjado	Contaminación severa
5	13 – 15	Rojo	Contaminación muy severa

Fuente: Adaptado de *Decreto Ejecutivo 33903-MINAE-S*, 2007

2.2 Cambio Climático y su relación con las cuencas hidrográficas

Alteraciones en el proceso de evaporación y precipitación pueden tener implicaciones en los cuerpos de agua ya que el sistema climático es una variable fundamental para el ciclo hidrológico. El aumento de temperatura producto del cambio climático significaría la intensificación de la evapotranspiración de los cuerpos de agua y posibles cambios en la calidad del agua de estos (Herzog et al, 2012). Además, la temperatura del aire y agua tienen una estrecha relación (Montes et al, 2013). Toma una mayor relevancia, ya que la temperatura del agua la ser un factor importante en términos de calidad del agua en procesos físicos, químicos y biológicos, además de ser una variable relevante para las concentraciones de oxígeno presente en el agua. (Montes et al, 2013).

Dentro de posibles efectos que pueden ocasionar el cambio climático en climas calientes y secos para las cuencas hidrográficas se encuentran los aumentos de temperatura que produce disminución de caudal y escorrentía, generando consigo mayor concentración de contaminantes y aumento de carga orgánica. Para escenarios de cambio climático cuya variación genera precipitaciones más intensas, trae consigo afectaciones para aguas superficiales como es aumento de escorrentía, mayor erosión y transporte de sedimentos modificando la calidad del agua (Amay & López, 2015). Sumado a factores que contribuyen como el cambio de uso de suelo que aumenta las propiedades térmicas, incremento de escurrimientos, eliminación de zona boscosa en los alrededores de los ríos que implican afectaciones al ciclo hidrológico (García et al, 2007).

2.3. Modelación Ambiental

La calidad del agua de los ríos es un tema que abarca diversos factores hidrodinámicos del río y representa un tema fundamental a nivel ambiental, económico y social. El mismo se ha analizado por medio de modelaciones de calidad de agua para estudiar los procesos de autodepuración, ciclos naturales y como son afectados por la contaminación (Villalobos, 2008).

La modelación de la calidad del agua es una herramienta ambiental que permite aportar en la parte investigativa sobre problemas ambientales que se presentan en cuerpos de agua superficiales, el cual permite estudiar la autodepuración de un río (Echeverría, 2016). La modelación permite la representatividad y entendimiento del comportamiento del río, e implementar escenarios futuros de alteraciones ambientales que sirvan como línea base para efectuar acciones en pro de un mejoramiento del río (Cárdenas et al 2009).

Las diversas aplicaciones que permiten la modelación ambiental representan una herramienta importante en el ámbito ambiental, sin embargo, implica ventajas y limitantes que se deben considerar. Según (Buitrago, et al 2018):

Ventajas:

- Ayuda en las implementaciones de acciones de saneamiento y calidad de agua.
- Permite visualizar condiciones futuras.
- Permite visualizar puntos críticos.
- Permite un estudio de las características químicas presentes en el río.

Desventajas:

- Es necesario conocimientos de modelación con anterioridad.
- Presenta incertidumbres que no permiten una completa representación de la realidad.
- En muchos casos requiere gran cantidad de información de entrada.

2.3.1 Modelo QUAL2KW

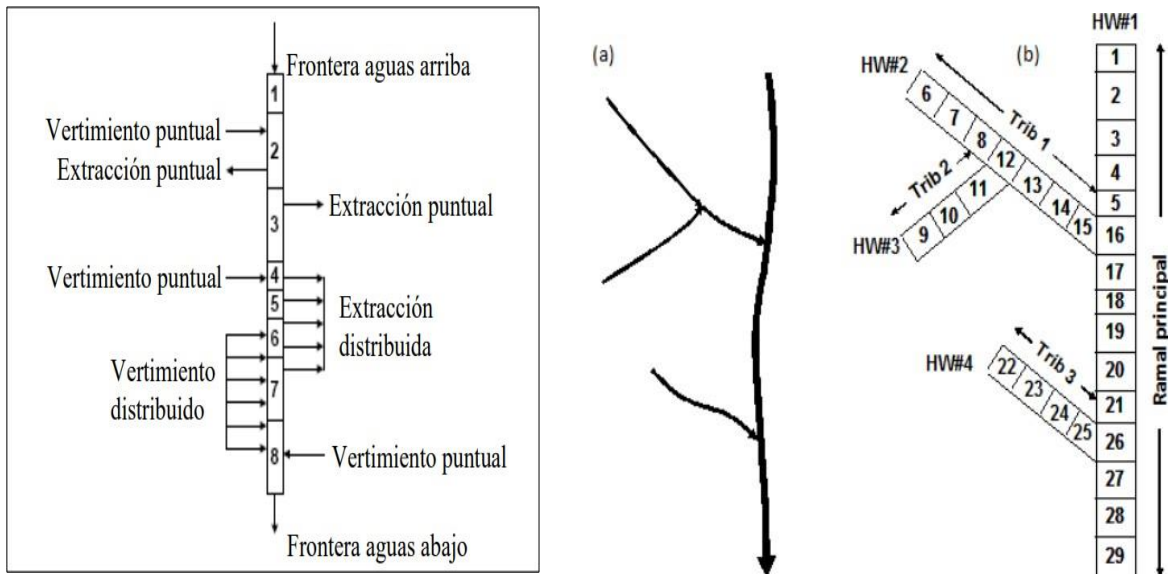
El modelo QUAL2KW es una herramienta que ha sido utilizada en diversas partes del mundo, como medio de planificación en cuanto a calidad de aguas. Identifica impactos de vertidos de contaminantes a ríos por medio del estudio de la autodepuración. El modelo fue desarrollado para la Agencia de Protección Ambiental (EPA) por medio de Chapra y Pelletier, posteriormente fue mejorada su versión en el 2008.

Su medio de visualización con el usuario modelador es la plataforma de Excel mostrado en el (Anexo 2) en el cual se ingresan los datos necesarios para la modelación. Dentro de sus características se encuentra, según Atuel (2016):

- Define descargas puntuales y no puntuales, tributarios, en un sistema fluvial unidimensional.
- El balance de temperatura es conforme a los datos meteorológicos.
- La Demanda Bioquímica de Oxígeno se representa como DBO lenta y DBO rápida oxidación.
- La reducción de luz se interpreta en relación con el fitoplancton, detritos y sólidos orgánicos.

El modelo requiere una distribución definida del área de estudio del río en el que se requiere establecer fronteras internas y externas. Las fronteras externas se refieren al límite establecido del área de estudio tanto en su parte superior como en su parte inferior **Figura 1**, seguidamente, las fronteras internas realizado propiamente en el área de estudio, se divide el río delimitado en segmentos a conveniencia, donde cada segmento representa un tramo del cuerpo del agua principal o contribuyente en donde el comportamiento del río sea homogéneo, en el momento donde cambie sus características, ahí se iniciará otro segmento. En cada uno se define la existencia de vertimientos puntuales, difusa y presencia de tributarios hacia el río principal. (Holguín, 2014)

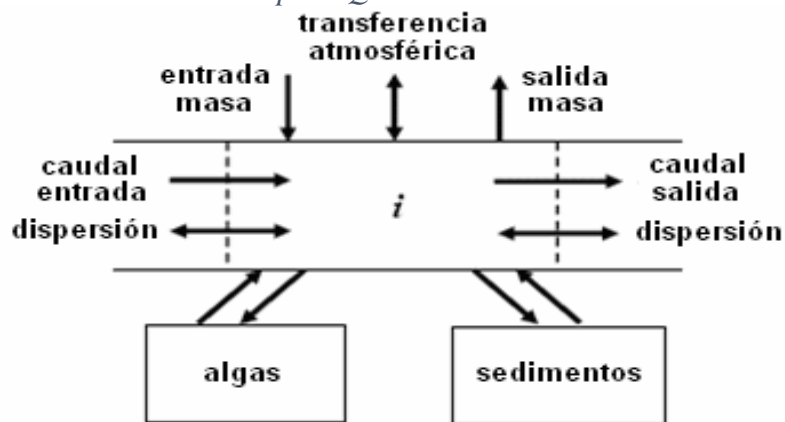
Figura 1.
Representación del río para el modelo QUAL2KW



Fuente: Holguín, 2014; Chapra, Pelletier & Tao, 2012

Cada segmento como se muestra en la Figura 2 considera los parámetros fisicoquímicos y biológicos del río en un balance de masa, e involucra procesos de advección dispersión, dilución, reacciones químicas, biológicas y nutrientes (Holguín, 2014).

Figura 2.
Representación de balance de masa para QUAL2KW

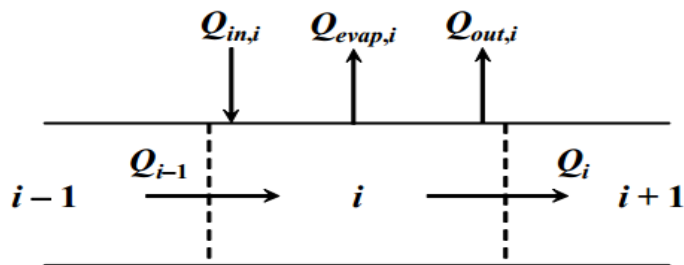


Fuente: Adaptado de EPA, 2007

Además, como se observa en Figura 3, se realiza un balance de flujo de la corriente para cada segmento, donde se considera el flujo de entrada de cada segmento aguas arriba, el flujo de entradas considerando los vertimientos, tributarios y fuentes puntuales y difusas, así como flujo de salida debido a fuentes puntuales, sumado a las pérdidas de evaporación. Así el flujo de salida de cada segmento es la diferencia entre el flujo de entrada y las ganancias menos las pérdidas de flujo por retiro y evaporación (Chapra, Pelletier y Tao, 2012).

Figura 3.

Representación de balance de flujo para QUAL2KW



Fuente: (Chapra, Pelletier y Tao, 2012).

El modelo permite predecir procesos de reaeración de los ríos que se modelan, por medio de las ecuaciones mostradas en la Tabla 4, que calculan el coeficiente de reaeración (k_a), midiendo la velocidad de transferencia de oxígeno atmosférico a oxígeno disuelto en el agua. Las características propias del río será el factor para elegir la ecuación apropiada para el cálculo de la aireación en el proceso de modelación (Castro, 2015).

Tabla 4.
Ecuaciones de tasa de reaeración de *QUAL2KW*

Ecuación	Ka (d-1 a 20°C)	Unidades
O'Connor y Dobbins (1958)	$Ka=3.93U^{0.5}$ $H^{1.5}$	U = m/s H = m
	0.305 m ≤ H ≤ 9.14 m 0.15 m/s ≤ U ≤ 0.49 m/s 0.05 d-1 ≤ Ka ≤ 12.2 d-1	
Churchill et al. (1962)	$Ka=5.026U^{0.969}$ $H^{1.673}$	U = m/s H = m
	0.61 m ≤ H ≤ 3.35 m 0.55 m/s ≤ U ≤ 1.5 m/s 0.000126 m/m ≤ S ≤ 0.002351 m/m 0.225 d-1 ≤ Ka ≤ 5.56 d-1	S = m/m
Owens et al. (1964)	$Ka=5.34U^{0.67}$ $H^{1.85}$	U = m/s H = m
	0.122 m ≤ H ≤ 3.35 m 0.0305 m/s ≤ U ≤ 1.52 m/s 0.000156 m/m ≤ S ≤ 0.0106 m/m 0.31 d-1 ≤ Ka ≤ 49.17 d-1	S = m/m
Tsivoglou y Neal (1976)	$Ka=0.3609\Delta H$ t	ΔH = m t = d
	para 0.028 m ³ /s ≤ Q ≤ 0.28 m ³ /s $Ka=0.1772\Delta Ht$ para 0.708 m ³ /s ≤ Q ≤ 85 m ³ /s $Ka=13566 US$	U = m/s S = m/m
Thackston y Dawson (2001)	$Ka = 0.000025(1 + 9F14) * \frac{U}{H}$	H = m U = m/s
USGS (pool-riffle)	$Ka=517(US)^{0.524} * Q^{-0.242}$ para Q < 0.556 m ³ /s $Ka=596(US)^{0.528} * Q^{-0.136}$ para Q > 0.556 m ³ /s	U = m/s Q = m ³ /s
USGS (Channel-control)	$Ka=88(US)^{0.313} * D^{-0.353}$ para Q < 0.556 m ³ /s $Ka=142(US)^{0.333} * D^{-0.66} * W^{-0.243}$ para Q > 0.556 m ³ /s	U = m/s Q = m ³ /s D = m W = m

Fuente: (Chapra, Pelletier y Tao, 2012).

Para el proceso de caracterización hidráulica, el modelo una vez obtenido los datos de flujo de cada segmento, ancho transversal, profundidad y velocidad, se puede calcular la hidráulica del río por medio de dos formas (Chapra, Pelletier y Tao, 2012).

- Rating Curves: por medio de ecuaciones y contemplando coeficientes

$$U=k*Q^m$$

$$H=c*Q^f$$

$$W=a*Q^b$$

$$c*k*a=1$$

$$f+b+m=1$$

Donde Q: caudal; U: velocidad; H: profundidad; W: ancho; k,c, a: constantes; f,b,m: coeficientes.

- Manning Ecuación: el cual simula una forma trapezoidal de la corriente.

Ecuación 1.
Ecuación de Manning

$$Q = \frac{S_o^{1/2} A_c^{5/3}}{n P^{2/3}}$$

(1)

Donde Q: caudal; So: pendiente del fondo; Ac: área transversal; P: perímetro mojado; n: coeficiente de Manning.

2.3.2 Composición del modelo Qual2kw

El modelo QUAL2KW lo conforma una serie de hojas electrónicas mediante la plataforma de Excel, descritas Tabla 5 , las cuales requieren datos específicos para replicar mediante modelación las condiciones del área de estudio.

Tabla 5.
Representación de las hojas de Excel requerida para QUAL2KW

Hojas del modelo en Excel	Descripción
QUAL2Kw	Información general del río a modelar, así como también definición de la dirección de las extensiones.
Headwater	Caracterización química y biológica de la cabecera del área de estudio, caudal entrante.
Downstream	Caracterización química y biológica del sector final del área de estudio.
Reach	Segmentación de la corriente en la cual incluye las variables químicas y biológicas, contantes hidráulicas, geográficas.
Air Temperature, Dew Point Temperature, Wind Speed, Cloud Cover, Shade	VARIABLES meteorológicas.
Hojas del modelo en Excel	Descripción
Light and Heat	Coefficientes para utilizar en relación con radiación solar, atmosférica y evaporación.
Point Sources	Información de ubicación, caudal y parámetros de calidad de fuentes puntuales de vertimiento.
Diffuse sources	Información de ubicación, caudal y calidad de fuentes difusas.
Rates	Parámetros cinéticos y velocidades de asentamiento de los constituyentes simulados por el modelo.
Fitness	Proceso para calibración de modelo.
Auto-calibration	Datos para modificar para realizar la calibración de modelo.
Hydraulic Data, Temperature Data, WQ Data, WQ Data min, WQ Dara max, Diel Data,	Información opcional de ubicación, caudal y calidad de los puntos de monitoreo sobre la corriente, valores medios de temperatura.

Fuente: Chapra, 2012

2.3.2.1 Datos requeridos por el modelo QUAL2KW

Los datos requeridos por el modelo determinar el comportamiento de la calidad del agua desglosados en la Tabla 6, son obtenidos por medio de investigación, medición en campo y análisis de laboratorio. La calidad y ajuste de la modelación en relación con la realidad, dependerá directamente de la calidad de los datos que le ingrese. Por lo tanto, si no se ingresa algún dato necesario, o se realiza supuestos de datos que no reflejen los datos reales, aumentará el error asociado a los datos obtenidos por el modelaje.

Tabla 6.

Datos generales requeridos para el modelo QUAL2KW

Datos	Datos requeridos	Importancia en el modelo QUAL2K
Geográficos	Latitudes, longitudes, distancias de río y segmentos	Georreferenciación de tramos
Flujo	Caudal	Caracterización del flujo
Topográficos	Profundidades, pendientes, velocidades, anchos, altitudes	Hidrodinámica del río
Parámetros físicos, químicos y biológicos de calidad del agua	Tabla 7	Caracterización bioquímica del modelo
Meteorológicos	Velocidad del viento Presión Humedad Temperatura atmosférica Radiación Solar (nubosidad) Sombra Temperatura de rocío	Caracterización del ambiente del sitio de estudio

Fuente: Arenas (2004); Chavarría (2018).

2.3.2.2 Parámetros fisicoquímicos y biológicos

Con respecto a los parámetros físicos, químicos y biológicos necesarios para la modelación, se deben de analizar del río principal, vertidos y tributarios, con el fin de caracterizar el comportamiento de la calidad del agua del río. Como se muestra en la Tabla 7, los análisis de ciertos parámetros se midieron propiamente en el campo y los demás en el laboratorio.

Tabla 7.

Parámetros fisicoquímicos y biológicos modelados por el QUAL2KW

Proceso para modelar	Parámetro	Unidad	Tipo de Análisis
Acidez- Alcalinidad	pH	Unidad de pH	Campo (fisicoquímicos)
Balance de calor	Temperatura	°C	
Balance de O ₂	Porcentaje de saturación	%	
Balance de O ₂	Oxígeno Disuelto	mg O ₂ /L	
Transferencia de calor o electricidad	Conductividad	µS/cm	
Materia Orgánica	DBO rápida y lenta	ug O ₂ /L	Análisis Químico (Análisis de Laboratorio)
Ciclo de nitrógeno, fosforo, Nutrientes, balance de OD,	Nitrógeno Orgánico	ug N/L	
	Nitrato, nitrito, amonio	ug N/L	
	Fosforo Orgánico e Inorgánico	ug P/L	
Neutralizar ácidos	Alcalinidad	[mg/L CaCO ₃]	

Fuente: Chapra, 2012

Los parámetros en la Tabla 7, cumplen funciones específicas en procesos de calidad de un río. Dentro de los principales procesos a analizar y su vinculación hacia la calidad del agua se menciona:

Oxígeno Disuelto (OD): Es el indicador principal de calidad del agua ya que es primordial en niveles óptimos para la vida acuática. Dentro de los procesos de aumento de OD en el agua se encuentra la fotosíntesis, aireación desde atmosfera; mientras que los causantes de disminución se encuentra la nitrificación, carga orgánica, respiración de plantas, y aumentos de temperatura (Monte, 2013).

Ciclo Nitrógeno: La nitrificación constituye una disminución del oxígeno disuelto presente en el agua, debido al proceso de oxidación del nitrógeno orgánico en amonio, nitrito y nitrato produciendo compuestos secundarios (Ros, 2011). Producto del tipo de vertidos de contaminantes hacia el río, la nitrificación puede aumentar su presencia y representar un problema en términos de disminución de oxígeno disuelto en el agua.

Demanda Biológica de Oxígeno (DBO): Es la medición de cantidad de oxígeno consumido por organismos heterotróficos presentes en el río, en la descomposición de la materia orgánica. En este proceso, los organismos disminuyen el oxígeno disuelto en el agua mientras descomposición y transformación de materia orgánica a inorgánica (Díaz, 2004).

Fósforo: Conforme mayor presencia de fósforo en el río, mayor tendencia a proliferación de plantas acuáticas, las cuales disminuyen el oxígeno disuelto en la respiración afectando la calidad del agua, además disminuye el aprovechamiento de luz en las profundidades. También es un indicador de cantidades de nutrientes del agua y proceso de eutrofización (Illana, 2014).

2.3.3 Calibración del modelo

Es el proceso de ajuste de los valores de los parámetros que da como resultado en la modelación preliminar. El procedimiento busca disminuir la incertidumbre de los datos asociados a la modelación y reflejar de forma más acertada las características observadas en la realidad (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2018).

Las formas empleadas para el proceso de calibración son diversas, que incluyen la aplicación de programas externos para cumplir dicho proceso. En el caso del modelo QUAL2KW, la calibración la incorpora dentro de sus opciones, mediante el algoritmo genético AG-PIKAIA, que realiza proceso análogo determinando los valores óptimos de los parámetros cinéticos entre los valores de cada parámetro analizado (Castro, 2015).

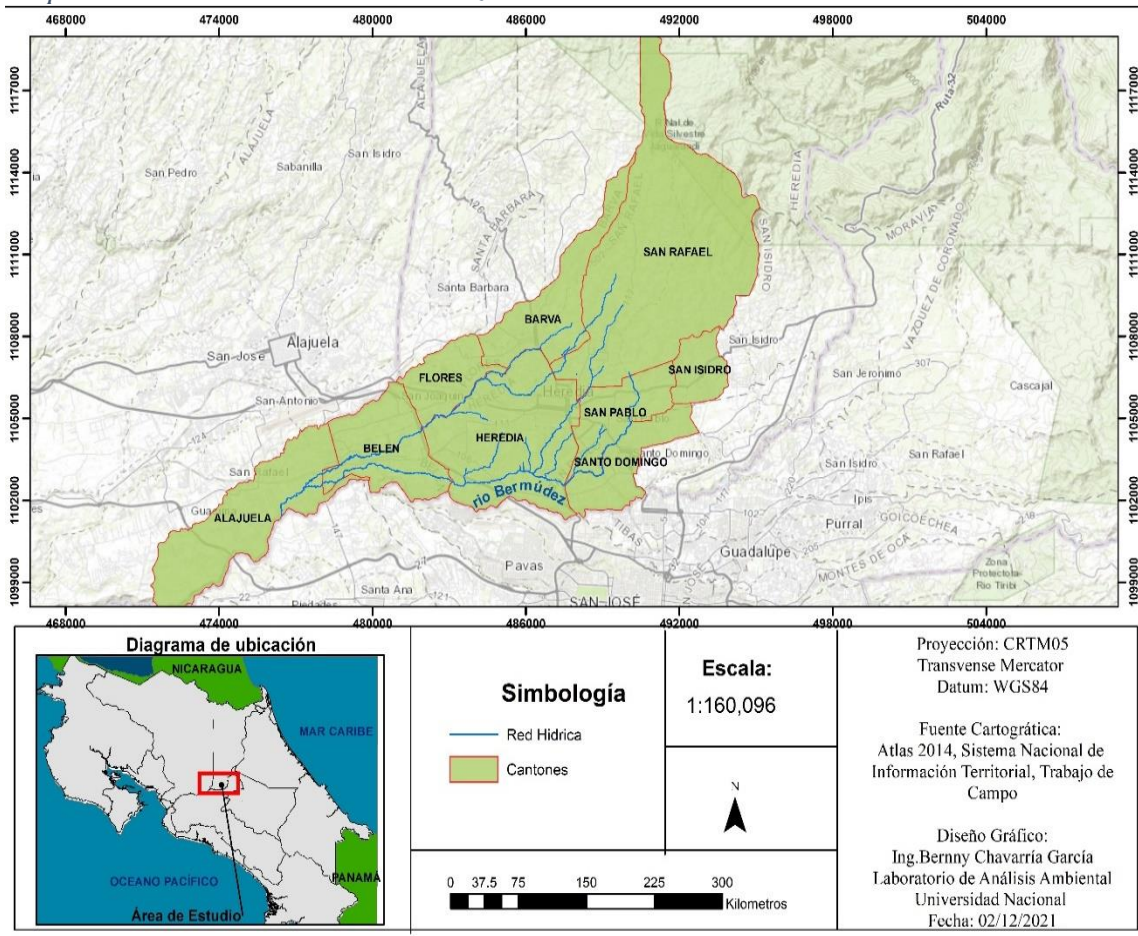
2.4 Microcuenca del río Bermúdez

El estudio de la calidad del agua por medio de la modelación del QUAL2KW es la microcuenca del Río Bermúdez, en la que, según Herrera, Rodríguez, Solís & Castro (2009), se ubica en las coordenadas 217 138 m, 225 863 m latitud norte y 513 707 m, 526 680 m longitud este, de cuadrícula Lambert norte Costa Rica, ubicadas en hojas topográficas Barva 3346-II, Abra (3345-I), escala 1:50000.

Se encuentra constituida Figura 4., por nueve cantones, distribuidas en dos provincias, de los cuales ocho son de la provincia de Heredia (San Pablo, Santo Domingo, Barva, Belén, Flores, Heredia, San Isidro y San Rafael) y uno de la provincia de Alajuela (San Rafael). Se añade a lo largo de la microcuenca, tributarios como río Turales, Quebrada Gertrudis, Quebrada la Guaria, río Burío, Quebrada Seca y río Pirro. Con respecto al uso de suelo, la microcuenca presenta una cobertura de 15.18 % de bosque, 10.83 % de pasto, 32.73 % de cultivo, 40.67 % de urbano y en menor porcentaje terrenos descubiertos (Hernando & Orozco, 2015).

En lo que respecta a la altitud, alcanza una máxima de 2 260 msnm y una mínima de 848 msnm en su desembocadura (Chaves, 2014). La microcuenca presenta una serie de problemas ambientales que repercuten en contaminación hacia el río, de los cuales se destacan el manejo de las aguas residuales domésticas y residuales que muchos en forma de vertido terminan en los ríos sin tratamiento alguno.

Figura 4.
Mapa Microcuenca del río Bermúdez



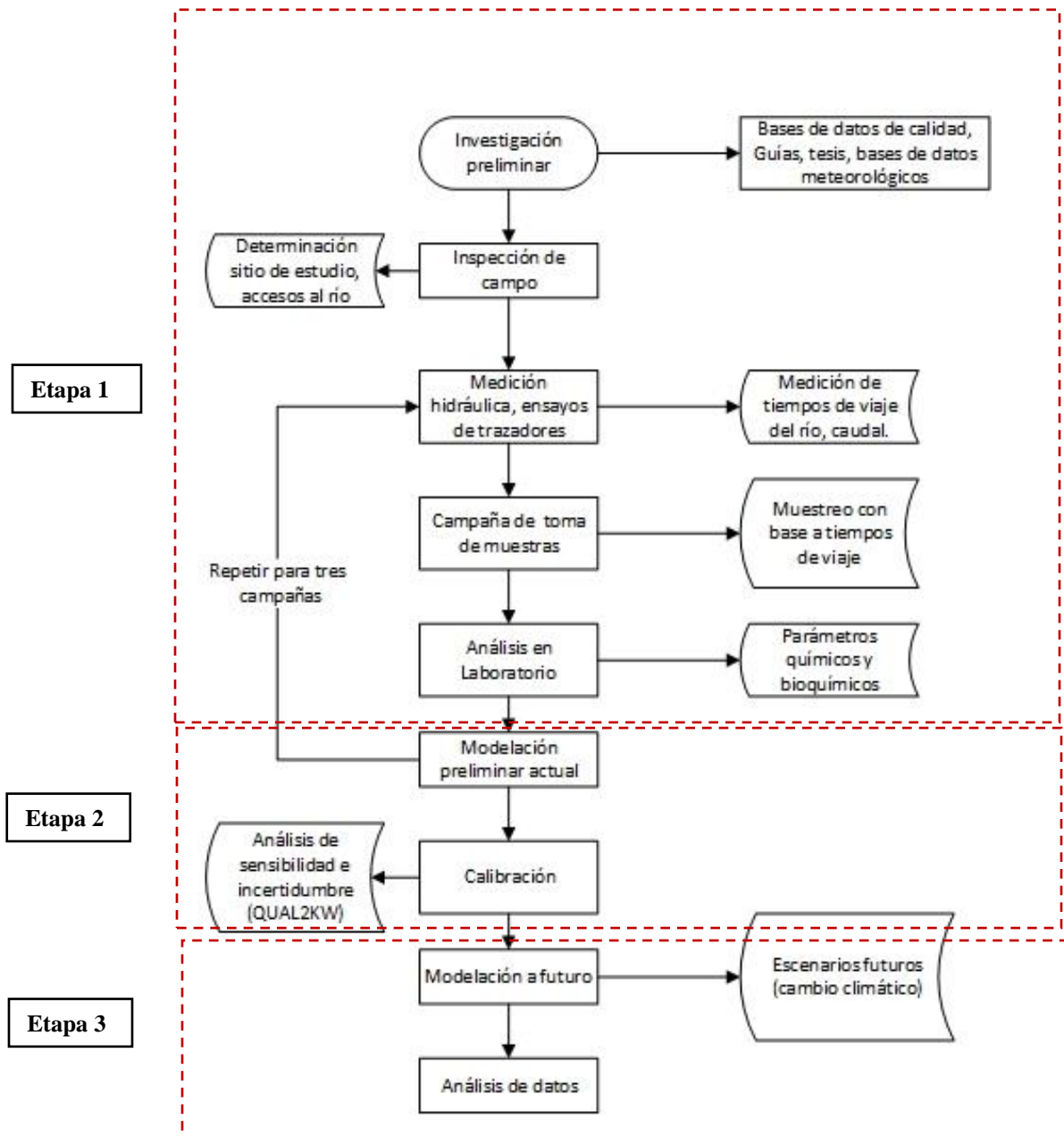
CAPITULO 3. Metodología

3.1. Proceso metodológico

El proceso metodológico que conlleva el QUAL2KW para completar la modelación se basa en conocimiento adquirido por diferentes fuentes que se destacan: guía del modelo QUAL2K A Modeling Framework for Simulating River and Stream Water Quality versión 2.12 (2012), proyecto de práctica profesional supervisada de Chavarría (2018) y descripción metodológica de la tesis de Arenas, G (2004).

En la Figura 5 se presenta en forma de resumen un diagrama de la secuencia metodológica que se implementó para la realización del proyecto, en la que se constituye de tres etapas, la primera se basa en el proceso de investigación y trabajo de campo, la segunda etapa en la toma y análisis de las muestras fisicoquímicas; la etapa tres en el proceso de modelado y ajuste de la calibración. Es importante mencionar que el presente proyecto se basa en un proyecto de investigación previamente establecido por el Laboratorio de Análisis Ambiental, en el cual se definió la utilización del modelo QUAL2KW como herramienta ambiental para la modelación de la microcuenca del río Bermúdez. En el mismo se definió dentro de su estructura metodológica el muestreo de nueve puntos a lo largo del río Bermúdez, para definir el comportamiento de la calidad a lo largo del río. Se consideraron tres campañas de muestreo debido a limitantes en términos de recurso humano y económico por parte del Laboratorio de Análisis Ambiental para abordar el proyecto. Dichas campañas se realizaron en cada época climática (lluviosa, seca y transición seca-lluviosa), para la modelación respectiva de los comportamientos del río y su variación con cada época climática.

Figura 5.
Diagrama del proceso metodológico para el proyecto



Se determinó la instrumentación necesaria para la realización de cada actividad de las etapas metodológicas, al igual que los productos esperados y las limitantes que se presentaron en el transcurso del proyecto en su fase metodológica (Anexo 3).

3.1.1. ETAPA 1. Determinar la hidrodinámica de la zona de estudio para la caracterización de los parámetros físico, químicos por medio de los muestreos, necesarios para la modelación.

En esta etapa se abordará los temas necesarios previos de investigación y trabajo de campo de reconocimiento y definición de área de estudio, para la posterior realización adecuada de campañas de muestreo:

3.1.1.1 Investigación previa

Se realizó una investigación previa bibliográfica para el entendimiento del funcionamiento del software y los requerimientos que este necesita para el proceso de modelación. En la misma incluye:

- Guía de funcionamiento del modelo: En su versión 2.12, creada en 2012 (A Modeling Framework for Simulating River and Stream Water Quality) el modelo QUAL2K, presenta una guía de la estructura base del modelo, datos requeridos y ecuaciones.
- Guía de medición de caudales, trazadores: Se realizó investigación de cómo, por medio de trazadores, se realiza mediciones para determinar comportamientos del flujo de un cuerpo de agua. A su vez, se investigó las diferentes formas de mediciones de caudales y cuáles son las más idóneas para el trabajo en campo.
- Tesis relacionadas sobre modelación con el QUAL2K: Se recopilaron tesis relacionadas que sirven de base y precedente para la realización del presente proyecto de investigación, además de un mejor entendimiento de los diferentes enfoques que se pueden dar con la modelación y cómo fue su realización con respecto a cada autor.

- Información de relevancia sobre el sitio de estudio: Por medio de tesis de investigación del sitio de estudio, bases de datos de programas como ARGIS, Google Earth, datos meteorológicos requeridos por el modelo proporcionados por el Instituto Meteorológico Nacional del sitio de estudio, se recopiló información de importancia para un mayor entendimiento del sitio de estudio ayudó en el proceso del proyecto.

3.1.1.2. Inspección de campo

Se requirió un proceso de reconocimiento del área de estudio, en la cual se visualizó y recopiló datos relevantes en cuanto a:

- Identificación de vertidos puntuales, difusos y ríos tributarios los cuales fueron considerados en el modelo QUAL2KW, recorriendo toda la microcuenca. Además, de la georreferenciación de cada uno, para la realización de mapas por medio de ARGIS. Se realizaron mediciones de caudales a los vertidos puntuales, posteriormente se categorizó según su aporte, para determinar los principales vertidos para la modelación. Para la medición de caudal, se consideró el método de Alvarado (2017) el cual es una de las formas más sencillas y precisas para la medición de caudal en la que consiste en depositar el vertido en un recipiente con volumen conocido y por medio de medición de tiempo de llenado se aplica la siguiente formula (pag10):

$$Q = \frac{V}{T}$$

Donde: Q =caudal(l/s); V=volumen(l); T= tiempo(s)

- Se identificaron los puntos que se trabajaron propiamente en el río Bermúdez, posteriormente se realizó en las siguientes fases: los muestreos, la determinación de los parámetros fisicoquímicos, las mediciones de caudales velocidades de viaje a través de trazadores.

Para la determinación de los puntos se consideraron los siguientes criterios

- Accesibilidad directa al río, sin implicar ningún peligro externo al momento de ingreso del equipo de trabajo.

- Cantidad de vertimientos cercanos hacia el río.
 - Influencia antropogénica alrededor del río, contemplando las principales poblaciones para determinar el impacto de contaminación que generan hacia el río.
- Se definieron las fronteras de cada área de estudio, es decir, limitó un inicio y un final en el río el cual fue el sector del río se enfocará el estudio basado en
 - Accesibilidad directa al río, sin implicar ningún peligro externo al momento de ingreso del equipo de trabajo
 - Influencia antropogénica alrededor del río, contemplando las principales poblaciones para determinar el impacto de contaminación que generan hacia el río.
 - Representar la mayor parte del río Bermúdez para determinar el grado de evolución de calidad del agua al transcurrir los principales poblados.
 - Abarcar las partes altas medias y bajas de la microcuenca para determinar puntos críticos.

3.1.1.3. Representación del área de estudio

Una vez que se delimitó el área de estudio, se determinó la segmentación del río según lo requerido por el modelo QUAL2KW según Figura 1, el cual busca realizar una división por tramos o segmentos de las partes del río en zonas donde el comportamiento hidrodinámico es similar por medio de reconocimientos en campo. Posteriormente, se realizaron mediciones al inicio y final de cada segmento seleccionado, se realizó un balance hidrogeológico en términos del caudal medido, un balance térmico con respecto a la temperatura y por último un balance de masa en términos de concentración de compuestos medidos. Todo lo anterior, se ingresó al modelo QUAL2KW, según requerimientos para la modelación. Además, se identifica por medio de trabajo de campo, las fuentes que ingresan al río como ríos o quebradas tributarias, así como los vertimientos puntuales que asociados a cada segmento.

3.1.1.4. Caracterización hidráulica

La caracterización hidráulica se realizó para cada campaña de muestreo por separado, debido a que las condiciones y características del río, cambian conforme a cada estación climática.

Para la realización de esta se consideró varios aspectos. En primera instancia la caracterización hidráulica, como parte de los cálculos hidrodinámicos se determinó mediante mediciones de campo en el río, molinete para definir caudales, y herramientas de geoprocésamiento. En el campo se tomaron datos de anchos transversal del cauce, perímetro mojado, profundidades, distancias entre cada segmento, longitudes de río y tributarios, uso de suelo, altitudes del río y tributarios según lo requerido para el modelo en la Tabla 6.

Posteriormente, se realizaron los cálculos hidráulicos por medio de la ecuación de Manning, para determinar el coeficiente hidráulico:

$$Q = \frac{S_0^{1/2} A_c^{5/3}}{n P^{2/3}}$$

En donde Q: caudal, S_0 : pendiente de fondo; AC: área transversal; P: perímetro mojado; n: coeficiente de Manning.

Para la medición de caudales se utilizó la medición de corrientes superficiales basado en metodología de Alvarado (2017):

- Con base al ancho del cauce en donde se realizó la medición de caudal, se realizó una división en secciones.
- Se determinó la velocidad del cauce en cada mitad de la sección. Las mediciones se realizaron al 30 % y al 60% de la profundidad del río para posterior realizar un promedio de velocidad para cada sección.

- Se midió las profundidades de los extremos de cada sección.
- Por último, se aplicó las ecuaciones

$$S = \frac{a + b}{2} \times L$$

Donde S = área de sección (m²), a= profundidad inicial (m), b= profundidad final (m), L= ancho de sección (m)

La fórmula final a aplicar en el proceso de medición de caudal es:

$$Q = V \times A$$

Dónde Q= Caudal (m³/s), A= Área (m²), V= velocidad (m/s)

A su vez, se determinó los tiempos de viaje del río los cuales, anteceden a la campaña de muestreo ya que es el proceso que determinó por medio de mediciones de velocidades de flujo, el tiempo en que una misma masa de agua pasa por los diferentes puntos de muestreo a lo largo del río, esto se realizó por medio de trazador. Posteriormente se realizaron los muestreos de aguas en los diferentes puntos del río según la velocidad calculada previamente y el tiempo exacto con el que se debe de tomar la muestra, siguiendo la misma masa de agua. Con lo anterior, se analizó las transformaciones físicas y químicas de la masa de agua a lo largo del río y que puntos críticos enfrenta ante los contaminantes presentes.

Para el cálculo de los tiempos de viaje se utilizó experimentación con trazadores en el campo, definiendo de esta forma la hidrodinámica del río. Los trazadores se basan en una sustancia añadida al cuerpo de agua en un punto específico para la medición de su concentración en otro punto aguas abajo (Rueda 2016). El trazador que se utilizó en este caso fue el cloruro de sodio (sal) por su valor económico y facilidad.

La secuencia metodológica del trazador se basó en:

1. Diluir una concentración conocida de cloruro de sodio, e inyectarlo en un punto frontera arriba del río.
2. Mediante equipos de trabajo, se realizar mediciones utilizando un conductímetro debidamente calibrado en un periodo de tiempo aguas abajo para determinar el tiempo que transcurre la sal diluida por los puntos de medición.
3. Procesar la información, para determinar tiempos de viaje, relacionando las mediciones de conductividad en relación con el tiempo transcurrido para llegar al punto indicado, conociendo de antemano la distancia desde el punto de inyección del trazador.

Además, en paralelo se realizó otros dos métodos que permitió determinar velocidades del río, los cuales se detallan a continuación:

- Trazador de corcho, el cual se realizó tres mediciones de un punto “a” a un punto “b” del río, para determinar el tiempo en transcurrir una distancia conocida. Las mediciones se realizaron en los segmentos previamente seleccionados, donde los comportamientos de velocidades presentaban variaciones.
- Además, simultáneamente, mediciones con molinete automático, dando velocidades del agua en tiempo real por medio del movimiento de la hélice, realizando tres mediciones por punto para determinar un promedio. Los puntos de medición eran los mismos de trazador de corcho para posteriormente comparar las metodologías implementadas y brindar datos más precisos de tiempos de viaje del río.

3.1.2. ETAPA 2. Realizar un ajuste del modelo QUAL2KW de los principales parámetros fisicoquímicos para la obtención de un menor nivel de incertidumbre y mejor representatividad.

3.1.2.1 Campañas de toma de muestras

Se realizaron tres campañas de muestreo en tres épocas del año, de los vertidos, tributarios seleccionados y del río principal para determinar en el laboratorio la concentración de los parámetros fisicoquímicos, Tabla 8.

Tabla 8.
Campañas de muestreos en el río Bermúdez

Fecha	Campaña	Estación Climática
11 de octubre, 2019	I	Transición lluviosa-seca
27 de abril, 2020	II	Seca
6 de junio, 2020	III	Lluviosa

La toma de muestras puntuales que se realizaron en el río principal siguiendo los procedimientos establecidos por el procedimiento PRT-012 del Laboratorio de Análisis Ambiental, el cual se basa a su vez en lo establecido para la recolección de muestras del Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater 27rd edition 2017.

En lo referente a las consideraciones para el muestreo de ríos, se destacan:

1. Elección de un punto de muestreo idóneo, representativo, evitando natas, zonas sedimentadas o estancadas. Además, a una distancia prudente de la orilla del río.
2. Realizar tres lavados del recipiente de toma de muestra
3. Sumergir el cuello de la botella a una profundidad de 15 cm a 30 cm.
4. Se destapa y llena el recipiente.
5. La muestra se toma con la boca del frasco en contracorriente.
6. Por último, se almacena en frío. 6 °C o menos,

Para muestras tomadas en los vertidos puntuales, se destacó las siguientes consideraciones:

1. El punto de vertido debe ser representativo al agua residual de origen.

2. Debe presentar una caída de agua, evitando que se contamine la muestra con suciedad externa que no forme parte del agua residual de origen.
3. Realizar tres lavados del recipiente de toma de muestra.

Las muestras se recolectaron y se transportaron en hielera a 6 un ambiente frío, sin superar los 6°C, hasta el laboratorio para su posterior análisis de parámetros correspondientes. Los recipientes utilizados para la toma de muestras son a base de polietileno de alta densidad.

Se tomaron muestras de aguas en diferentes puntos en tiempos definidos considerando los cálculos de tiempos de viaje calculados anteriormente, a lo largo del área de estudio, esto con el fin de muestrear una misma masa de agua en todo el recorrido. Para ello, previamente se coordinó con equipos de trabajo de campo, capacitando en la forma adecuada y precisa para la toma de muestras (tiempos de toma de muestra y acondicionamiento de las muestras en hieleras). Lo anterior se realizó para minimización de errores humanos que alteren las condiciones de muestras y el error en toma de muestras que aumenten la incertidumbre del modelo. Algunos parámetros fisicoquímicos requeridos por el modelo se midieron en campo (Tabla 9).

Tabla 9
Parámetros medidos en campo para el modelo QUAL2KW.

Proceso para modelar	Parámetro	Unidad	Tipo de Análisis
Acidez- Alcalinidad	pH	Unidad de pH	Campo (fisicoquímicos)
Balance de calor	Temperatura	°C	
Caudal	Cantidad de agua	m ³ /s	
Balance de O ₂	Porcentaje de Saturación	%	
Balance de O ₂	Oxígeno Disuelto	mg/L O ₂	

3.1.2.2 Análisis de muestras

Se procedió a llevar las muestras al Laboratorio de Análisis Ambiental de la Universidad Nacional, para su posterior análisis químico según los procedimientos de laboratorio respectivos basados en los métodos de análisis del libro *Standard Methods for Examination of Water and Wastewater*, 27rd edition 2017 para determinar los parámetros necesarios para el modelo QUAL2KW (Tabla 10). Los métodos de análisis de laboratorio referente a cada parámetro se muestran en (Anexo 4).

Tabla 10

Análisis en laboratorio de los parámetros químicos requeridos por el modelo

Tipo de análisis	Proceso que modelar	Parámetro	Unidad
Análisis Químico	Materia Orgánica	DBO rápida y lenta	ug O ² /L
	Ciclo de nitrógeno, fosforo, Nutrientes, balance de OD,	Nitrógeno Orgánico	ug N/L
		Nitrato, nitrito, amonio	ug N/L
		Fosforo Orgánico e Inorgánico	ug P/L
	Neutralizar ácidos	Alcalinidad	[mg/L CaCO ₃]

3.1.2.3 Modelación preliminar

Con los datos de Tabla 7 obtenidos en la etapa 1 y 2 por trabajo de campo, análisis de laboratorio, investigación de datos requeridos; se procedió a incluirlos en el modelo QUAL2KW con base a lo establecido en la Tabla 5. Posteriormente, se realizó la modelación preliminar de las condiciones actuales del río en cada campaña analizada, la cual muestra resultados de comportamiento de los diferentes parámetros analizados.

3.1.3.4 Calibración del modelo

En primera instancia se asignó un peso a cada variable en la hoja de cálculo Fitness, en este caso, se le asignó un peso mayor de importancia a la DBO y al Oxígeno Disuelto por la naturaleza del proyecto. En la hoja Rates se definió las constantes cinéticas a modificar y a definir el modelo de aireación que más se ajuste a las características del río. Posteriormente, se procede a incluir la información requerida de las campañas de muestreo, y teniendo en cuenta que el modelo QUAL2KW tiene la opción de realizar la calibración automática, se procedió a calibrar el modelo. Una vez finalizada la calibración se obtienen resultados que se pueden visualizar en forma de grafica de los parámetros modelados ajustados.

Cabe señalar que dicha calibración, fue el resultado de la modelación definitiva del escenario actual, y se obtendrá en este proceso, tres calibraciones, una por cada campaña de estación climática (transición, seca y lluviosa).

3.1.3 ETAPA 3. Realizar la modelación en el QUAL2KW bajo los escenarios actual y futuro contemplando las variaciones de cambio climático para la estimación del cambio en el proceso de autodepuración del río.

3.1.3.1 Modelación en condiciones futuras

Una vez el modelo ajustado para cada campaña, desde ahora llamado escenarios base, se procedió a generar para cada campaña dos modelaciones a futuro llamadas escenario 1 y escenario 2 que corresponden a 2050 y 2080 respectivamente en la Tabla 11. En este proceso, se modificó ciertos datos en los escenarios base y se volvió a realizar la corrida de la modelación para determinar la existencia de afectaciones en parámetros importantes de calidad del agua.

Los aspectos considerados para los escenarios a futuro se detallan a continuación:

- Temperatura del aire-agua: Se modificó los datos de temperatura del aire y temperatura del agua, considerando los datos de aumento de temperatura de aire que se estiman para el 2050 y 2080 proporcionados por el informe de escenarios

de cambio climático regionalizados para Costa Rica, del Instituto Meteorológico Nacional (2012), para la región donde se ubica el área de estudio. Se estimó una relación de temperatura aire-agua, mediante un historial de base de datos recolectados por estaciones meteorológicas cercanas al área de estudio que muestran el comportamiento de la temperatura del aire durante veinte años, y teniendo una base de datos de temperatura del agua en las distintas estaciones climáticas, se calculó una relación temperatura agua-aire. Con ello, se puede estimar el aumento de temperatura del agua con relación a la estimación de aumento del aire que se prevé en el estudio del IMN a causa del cambio climático.

- Se modificó los datos de caudales actuales de cada campaña, por medio ecuaciones de balance hídrico a largo plazo para la microcuenca, con el método de Curva de Recesión (Poveda et al, 2002), en donde se estima el caudal mínimo soportado para la microcuenca en cada estación climática, considerando información de datos históricos de precipitación proporcionados por IMN.
- Modificación de aumentos de carga orgánica en escenarios 1 y 2 considerando supuestos de aumento de población lo que incrementa la presencia de vertimientos y su contaminación asociada, además de las limitadas acciones ambientales por parte de las instituciones pertinentes para manejar la problemática de contaminación de los ríos.

Tabla 11.
Escenarios de modelaciones para el modelo QUAL2KW

Escenarios	Año	Temperatura aire	Caudal	Carga Orgánica
Escenario actual	2019-2020	Datos actuales	Datos actuales	Datos actuales
Escenario 1	2050	+ 1,91 °C	0,305	+10%
Escenario 3	2080	+ 3,36 °C	0,258	+30%

3.1.3.2 Análisis de datos

Se procedió finalmente a realizar un documento generador, en el que incluye los análisis comparativos de las modelaciones calculadas por el modelo ambiental QUAL2KW, de los escenarios base de las tres estaciones climáticas (lluviosa, seca y transición seca-lluviosa), con su respectiva modelación de los escenarios futuros 1 y 2 (2050 y 2080) considerando los cambios atmosféricos, condiciones futuras de temperatura aire y agua, modificación de caudales y carga orgánica.

El análisis de las variaciones de las modelaciones por medio de la herramienta Minitab, determinó comportamientos y puntos críticos del oxígeno disuelto y otros parámetros en la autodepuración del río. Se llevó a cabo un análisis de correlaciones de los parámetros, además de asociar los puntos críticos a posibles causantes y focos de contaminación y cómo varía el comportamiento de los parámetros de calidad del agua ante escenarios de cambio climático previstos para futuro.

CAPITULO 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 ETAPA 1

4.1.1 Caracterización física de la microcuenca

Por medio del trabajo en campo realizado en el río Bermúdez, se detectaron una serie de problemas ambientales que experimenta dicha microcuenca. En Figura 6; se puede observar en su mayoría casas que se ubican en las orillas del río, invadiendo los 10 metros de distancia hacia el cauce del río, área de protección que deben respetarse según el artículo 33, de la Ley Forestal N° 7575. Las casas, debido a sus ubicaciones, presentan la dificultad de tener un tanque séptico, lo que provoca que se descarguen las aguas residuales de los hogares al cauce del río, al ser la opción más práctica. Además, se observa con frecuencia, alcantarillado pluvial con salida hacia el río, donde se descarga de aguas residuales producto de conexiones ilícitas. Dicha realidad se observa a lo largo de toda la microcuenca, razón por la cual, unos de los principales problemas de contaminación de aguas residuales en la microcuenca del río Bermúdez, son ocasionados por las conexiones ilegales de tuberías que descargan aguas grises y negras hacia el río.

Figura 6.

Infraestructuras ubicadas a la orilla del río Bermúdez.



Como se observa en la foto Figura 7., las aguas jabonosas en su mayoría producto de las conexiones ilegales mencionadas anteriormente, se acumulan principalmente en los canales estrechos que presenta el río, donde la velocidad del agua disminuye. La espuma se multiplica a causa de la turbulencia que se produce por caída de pequeñas cascadas y por las zonas de rápidos del río, afectando directamente el principio de autodepuración natural de los contaminantes del río, generando impedimento de paso de la luz a través del agua, afectando directamente el proceso de descomposición de materia orgánica, eliminando los organismos que facilitan la remoción de materia orgánica e impidiendo la transferencia de OD llegando a condiciones anoxias impidiendo la vida acuática (Brand, 2019).

Figura 7.

Contaminación de aguas residuales hacia el río Bermúdez.



Otra problemática recurrente a lo largo del río es la contaminación de residuos sólidos, como se observa en la Figura 8 latas de zinc, bolsas de basura, electrodomésticos, muebles, así como focos de contaminación de residuos sólidos que ocasiona una acumulación importante de focos de contaminante de residuos, reflejando una mala cultura ambiental por parte de las comunidades que abarcan las cercanías al cauce, además de falta de mayor acción por parte de las instituciones públicas que le competen enfrentar dichos problemas.

Figura 8.

Focos de contaminación de residuos sólidos en el río Bermúdez.



4.1.2 Caracterización de la cuenca

Producto de las inspecciones en campo realizadas para definir el área de estudio en la microcuenca del río Bermúdez, se pudo apreciar Figura 9 la variabilidad en la morfología del río, y cómo esto implica en el comportamiento y la hidrodinámica de este.

En la parte alta Figura 9., se aprecia afloramientos de roca sólida en el cauce del río, lo que genera turbulencia y movimiento frecuente del agua debido al choque con las rocas, mayores caídas debido a su mayor pendiente en las partes altas que produce una aireación mayor (Arenas, 2004). Se observa mayor presencia de zonas con vegetación y cultivos en la parte alta, en consecuencia, el río Bermúdez está menos influenciada de vertidos y tributarios en comparación con la parte media y baja de la microcuenca.

Figura 9.

Parte alta de la microcuenca del río Bermúdez.



La parte media como se observa en la Figura 10, parte de su morfología fluvial es tipo cañón, lo que repercute en la hidrodinámica del río, aumentando las velocidades del agua y favoreciendo la aireación natural (Guzmán et al, 2018). Además, presenta poco afloramiento de material rocoso, modificando las condiciones hidrodinámicas principalmente aumento de velocidades, al no generar obstrucción de material rocoso a la corriente del río (Tapia et al, 2012). Con respecto a la actividad antropogénica en la parte media de la microcuenca, se presenta un aumento en las zonas límites del cauce en relación con la parte alta, provocando mayor contaminación debido a las descargas de las aguas residuales y los ríos y quebradas tributarias que suman caudal y contaminación al cauce, además de presencia de aguas jabonosas que, junto con las características del cauce, ayuda para la propagación de la espuma en el río.

Figura 10.
Parte media de la microcuenca del río Bermúdez



En lo referente a la parte baja, en la Figura 11. con la acumulación de contaminación de la parte alta y media de la cuenca, influenciada por descargas residuales y tributarios como por ejemplo la Quebrada la Guaria, presenta una variabilidad en el ancho transversal del río, donde puede llegar de los cuatro a los diez metros, lo que representa una variación del comportamiento de las velocidades del río, profundidades y tiempos de retención que inciden que inciden en la capacidad de arrastre del río, transporte de sedimentos y condiciona la morfología de este.

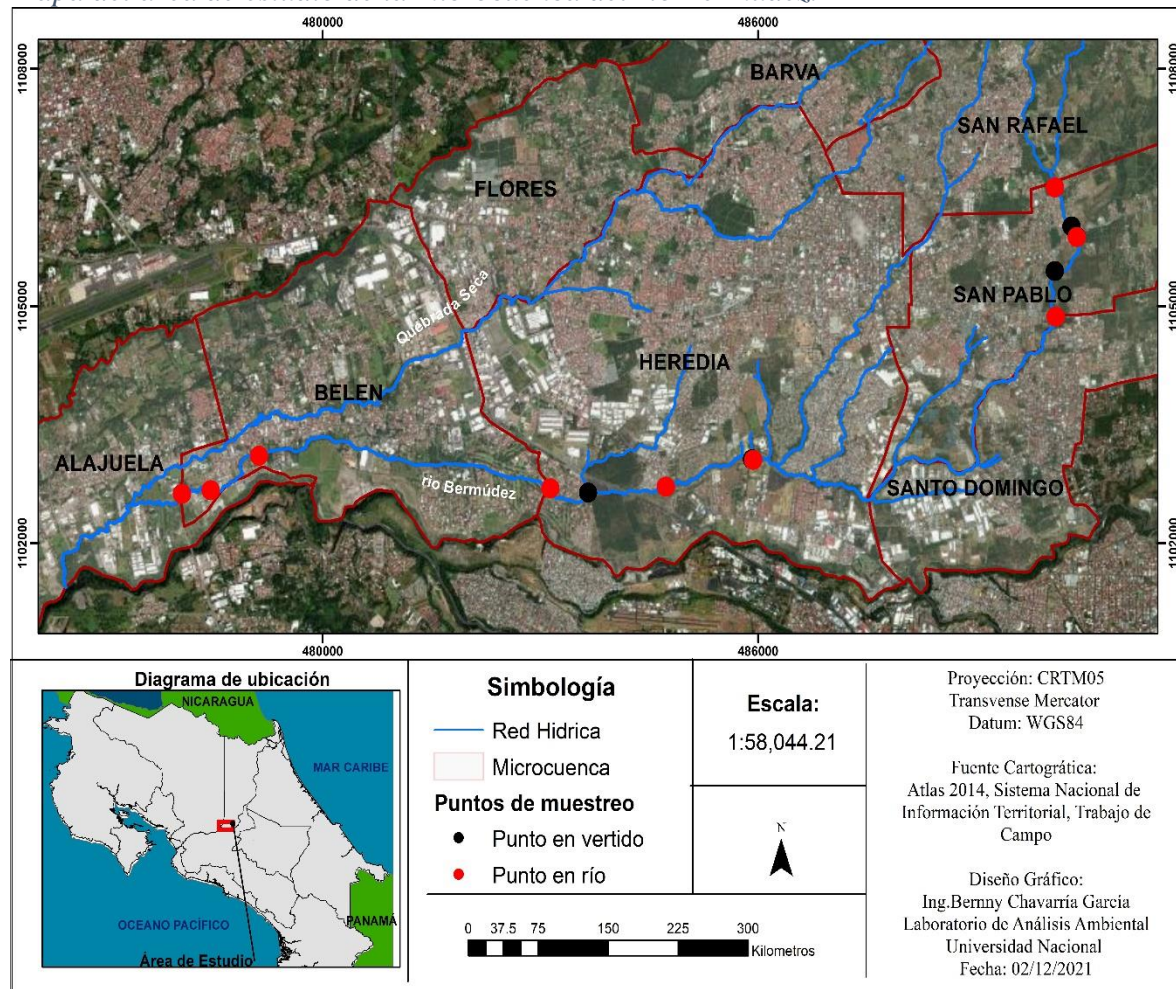
Figura 11.
Parte baja de la microcuenca del río Bermúdez



Se definió el área de estudio de la microcuenca del río Bermúdez, que abarca cantones como San Rafael, San Pablo, Heredia y Belén. El río Bermúdez dentro del área de estudio, abarca 17,5 kilómetros de recorrido desde el primer punto de muestreo hasta el último. El área de estudio abarca desde el primer punto rojo ubicado en el cantón de San Rafael hasta el último punto rojo ubicado en el límite entre el Cantón de Belén y Alajuela. En la Figura 12, se muestran con marca roja, los puntos de muestreo en río considerados para el proyecto, se distribuyeron de forma equidistante a lo largo del área de estudio para estudiar la variabilidad y comportamiento del río a lo largo del recorrido por los pueblos más importantes. Los puntos negros, son los cuatro vertidos considerados y una quebrada para un total de cinco “fuentes puntuales” que se incorporaron para el modelo QUAL2KW.

Figura 12.

Mapa del área de estudio de la microcuenca del río Bermúdez.



Una vez definida el área de estudio, se establecieron 9 puntos de muestreo a lo largo del área de estudio, como se muestra en Tabla 12, dividida en tres zonas de muestreo por cada parte de la microcuenca, los cuales abarca los cantones de San Rafael, San Pablo, Heredia y Belén, todos de la provincia de Heredia. Los sitios de muestreo se definieron debido a su accesibilidad hacia el río y su equidistancia, además considerando puntos estratégicos para determinar los impactos de contaminación hacia el río de vertidos importantes y tributarios. Cada sitio de muestreo se le asoció un código para un mejor procesamiento de los datos y mayor rapidez de reconocimiento de los puntos.

Además, se obtuvo información geográfica latitud, longitud y perfil de elevación asociada a cada punto de muestreo, como se aprecia en Anexo 5, mediante herramientas de procesamiento geográfico como Argis y google earth, dicha información es necesaria para el modelo para geo referenciar el área de estudio y la variación de elevación del río.

Tabla 12.

Puntos de muestreo en el área de estudio del río Bermúdez

Parte de microcuenca	Punto	Descripción sitio	Código	Cantón	Distrito
Alta	Inicial	Puente en Suiza, San Rafael	I1	San Rafael	San Rafael
	Medio	Puente en San Pablo	I2	San Pablo	San Pablo
	Final	Parque Quintana Sur	I3	San Pablo	San Pablo
Media	Inicial	Sede Benjamín Núñez, UNA	M1	Heredia	Ulloa
	Medio	Puente en Ulloa	M2	Heredia	Ulloa
	Final	Puente Los Golfistas, Cariari	M3	Heredia	Ulloa
Final	Inicial	Puente, Belén centro	F1	Belén	Asunción
	Medio	Barrio Escobal	F2	Belén	Asunción
	Final	Puente, cerca Fedefutbol	F3	Belén	Asunción

Producto de la medición de caudales tipo volumétrico, como se observa en Anexo 6, de los principales vertidos o afluentes que presentaba el área de estudio, se determinaron los cinco principales a considerar para la inclusión en el modelo QUAL2KW como “fuentes puntuales”. En Tabla 13 se destacan los vertidos los cuales están ubicados tres en la parte alta de la microcuenca y dos en la parte media de esta; cabe mencionar que la parte baja en sectores de Belén, no se consideró ningún vertido debido a su poco aporte en términos de caudal, por tanto, no eran relevantes.

Tabla 13.

Puntos de muestreo de vertidos para la microcuenca del río Bermúdez

Parte de microcuenca	Punto	Código	Cantón	Distrito
Alta	Vertido tubo pluvial	IV1	San Pablo	San Pablo
	Quebrada sin nombre	IV2	San Pablo	San Pablo
	Vertido tubo de alcantarilla	IV3	San Pablo	San Pablo
Media	Vertido en Veterinaria, UNA	MV1	Heredia	Ulloa
	Quebrada la Guaria	MV2	Heredia	Ulloa

4.1.3 Mediciones en el río Bermúdez

Se llevó a cabo un proceso de segmentación del río, según lo expuesto en Figura 1. El proceso se realizó mediante la identificación de tramos con comportamientos similares en el río, por lo tanto, cada segmento representa un sector del río con condiciones con muy poca variabilidad, lo cual permitió medir en un punto específico de cada segmento y tener una representatividad en su totalidad.

Con respecto a la realización de experimentos con trazadores para la evaluación de la velocidad de transporte del río en sus diferentes segmentos se realizó con dos tipos métodos de medición de manera simultánea, trazador por flotadores de corcho y medición con

molinete, para realizar una comparativa de perfiles de velocidades del río y tener un sistema de tiempos de viaje para el proceso de modelación más preciso.

Como se observa en Figura 13. se consideró la medición de trazador por flotadores de corcho realizando tres mediciones de velocidades de un punto “a” un punto “b” en los diferentes segmentos previamente seleccionados para una estimación promedio de las velocidades de cada segmento,

Figura 13.

Medición con trazador flotador en el río Bermúdez.



Además, para tener una comparativa de dos métodos distintos de forma que fuera más representativo el perfil de velocidades del área de estudio del río Bermúdez, se trabajó de manera simultánea en el mismo punto donde se realizó las mediciones con trazador por flotador, con mediciones con molinete automático Figura 14., a lo largo de la línea transversal, para considerar las distintas velocidades que presenta el río.

Figura 14.

Medición por molinete para perfil de velocidades en el río Bermúdez.



Como se observa en la Figura 15. se llevó a cabo un total de 9 mediciones de caudales a lo largo del área de estudio para cada campaña, utilizando la metodología propuesta por Alvarado 2017, se contempló sitios estratégicos de medición para ver impactos en caudal de afluentes identificados de vertidos y tributarios.

Figura 15.
Medición de caudales en el río Bermúdez.



Con respecto a los muestreos, como se observa en la Figura 16., se realizaron con base a los puntos establecidos en las Tabla 12 y Tabla 13 respectivamente, realizadas en tres campañas de muestreo, con los instrumentos y recipientes de muestreo expuestos en Anexo 7, para los parámetros fisicoquímicos requeridos por el modelo QUAL2KW. Para la hora de toma de muestras y coordinación de los sitios propuestos, se realizó con base a los resultados de los perfiles de velocidades de los tiempos de viaje, en los cuales se definieron una hora en específico siguiendo con el objetivo de muestrear siempre una misma masa de agua a lo largo del río.

Figura 16.
Campaña de muestreo en el río Bermúdez.



4.1.4 Parámetros fisicoquímicos

Con respecto a los resultados obtenidos en las tres campañas de muestreo, se puede apreciar que en términos de oxígeno disuelto las concentraciones promedio de los puntos muestreados en la primera campaña Tabla 14, disminuyeron en relación con la segunda campaña Tabla 15 con 5,58 mgO₂/l y 4,40 mgO₂/l y respectivamente. Este factor puede estar ligado en la disminución del caudal en la época seca, el cual pasó de un caudal promedio de 0,60 m³/s en la primera campaña a 0,27 m³/s en la segunda campaña, lo cual implica disminución de la dilución del agua, trayendo consigo un aumento de las concentraciones de contaminantes en el agua todo lo anterior provocando una disminución en el oxígeno disuelto. (Montes et al, 2013). Ya para la tercera campaña, Tabla 16 se observa una la mayor concentración de OD en relación con las otras campañas con un 6,72 mgO₂/l.

Al ser un periodo de época lluviosa, aumenta el caudal de los ríos, por ende, una mayor turbulencia de las aguas, lo que ocasiona aireación natural del río y un aumento del oxígeno disuelto (Muñoz et al, 2015). Es importante destacar la caída considerable de oxígeno disuelto en el punto M3 en todas las campañas, representando un punto crítico de concentración de OD, coincidiendo con el punto de descarga de la Quebrada la Guaria el cual presentó concentraciones promedio de OD en las tres campañas de 2,10 mgO₂/l y el vertido de mayor aporte en términos de caudal de los vertidos considerados en el área de estudio.

La temperatura tuvo niveles muy similares en las épocas climáticas (transición lluviosa-seca, seca y lluviosa), el promedio estuvo alrededor de 22,5 °C, importante a considerar ya que a pesar de tener mediciones en épocas climáticas distintas no se mostró cambios importantes.

En lo que respecta a los parámetros directamente relacionados a la carga contaminante, los Sólidos Suspendidos Totales (SST) definidos como la materia orgánica que se encuentra suspendida en la corriente y contiene material tanto orgánica como inorgánica (Torres & Lozano, 2017), y los datos de DBO lenta y DBO rápida que corresponden a los tiempos de oxidación lento y rápido o degradación de la materia orgánica (Bedoya & Lozano, 2019); presentan una tendencia de aumentar las concentraciones en época seca, una situación esperable considerando que por lo general, la dinámica de la hidrodinámica de la cuenca hace que presente una reducción de los caudales y la capacidad de dilución. (Montes et al, 2013).

Tabla 14.

Resultados de parámetros fisicoquímicos de la primera campaña de muestreo (época transición)

Código	SST (mg/l)	pH	Temperatura del agua (°C)	Oxígeno Disuelto (mg/l)	Porcentaje de saturación (%)	Alcalinidad (CaCO ₃ mg/l)	Fósforo Total (mgPO/l)	DBO Soluble (mg/l)
I1	6,12	7,4	21,3	7,70	101,4	43,55	0,00	13,02
I2	5,31	7,9	21,7	6,30	92,5	36,73	0,30	14,74
I3	3,80	8,0	21,2	7,31	97,5	58,40	0,51	24,94
M1	12,20	8,0	20,8	5,11	64,4	134,62	0,00	67,73
M2	25,64	7,3	22,1	5,00	70,3	150,86	0,41	91,18
M3	21,68	7,7	22,9	2,80	36,9	160,36	0,00	94,50
F1	10,91	7,8	23,2	6,15	81,9	152,44	3,84	55,65
F2	9,54	7,4	22,8	5,36	92,6	151,54	3,43	41,20
F3	5,66	7,8	23,1	4,52	59,9	151,45	3,52	44,63
Código	DBO lenta (mg/l)	DBO rápida (mg/l)	NO3 (ug/Nl)	NO2 (ugNl)	Conductividad (µS/cm)	NH4 (ugN/l)	Fósforo soluble (mgPO/l)	Nitrógeno Orgánico (ug/l)
I1	20,56	14,46	1926,02	42,63	134,80	57,60	0,42	1973,74
I2	21,38	18,25	2194,84	24,02	163,22	23,21	0,67	1757,94
I3	42,54	24,54	2531,29	0,35	189,50	29,67	0,37	1438,69
M1	136,27	45,91	836,60	222,28	418,00	57,98	1,65	11043,41
M2	151,47	93,79	734,82	296,17	471,00	365,67	1,80	6913,34
M3	159,83	94,38	94,43	40,64	462,00	601,78	1,85	8894,54
F1	84,06	65,64	95,59	146,36	451,00	704,15	1,56	3053,91
F2	79,39	31,43	219,03	144,08	462,00	725,82	1,54	2911,06
F3	94,06	25,98	323,05	147,55	463,00	1064,09	1,81	2465,31

Tabla 15.

Resultados de parámetros fisicoquímicos de la segunda campaña de muestreo (época seca)

Código	SST (mg/l)	pH	Temperatura del agua (°C)	Oxígeno Disuelto (mg/l)	Porcentaje de saturación (%)	Alcalinidad (mg CaCO ₃ /l)	Fósforo Total (mgPO/l)	DBO Soluble (mg/l)
I1	11,49	6,8	21,3	5,37	67,9	72,59	0,000	17,15
I2	4,47	7,3	21,7	3,11	34,5	101,81	0,000	12,39
I3	6,65	7,3	21,5	4,81	48,0	105,71	0,000	24,94
M1	1,25	7,4	22,3	4,78	47,3	174,89	0,339	52,92
M2	19,82	7,4	22,9	4,68	47,2	168,55	0,539	73,76

M3	32,72	7,2	23,5	0,64	6,6	185,60	0,737	89,25
F1	10,15	7,5	21,4	6,20	62,9	179,76	0,000	74,55
F2	7,97	7,4	24,0	5,48	56,8	175,86	0,013	17,33
F3	7,95	7,5	24,2	4,53	46,5	187,07	0,000	6,30
Código	DBO lenta (mg/l)	DBO rápida (mg/l)	NO3 (ug/Nl)	NO2 (ugNl)	Conductividad (µS/cm)	NH4 (ugN/l)	Fósforo soluble (mgPO/l)	Nitrógeno Orgánico (ug/l)
I1	24,19	21,94	1706,63	66,61	238,00	23,66	0,000	5499,55
I2	18,68	14,65	387,95	233,51	241,00	2,16	0,000	3376,38
I3	34,77	32,31	283,34	140,48	288,00	119,64	0,177	5686,59
M1	102,29	40,07	573,67	121,23	499,00	1029,54	1,538	13477,16
M2	129,85	68,57	672,83	247,89	507,00	1037,05	1,140	14134,14
M3	98,03	142,05	108,39	3,33	546,00	1026,10	0,839	21724,34
F1	134,65	65,89	283,46	50,72	505,00	1031,31	0,426	16145,04
F2	4,73	41,87	321,88	76,02	507,00	1026,10	0,550	16115,88
F3	0,00	35,33	419,86	108,56	534,00	1026,54	0,709	2445,05

Tabla 16.

Resultados de parámetros fisicoquímicos de la tercera campaña de muestreo (época lluviosa)

Código	SST (mg/l)	pH	Temperatura del agua (°C)	Oxígeno Disuelto (mg/l)	Porcentaje de saturación (%)	Alcalinidad (mg CaCO₃/l)	Fósforo Total (mgPO/l)	DBO Soluble (mg/l)
I1	14,19	7,2	19,5	7,73	95,7	42,22	0,38	15,40
I2	3,40	6,9	19,8	7,06	89,1	65,07	0,58	5,95
I3	44,36	7,0	21,6	7,48	95,0	60,11	0,56	16,80
M1	9,55	7,0	22,3	5,79	74,7	148,53	1,65	20,30
M2	6,00	7,3	22,9	6,87	90,8	139,59	1,25	21,53
M3	42,79	6,2	24,5	4,75	24,4	178,33	2,64	157,50
F1	18,01	6,5	23,9	7,01	90,1	77,00	0,51	27,13
F2	11,47	6,1	25,4	6,85	89,2	76,00	0,47	15,75
F3	7,55	6,6	23,6	6,91	90,6	72,03	0,51	28,70
Código	DBO lenta (mg/l)	DBO rápida (mg/l)	NO₃ (ugN/l)	NO₂ (ugN/l)	Conductividad (µS/cm)	NH₄ (ugN/l)	Fósforo soluble (mgPO/l)	Nitrógeno Orgánico (ug/l)
I1	27,50	13,92	1847,10	31,07	135,0	33,94	0,19	2087,89
I2	10,19	5,81	1964,52	120,58	198,0	18,61	0,17	1896,29
I3	30,68	14,52	1521,94	103,39	196,0	10,62	0,12	2364,06

M1	35,64	18,97	783,55	140,55	462,0	1261,37	1,27	1814,53
M2	38,23	19,67	675,16	174,79	449,0	863,37	1,02	2286,68
M3	284,05	139,62	42,90	4,32	557,0	1130,79	1,14	2861,99
F1	50,89	22,08	1117,74	137,08	259,0	95,27	0,51	2649,91
F2	28,92	13,45	1302,90	142,53	252,0	216,87	0,62	2337,70
F3	55,76	21,45	1271,29	149,77	241,0	261,81	0,50	2317,13

Con respecto a los vertidos considerados para el proyecto, se aprecia en color rojo los valores que sobrepasan los límites máximos permisibles para cada parámetro fisicoquímico con base al reglamento de vertido y reuso de aguas residuales N°33601. Las fuentes de dichos vertidos son principalmente de tubos pluviales con salida hacia el río, donde aguas negras descargan sin ningún tratamiento. Dentro de los vertidos considerados se encuentra la Quebrada la Guaria, que aporta gran cantidad de caudal y contaminación.

En Tabla 17, se muestra cómo, principalmente en los parámetros referentes a la carga orgánica sobrepasan los límites establecidos, siendo para vertidos a cuerpos receptores los límites máximos en SST 50 mg/l y para DBO 50 mg/l, (Reglamento N°33601, 2007). Los vertidos IVI, MV2 son los que en todas las campañas muestran valores por encima de los permitidos en todos los parámetros antes mencionados. Destaca en particular el MV2, tratándose de la Quebrada La Guaria, vista por el proyecto y el modelo QUAL2K como un vertido por fines prácticos. Los altos niveles de DBO soluble de 593,25 mg/l sobrepasa en un 1187 % el límite permitido, reflejándose además en los niveles de OD ligado a ese vertido de 2,10 mgO₂/l en promedio. Aunado a lo anterior, un aporte de caudal importante en relación con los otros vertidos, ocasionando que el río tenga que asimilar la carga orgánica y OD, alterando los niveles de oxígeno disuelto a su paso, ocasionando a ciertas condiciones puntos críticos en donde el río no tiene capacidad de autodepuración (Riaño et al, 2018).

Tabla 17.

Resultados de parámetros fisicoquímicos de los vertidos considerados para la modelación

Código	Campaña	Caudal m3/s	SST (mg/l)	Temperatura (°C)	Porcentaje de saturación (%)	Alcalinidad CaCO3 (mg/l)	Fosforo Total (mgPO/l)	DBO Soluble (mg/l)
IV1	I	0,001	132,29	21,9	44,2	284,93	4,12	404,64
IV2	I	0,006	4,52	21,3	83,2	94,12	0,46	14,54
IV3	I	0,002	3,52	21,7	87,5	72,65	0,15	34,88
MV1	I	0,003	30,54	21,9	79,2	148,21	3,53	16,42
MV2	I	0,077	106,22	23,6	16,8	170,25	3,70	593,25
IV1	II	0,001	183,30	21,6	42,1	205,09	1,31	363,61
IV2	II	0,006	4,30	22,4	92,3	99,87	0,00	59,43
IV3	II	0,002	0,57	22,3	28,5	73,56	0,00	1,89
MV1	II	0,003	91,04	22,5	40,5	243,09	4,90	120,00
MV2	II	0,048	229,84	22,9	13,1	256,73	5,99	1378,61
IV1	III	0,001	97,08	21,9	41,5	265,76	3,29	430,50
IV2	III	0,039	6,00	20,1	79,4	114,75	0,50	12,78
IV3	III	0,018	3,40	20,8	83,9	74,02	0,30	29,75
MV1	III	0,001	10,95	23,3	71,7	189,26	1,20	20,30
MV2	III	0,079	108,09	23,1	51,5	232,98	6,89	1260,00
Código	Campaña	DBO lenta (mg/l)	DBO rápida (mg/l)	NO3 (ug/Nl)	Nitrógeno Orgánico (ug/l)	Conductividad (µS/cm)	NH4 (ugN/l)	Oxígeno Disuelto (mgO2/l)
IV1	I	707,07	381,39	102,06	20070,11	620,00	185,03	3,49
IV2	I	24,21	14,91	531,60	2909,86	286	116,57	6,43
IV3	I	57,08	36,74	370,32	3445,06	176,29	134,70	6,75
MV1	I	7,22	36,94	1213,81	1403,91	599,21	1118,73	6,32
MV2	I	1097,78	498,07	125,58	16136,72	698,00	1281,44	1,26
IV1	II	614,54	363,57	108,39	16726,29	570,00	381,26	3,26
IV2	II	122,56	37,30	261,16	3582,81	267,00	57,06	7,43
IV3	II	12,89	17,97	393,29	5905,22	189,50	96,03	2,81
MV1	II	216,68	106,12	1073,48	37200,35	786,00	1031,66	3,90

MV2	II	2519,44	1189,02	108,39	42127,10	708,00	1041,90	1,30
IV1	III	770,72	387,33	108,39	14464,30	667,0	2395,97	3,16
IV2	III	23,15	11,21	767,74	2680,77	301,0	135,14	6,28
IV3	III	55,08	24,95	280,00	3498,30	110,0	166,65	6,57
MV1	III	37,29	17,32	1438,39	1450,13	648,0	828,90	5,49
MV2	III	820,9	720,2	480	1450,13	794,0	15925	3,75

Nota: Los datos en rojo, señalan niveles por encima del reglamento pertinente N°33601.

Con respecto a la Tabla 18 se realizó una interpretación por medio del reglamento que rige a nivel nacional en términos de calidad de un cuerpo superficial, con los límites expuestos en Tabla 3. Se realizó una comparación en donde se observa la tendencia en todas las campañas que al inicio del área de estudio la calidad del agua del río Bermúdez presente una contaminación incipiente, esto debido a una menor actividad antropogénica en las zonas alta de la microcuenca y por ende una menor influencia de vertidos. Seguidamente, se observa que el sector crítico de contaminación se encuentra en la parte media del área de estudio, que muestra una contaminación moderada a severa en todas las campañas, disminuyendo en cierta medida de categorías río abajo. La época seca, principalmente en el sector medio, es donde los niveles de contaminación llegan a categoría de severa, situación que es esperable que los vertidos sean constantes pero el caudal del agua menor, presentando menor dilución de los contaminantes. En época lluviosa presenta de igual forma la tendencia corriente abajo a empeorar la calidad del agua, principalmente en las zonas medias, pero existe una recuperación de la calidad del agua en el tramo final, a pesar de los niveles de contaminación expuestos en todo el recorrido, el río tiende a la recuperación y asimilación de contaminantes, una época en donde los caudales aumentan y la captación y absorción del río de diferentes contaminantes es mejor debido a la capacidad de dilución, aunado a un aumento de velocidad del río, menor tiempo de retención y por ende una mayor aireación natural por turbulencia. (Soto, 2019).

Tabla 18.*Clasificación de los puntos de muestreo según el índice holandés*

Época climática	Código	PSO (%)	Asignación de puntos del % saturación	DBO del agua para cuerpos receptores.	Asignación puntos para DBO	N amoniacal	Asignación de puntaje N amoniacal	Sumatoria Total	Clase	Interpretación de calidad
Transición	I1	101.40	2	7.4	3	0.04	1	6	2	Incipiente
Transición	I2	92.50	1	8.4	3	0.02	1	5	2	Incipiente
Transición	I3	97.50	1	14.3	4	0.02	1	6	2	Incipiente
Transición	M1	64.40	3	38.7	5	0.05	1	9	3	Moderada
Transición	M2	70.32	3	52.1	5	0.28	1	9	3	Moderada
Transición	M3	36.90	4	54.0	5	0.47	1	10	4	Severa
Transición	F1	81.90	2	31.8	5	0.55	2	9	3	Moderada
Transición	F2	92.64	1	23.5	5	0.56	2	8	3	Moderada
Transición	F3	59.90	3	25.5	5	0.83	2	10	4	Severa
Seca	I1	67.90	3	9.8	4	0.02	1	8	3	Moderada
Seca	I2	34.50	4	7.1	3	0.00	1	8	3	Moderada
Seca	I3	48.00	4	14.3	4	0.09	1	9	3	Moderada
Seca	M1	47.30	4	30.2	5	0.80	2	11	4	Severa
Seca	M2	47.20	4	42.2	5	0.81	2	11	4	Severa
Seca	M3	6.60	5	51.0	5	0.80	2	12	4	Severa
Seca	F1	62.90	3	42.6	5	0.80	2	10	4	Severa
Seca	F2	56.80	3	9.9	4	0.80	2	9	3	Moderada
Seca	F3	46.50	4	3.6	2	0.80	2	8	3	Moderada
Lluviosa	I1	95.70	1	8.8	3	0.03	1	5	2	Incipiente
Lluviosa	I2	89.10	2	3.4	2	0.01	1	5	2	Incipiente
Lluviosa	I3	95.00	1	9.6	4	0.01	1	6	2	Incipiente
Lluviosa	M1	74.70	2	11.6	4	0.98	2	8	3	Moderada
Lluviosa	M2	90.80	2	12.3	4	0.67	2	8	3	Moderada
Lluviosa	M3	24.40	5	90.0	5	0.88	2	12	4	Severa
Lluviosa	F1	90.10	2	15.5	5	0.07	1	8	3	Moderada
Lluviosa	F2	89.20	2	9.0	3	0.17	1	6	2	Incipiente
Lluviosa	F3	90.60	2	16.4	5	0.20	1	8	3	Moderada

4.1.5 Resultados de parámetros hidráulicos

Por medio de trabajo de campo, se realizaron las mediciones respectivas para obtener los datos hidráulicos mostrados en Tabla 19, requeridos por el modelo QUAL2KW. Para dichos datos, se midieron al inicio y final de los segmentos previamente establecidos, para posteriormente obtener el n-Manning por medio de Ecuación 1. Los datos hidráulicos se realizaron para cada campaña ya que la hidrodinámica del río cambia a partir de las distintas épocas del año. Se puede notar como la morfología fluvial del río Bermúdez es tan cambiante, en donde el ancho transversal del río puede pasar a lo largo del río de 2 metros hasta un máximo de 8 metros, teniendo esta variación en un río gran relevancia en la variación de profundidad y velocidad en cuanto a tiempos de retención (Bedoya & Lozano, 2019). Lo anterior representa un proceso complejo para el modelo, de replicar las condiciones hidráulicas del modelo debido a la situación cambiante del río.

Tabla 19.
Datos hidráulicos del río Bermúdez para la modelación

Campaña	Distancia (m)	Pendiente	n- Manning	Ancho (m)	Profundidad (m)	Caudal m³/s	Velocidad (m/s)
I	0,00	0,03	0,39	3,00	0,20	0,03	0,060
	0,75	0,01	0,07	5,00	0,14	0,05	0,052
	2,03	0,02	0,11	6,50	0,28	0,20	0,201
	8,45	0,02	0,14	4,00	0,41	0,79	0,550
	9,81	0,04	0,22	4,00	0,45	0,81	0,400
	11,66	0,00	0,14	4,00	0,45	0,87	0,400
	16,03	0,00	0,06	4,00	0,21	0,87	0,600
	16,68	0,02	0,11	4,00	0,50	0,87	0,300
	17,47	0,01	0,38	8,00	0,73	0,87	0,200
II	0,00	0,07	1,60	3,00	0,20	0,02	0,038
	0,75	0,07	1,60	3,00	0,20	0,02	0,067
	2,03	0,02	0,26	3,00	0,20	0,03	0,100
	8,45	0,02	0,48	6,50	0,34	0,39	0,380
	9,81	0,01	0,12	3,00	0,35	0,41	0,380
	11,66	0,02	0,11	2,50	0,33	0,44	0,400
	16,03	0,01	0,05	2,00	0,21	0,33	0,750
	16,68	0,01	0,05	2,00	0,13	0,38	0,640

III	17,47	0,01	0,02	7,00	0,70	0,38	0,200
	0,00	0,05	1,04	4,21	0,25	0,10	0,106
	0,75	0,05	1,04	4,21	0,20	0,15	0,250
	2,03	0,02	0,86	3,05	0,20	0,16	0,330
	8,45	0,02	0,16	3,05	0,44	0,34	0,260
	9,81	0,16	0,30	3,70	0,45	0,38	0,260
	11,66	0,15	0,49	3,70	0,70	0,42	0,350
	16,03	0,01	0,03	2,00	0,23	0,46	0,700
	16,68	0,01	0,03	2,00	0,39	0,46	0,500
	17,47	0,01	0,03	7,00	0,54	0,46	0,060

4.2 ETAPA 2

4.2.1 Calibración de la modelación

Para las diferentes series de calibración del modelo de simulación QUAL2KW, se contempló la información de constantes cinéticas Tabla 20, buscando el mejor ajuste de las variables cinéticas y de bio degradabilidad que ayudaron a representar las condiciones ideales para el proceso de simulación de las variables fisicoquímicas en especial para la DBO₅ y el Oxígeno Disuelto, que son las variables de interés en este estudio ya que son los parámetros principales en el proceso de autodepuración de un río. En el proceso de calibración, se utilizaron diferentes rangos establecidos y recomendados por la guía de modelación del QUAL2KW (Chapra et al, 2012) y EPA para obtener los mejores ajustes de las diferentes fuentes hídricas superficiales bajo estudio.

Tabla 20.

Configuración de constantes cinéticas de la hoja rate del modelo QUAL2KW

Constantes Cinéticas	Unidades	Valor	Rango
Velocidad de sedimentación de sólidos suspendidos	m/d	0,2934	0-2
Tasa de hidrólisis de la materia orgánica	1/d	0,1013	0-5
Tasa de oxidación de la materia orgánica de lenta descomposición	1/d	0,1952	0-10

Tasa de oxidación de la materia orgánica de rápida degradación	1/d	0,844	0-10
Velocidad de sedimentación de nitrógeno orgánico	m/d	0,031	0-2
Tasa de nitrificación de amonio	1/d	2,259	0-2,5
Tasa de desnitrificación de nitratos	1/d	0,983	0-3
Coefficiente de transferencia por desnitrificación de sedimentos	m/d	1,481	0-2,5

En lo referente a la calibración y confirmación de las modelaciones realizadas en el QUAL2KW, las campañas modeladas mostraron un ajuste aceptable, lo cual ocurre cuando la respuesta de simulación es similar al comportamiento de los valores reales (Rodríguez, 2020). Por ende, se logró modelar la tendencia del comportamiento de los parámetros a lo largo del río. Es importante destacar que, las tres campañas modeladas, representaron épocas climatológicas diferentes, lo que ocasiona que exista variaciones en condiciones hidrológicas del río teniendo un aporte por lluvia y aumentos de caudales, que se refleja en las modelaciones realizadas para cada campaña.

Los resultados modelados se enfocaron en analizar el proceso de autodepuración del río cuyos parámetros fundamentales son la carga orgánica representada por la Demanda Biológica de Oxígeno y Oxígeno Disuelto parámetro esencial para la vida acuática.

Los gráficos mostrados a continuación, son los resultados de calibración y ajuste de la modelación de los parámetros de DBO y Oxígeno Disuelto, para cada campaña. En los mismos, se muestra en puntos amarillos los resultados del parámetro medido en campo con respecto a su distancia medida y representada en línea, el resultado de la modelación calibrada.

Al tratarse de un proyecto experimental, de un tema novedoso que a nivel país se cuenta con pocas investigaciones en temas modelaciones ambientales, además al ser la primera vez que se realiza dicho proyecto de modelación en este río, por tanto, muchas

variables implicadas y metodologías no están adecuadas al país y a los tipos de ríos que se presenta en este, sin embargo, se llevó a cabo metodologías para obtención de datos hidráulicos, con el fin de representar de la forma más detallada posible la hidrodinámica del río.

En lo referente a la Figura 17 de la primera campaña del río Bermúdez (transición lluviosa-seca) la modelación para los parámetros OD y DBO presenta una congruencia en la tendencia de los datos modelados en relación con el comportamiento de los puntos muestreados en el río, lo que representa una acertada modelación y calibración del modelo a pesar de la complejidad de representar la morfología fluvial del río Bermúdez.

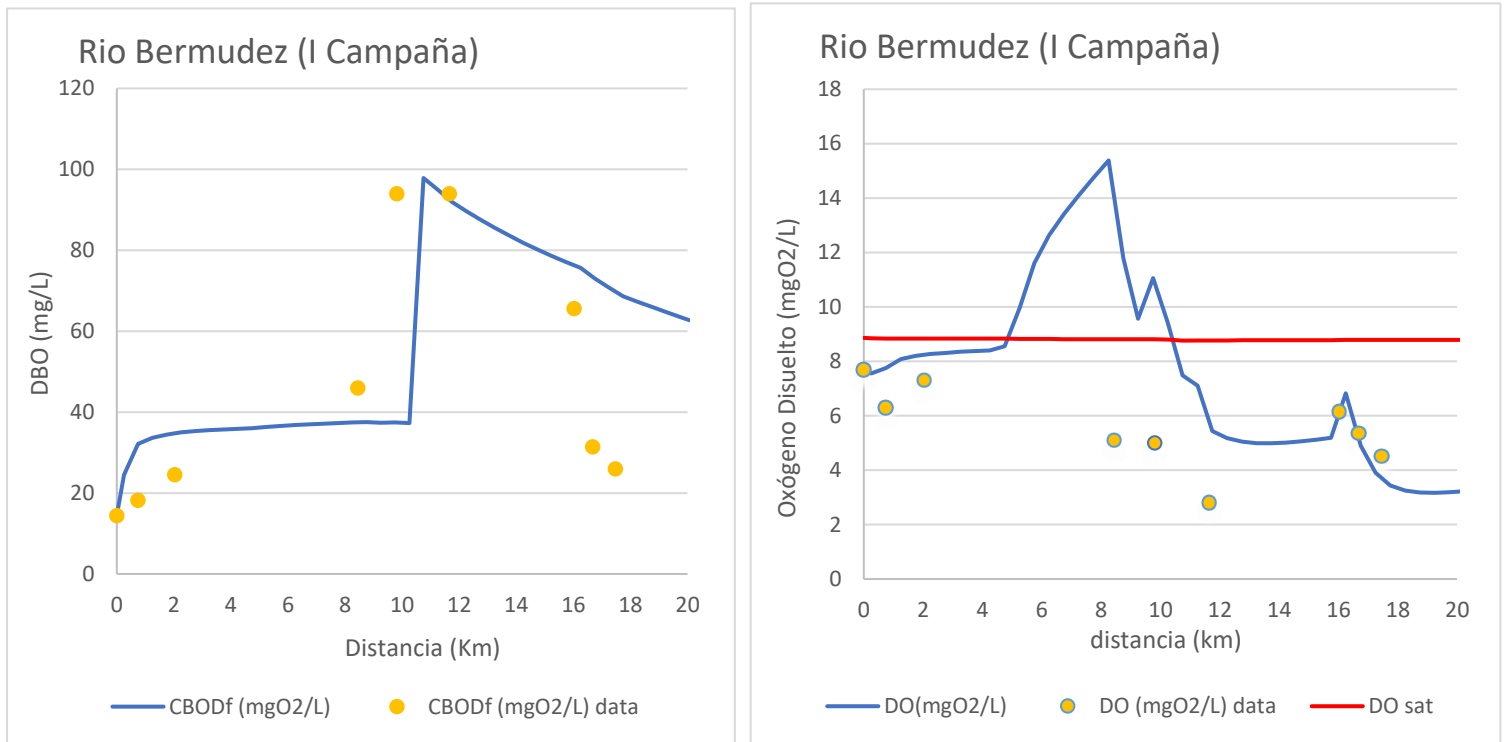
Con respecto al comportamiento de la DBO, las concentraciones más bajas se presentan en la parte alta de alrededor de 20 mg/l, conforme avanza el recorrido del río refleja un punto crítico con concentraciones elevadas de aproximadamente 100mg/l, posteriormente en la parte baja se muestra una tendencia a la disminución de carga a niveles casi iniciales, lo que representa una asimilación de carga orgánica por parte del río.

En lo que respecta al oxígeno disuelto en la campaña I, muestra la tendencia observada en campo. Se destaca una irregularidad en la parte media donde el pico de OD modelado llega a los 15 mgO₂/l, en relación con el observado de aproximadamente 6 mgO₂/l. Una de las causas es procesos de sobresaturación del río en el sector medio, en donde la aireación natural del río por medio de cascadas que hacen que el oxígeno llegue a niveles por encima del saturado y exista transferencia de oxígeno del río hacia la atmosfera. (Sánchez, 2019). Además, genera turbulencia abundante y fuertes pendientes que comprometen el modelado por comportamientos abruptos de aireación en tramos muy cercanos (Castro, 2015).

A modo comparativo, se puede observar que la relación entre el OD y DBO es inversamente proporcional, ya que en concentraciones elevadas de la DBO principalmente en la parte media, los niveles que representa el OD son bajos. Posteriormente, se observa que, conforme decrece la DBO, aumenta los niveles de OD. Dicho comportamiento es esperable considerando que el oxígeno disuelto decrece debido al proceso de oxidación de la materia orgánica y procesos de nitrificación presentes en el río. (Mozón et al, 2013).

Figura 17.

Calibración de DBO y Oxígeno Disuelto en el modelo QUAL2KW para el río Bermúdez de la I Campaña



Con respecto a la segunda campaña Figura 18, la modelación de DBO muestra un ajuste con la misma tendencia que los datos observados en campo, la menor concentración del área de estudio se presenta en la parte alta, aumentando progresivamente en la parte media y una disminución de carga orgánica en la parte baja. Para la parte media, a pesar de limitantes de complejidad de la morfología fluvial, por variabilidad de anchos, pendientes y tiempos de retención además de datos hidráulicos implican en el proceso de modelación (Guía Nacional de Modelación del Recurso Hídrico para Aguas Superficiales, 2018). Se logró obtener un modelado calibrado con los datos de coeficientes adecuados que obtienen con una tendencia lo más aproximada posible al comportamiento real del río.

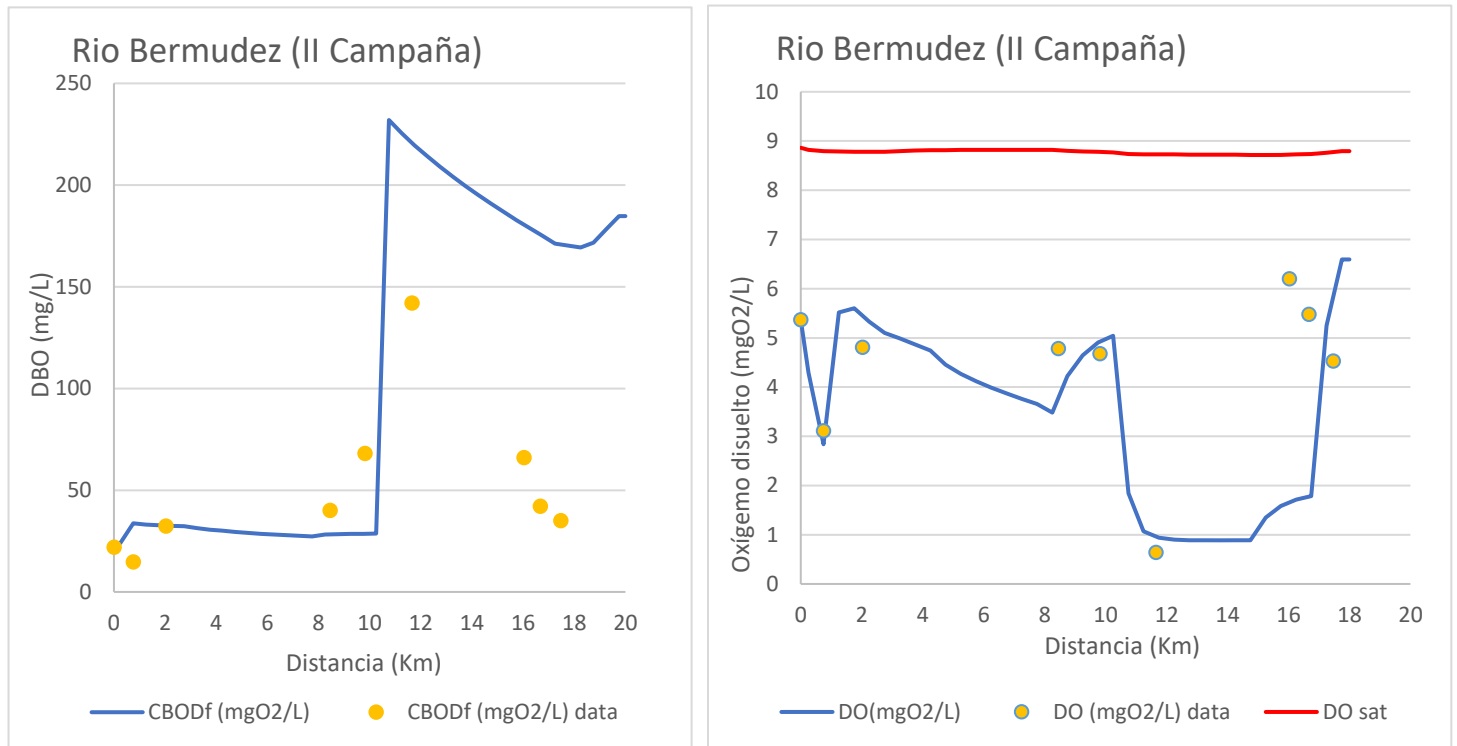
Para esta segunda campaña, al igual que la campaña anterior, el comportamiento de la carga orgánica refleja el nivel más elevado en la parte media de la cuenca, influenciado directamente por la Quebrada la Guaría presente en ese sector del río. La autodepuración o asimilación por parte del río hace que se observe una tendencia a la baja de concentración

conforme avanza el río. La modelación refleja dicha tendencia considerando la fluctuación de la carga orgánica en una distancia relativamente corta en la parte media del río.

Para el OD, a pesar de los comportamientos cambiantes a lo largo del río, el modelo pudo obtener un ajuste bastante aproximado a los valores observados en campo. Relacionando los dos parámetros, muestra el punto crítico de OD en la parte media justo cuando la DBO presenta los niveles más altos de concentración. Se detalla también la asimilación del río de la materia orgánica y la recuperación del OD conforme avanza el cauce, lo que representa el proceso de autodepuración del río Bermúdez.

Figura 18.

Calibración de DBO y Oxígeno Disuelto en el modelo QUAL2KW para el río Bermúdez de la II Campaña



Para la campaña III Figura 19 en su época lluviosa, la DBO presenta una modelación acorde a la tendencia de los datos de campo, los cuales al igual que las otras campañas, la parte media muestra las concentraciones más elevadas, en donde existe una diferencia significativa de los datos modelados con respecto a los mostrados en campo.

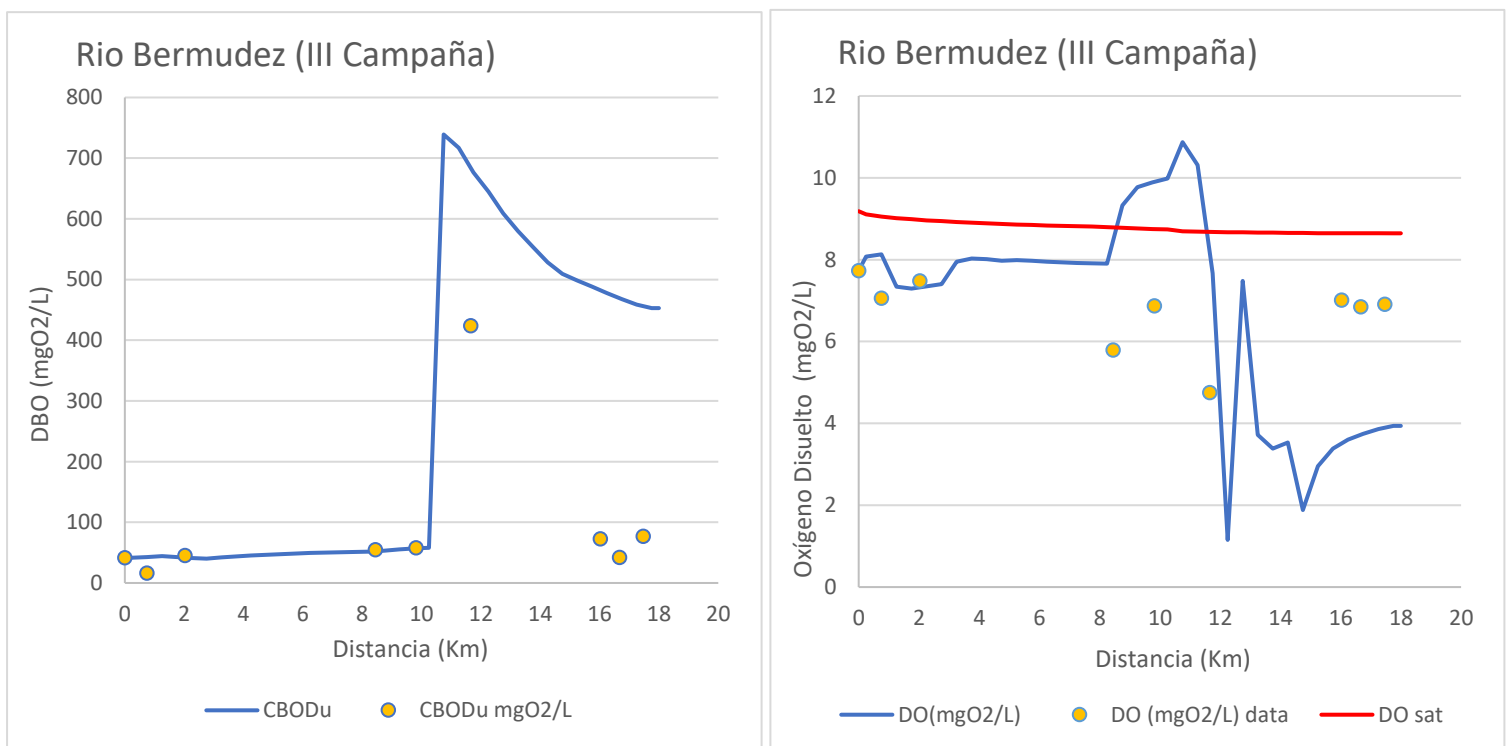
Considerando lo anterior, un aspecto a destacar a nivel general en todas las campañas en el parámetro DBO, es la tendencia a un ajuste detallado en la parte alta y comienzo a la parte media del área de estudio, caso contrario sucede en la parte baja, donde la calibración tiende a ser menos ajustada. Lo anterior, puede ser consecuencia de una mayor intervención antropogénica, lo cual requiere un mayor nivel de detalle de los procesos fisicoquímicos y microbiológicos, además de una caracterización mayor de los vertimientos presentes en la zona de estudio, además otro factor clave es la representación de velocidades de flujo por

medio de los tiempos de viaje para el cálculo del recorrido de una misma masa de agua (Castro, 2015).

Por otro lado, la modelación del OD muestra un ajuste detallado, en donde replica los valores observados en campo a pesar de la variabilidad de las concentraciones. Destaca un punto crítico de OD en la parte media del área de estudio, coincidiendo a su vez con el punto de descarga de vertido del afluente Quebrada La Guaria, donde aporte una cantidad de carga considerable de carga orgánica y disminución a su vez de OD en el río.

Figura 19.

Calibración de DBO y Oxígeno Disuelto en el modelo QUAL2KW para el río Bermúdez de la III Campaña



4.3 ETAPA 3

4.3.1 Modelaciones de escenarios a futuro

Ya finalizada la calibración de los parámetros de las campañas I, II y III del río Bermúdez, llamadas de este apartado en adelante, escenarios actuales, se procedió a incluir en el modelo QUAL2KW, los datos proporcionados por el IMN, según Tabla 11, datos de temperatura del aire, temperatura del agua, modificación en los caudales y de las concentraciones de DBO presentes en las diferentes campañas, para determinar los comportamientos de los parámetros ante datos climáticos. Se consideraron en una primera modelación llamada escenario 1 los datos para el 2050, mientras que, para una segunda modelación llamada escenario 2, se contemplaron los datos del 2080.

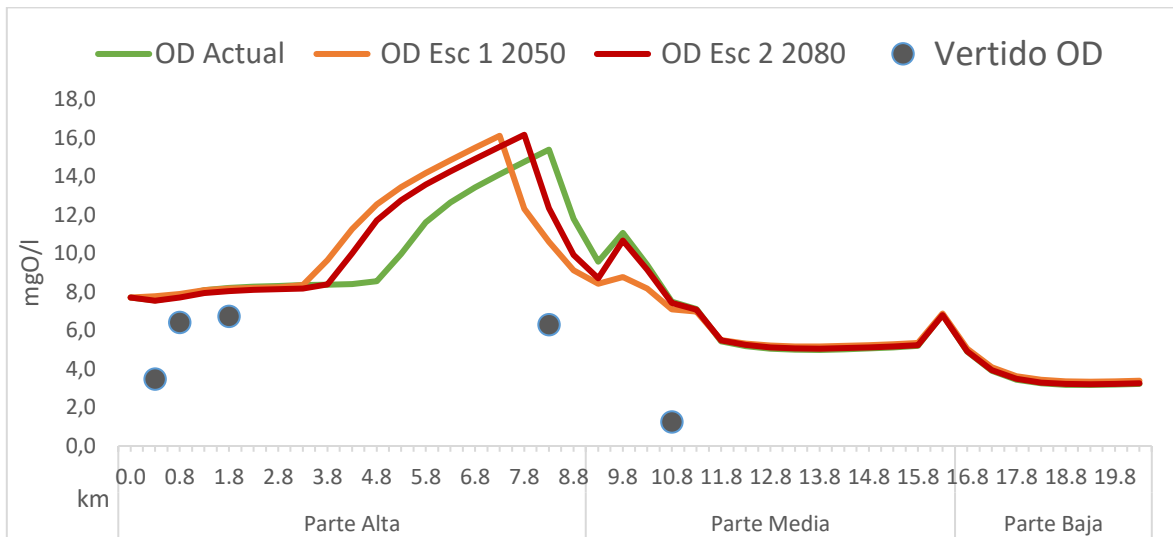
Posterior a la modelación en el QUAL2KW, se procesaron los datos en gráficas para demostrar las variaciones en el comportamiento de los parámetros DBO y OD para las distintas épocas climáticas en el escenario establecido para el 2050.

En lo que respecta a la época de transición, se puede observar en la Figura 20, que a nivel general el comportamiento entre los escenarios a lo largo de la microcuenca es similar, la variación entre escenarios se destaca en la parte media en donde se presenta un pico fuerte de OD, que, como se mencionó en el apartado de calibración, puede estar ligado a los datos hidráulicos y la sobresaturación.

Se aprecia el impacto de los vertidos principalmente en la parte media, en donde está presencia de afluentes como quebrada la Guaria, con un OD medido de 1,3 mgO₂/l, que representa una afectación en la concentración de OD en el río. Es importante resaltar que, a pesar de la inclusión de escenarios de cambio climático, no se muestra un impacto significativo en el OD, por lo tanto, no se muestra afectación relevante en el río Bermúdez a causa del cambio climático, un resultado contrario a lo esperado considerando que la temperatura es un factor importante en la calidad del agua de los ríos y ligada directamente a la capacidad de autodepuración de los ríos debido a la influencia que tiene con el oxígeno disuelto. (Montes et al, 2013)

Figura 20.

Comportamiento del Oxígeno Disuelto en los escenarios para la época de transición (lluviosa-seca)

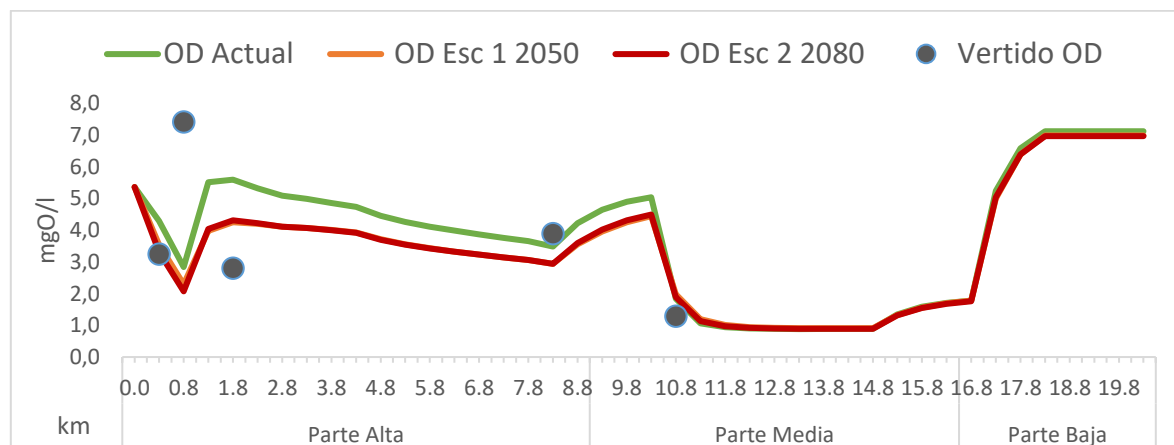


Para la época seca, Figura 21 muestran un comportamiento muy similar entre los escenarios, donde destaca en la parte alta de la microcuenca una disminución de hasta 1 mgO₂/l de OD en los escenarios futuros, lo que indica un impacto negativo en la parte alta de la microcuenca en términos de OD, con los cambios esperados de los escenarios de cambio climático puede representar una problemática a nivel de la microcuenca en términos de procesos de autodepuración y asimilación de contaminantes (Suarez, 2008). Sumado a una época en la cual los caudales disminuyen y en consecuencia una menor dilución y capacidad de autodepuración del río ante puntos críticos de contaminación. Es importante mencionar como vertidos con sus distintos niveles de OD, tienen un impacto positivo o negativo en el río. Como es el caso del vertido considerado en el kilómetro 0,8, el cual muestra niveles de OD de alrededor de 7,4 mgO₂/l, lo que ocasiona una mejoría en los niveles de OD en el río.

En cuanto a efectos del cambio climático al parámetro evaluado, el OD no muestra una alteración significativa de los niveles, a pesar de los aumentos de temperatura agua-aire. Además, a pesar de considerar disminuciones de capacidad de caudales para escenarios futuros y aumentos de carga orgánica, no presenta diferencias importantes a lo largo del río.

Figura 21.

Comportamiento del Oxígeno Disuelto en los escenarios para la época seca

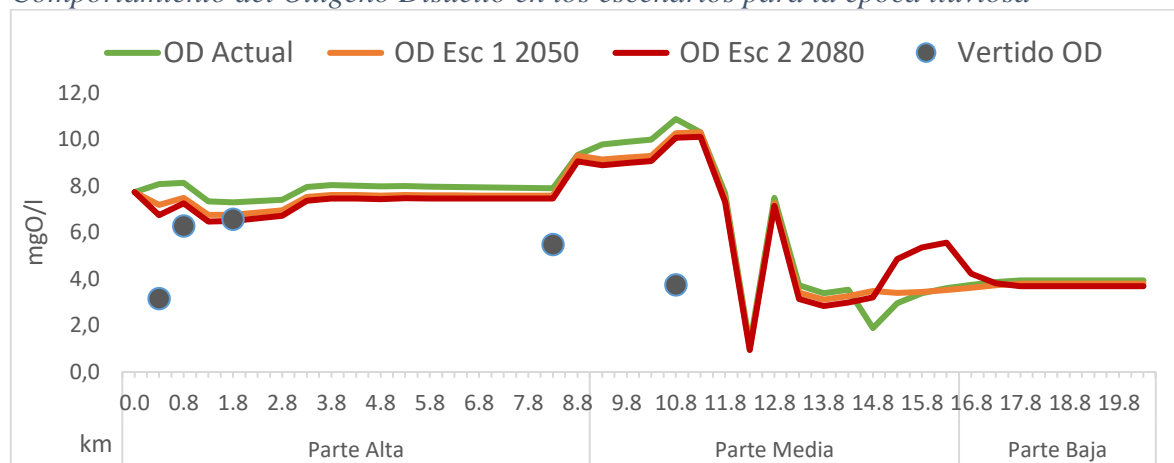


Para la época lluviosa, según Figura 22, existe un comportamiento muy similar del OD entre los escenarios, se muestra una leve disminución de los escenarios futuros con respecto al actual en la parte alta y media del área de estudio, de alrededor de 0,9 mgO₂/l, además de un aumento atípico del escenario 2, en la parte final. Al igual que las épocas anteriores, la parte media es donde muestra la tendencia a la baja, representando un impacto crítico hacia el OD producto de los vertidos.

Al igual que las campañas anteriores, a pesar de incorporación de mayor carga orgánica y simulación de capacidad de caudales mínimos, no afectan considerablemente el comportamiento y asimilación del OD. Sin embargo, en lo referente al cambio climático se debe considerar además alteraciones en los periodos climatológicos, donde pueden ser un factor que perjudique los procesos hidrológicos de las cuencas (ONU, 2019), en consecuencia, ocasionar periodos de verano más prolongados, o precipitaciones más intensas producto del cambio climático, que pueden ser variables de mayor impacto que puedan alterar la dinámica de la microcuenca del río Bermúdez.

Figura 22.

Comportamiento del Oxígeno Disuelto en los escenarios para la época lluviosa



4.3.2 Análisis Estadístico de los escenarios climáticos

Como parte de la etapa final del proyecto, se realizó un análisis estadístico con la herramienta Minitab de los diferentes escenarios modelados de los parámetros DBO, OD y añadido el parámetro de temperatura del aire para determinar estadísticamente las relaciones entre los parámetros.

Se realizó un análisis de correlación, analizando los datos de todas las campañas de las variables de DBO, OD y temperatura del aire, en donde se utilizó el método estadístico de correlación Rho Spearman que determina relaciones lineales de dos o mas variables, en donde permite conocer el grado de asociación y dependencias de las variables. El valor de spearman que define el grado y dirección de relación de variables conforme tiende a 1 positivo o negativo. En dicho método también define un valor p de significancia, en donde si es menor a 0.05 se concluye que es correlación significativa (Mondragón, 2014).

Con lo anterior, para los datos analizados en Tabla 21 se puede apreciar que la relación entre OD y DBO son estadísticamente significativa, ya que valor p es menor a 0,05, la correlación es inversamente proporcional, aumentando la DBO y disminuyendo el OD, en

un grado de fuerza intermedio, lo cual es un resultado esperable, debido a mayor materia orgánica, quiere el oxígeno disuelto en el agua para que los microorganismos puedan realizar los procesos de oxidación y degradar la materia orgánica (Lecca & Lizama, 2014).

Con respecto a la DBO y temperatura del aire, es una correlación significativa, además de ser inversamente proporcional. La fuerza de la correlación es baja, debido que el valor de spearman $-0,143$, es alejado de -1 . Es interesante dicho resultado, debido a que, el resultado esperado, es que favorezca los procesos de descomposición de materia orgánica. Si bien la temperatura del agua es un parámetro de constante de bio degradación para la DBO, y que va ligada a las reacciones químicas y procesos biológicos (Isea et al, 2015). Sin embargo, la temperatura aire es una variable que afecta parcialmente la temperatura del agua, y no está estrictamente relacionada con la DBO, además a nivel general la temperatura del agua es un factor mayormente ligado a la degradación, por tanto, considerando lo anterior, la alteración a la temperatura del aire no representa un impacto directo a la DBO del agua.

Por otro lado, para el OD y temperatura del aire, la relación no es significativa, porque el valor p es mayor al alfa ($0,05$), dando un resultado de $0,960$. Además que la relación es positiva, y muy debil debido al valor de spearman estar alejado de 1 . Es un resultado no esperado considerando que, la temperatura del aire presenta una cierta relación con la temperatura del agua, y ésta, a su vez ligada directamente a la concentración de oxígeno disuelto equivalente al grado de temperatura presente en el agua y a la capacidad de saturación de oxígeno (Muñoz et al, 2015). Sin embargo, se puede mencionar por medio de los resultados obtenidos, que la relación indirecta de la temperatura del aire con el oxígeno disuelto presente en el agua, no es tan relevante, por consiguiente, para el OD no representa un impacto directo los aumentos de temperatura de aire considerados a causa del cambio climático. Sin embargo, es importante profundizar dicho tema, y la relación existente, por medio de mas investigaciones referente al cambio climático y su impacto en las cuencas, ya que se trata de un tema muy amplio y complejo que relaciona diferentes variables cambiantes.

Tabla 21*Correlación de los parámetros DBO, Temperatura airea y OD.*

	OD	DBO
DBO	-0,514	-
	0,000	-
Temperatura aire	0,003	-0,143
	0,960	0,005

Nota: Contenido de celda: Rho Spearman

Valor p

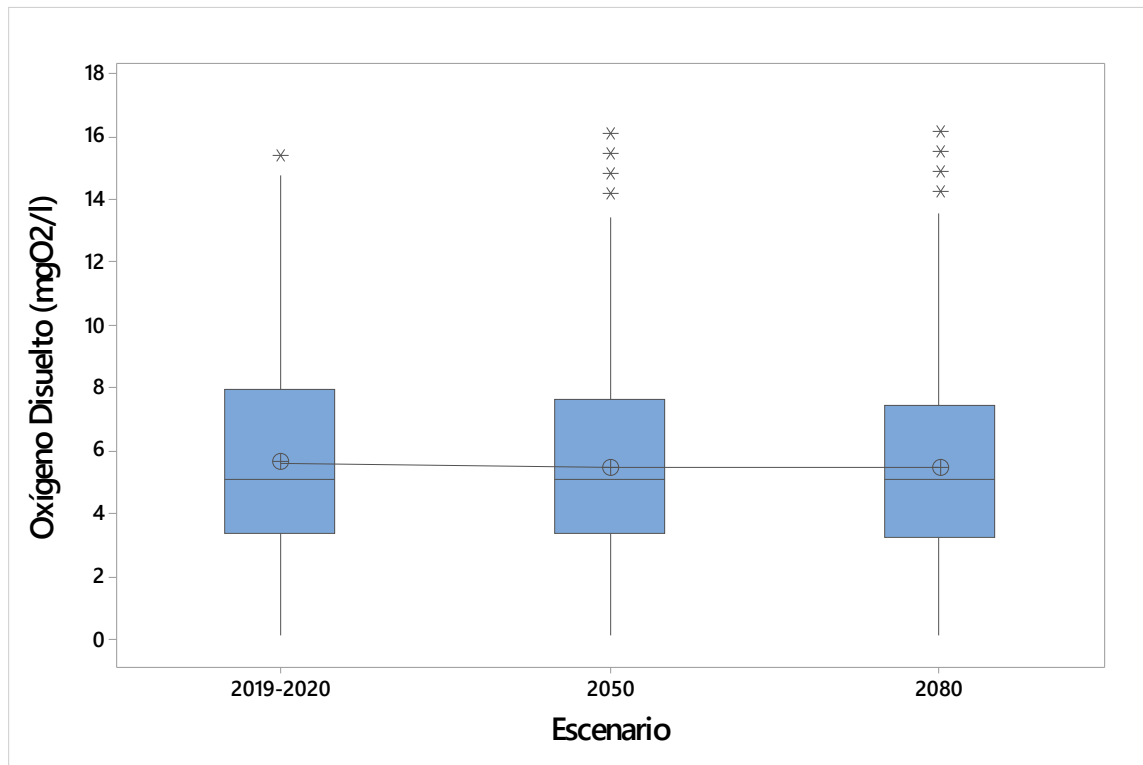
4.3.2.1 Oxígeno Disuelto

Para el parámetro de OD, según la Figura 23, se puede analizar en la gráfica de cajas, que para los distintos escenarios la mayoría de los datos se encuentran en un rango de 4 mgO₂/l y 8 mgO₂/l, teniendo cada uno una mediana aproximadamente de 5 mgO₂/l, lo que resulta no presentar diferencias significativas en los escenarios del parámetro OD. Existe una apertura de los bigotes presentando variabilidad de los datos de OD a lo largo del río, sin embargo, dicha variabilidad es muy similar entre los escenarios. Los datos atípicos como lo menciona Ballesteros (2015), son valores que se exceden 1,5 unidades de la longitud de caja y por ende se alejan del centro de la distribución (p16).

Para los escenarios a futuro, en relación con el escenario actual (2019-2020), presentan más cantidad de valores atípicos por encima del centro de la distribución de los datos. Existe datos muy por encima de los normales de un río contaminado, que pueden deberse como se menciona en anteriores apartados a sobresaturación por presencia de rápidos y turbilencia ocasionada por cascadas y zonas rocosas. Con respecto a los niveles de oxígeno disuelto óptimos para la vida acuática, entre un 5 mgO₂/l, a 6 mgO₂/l, son niveles aceptables, mientras que un oxígeno por debajo de 2 mgO₂/l, son condiciones no aptas para la mayoría de las especies acuáticas (Caicedo & Coello, 2010). Basado en lo anterior, y considerando que los niveles de oxígeno disuelto se encuentran alrededor de una media de 5.60 mgO₂/l, se puede mencionar que el río Bermúdez, mantiene niveles aceptables de oxígeno disuelto en todos los escenarios presentes.

Figura 23.

Grafica de cajas del Oxígeno Disuelto en los escenarios.



4.3.2.2 Demanda Biológica de Oxígeno

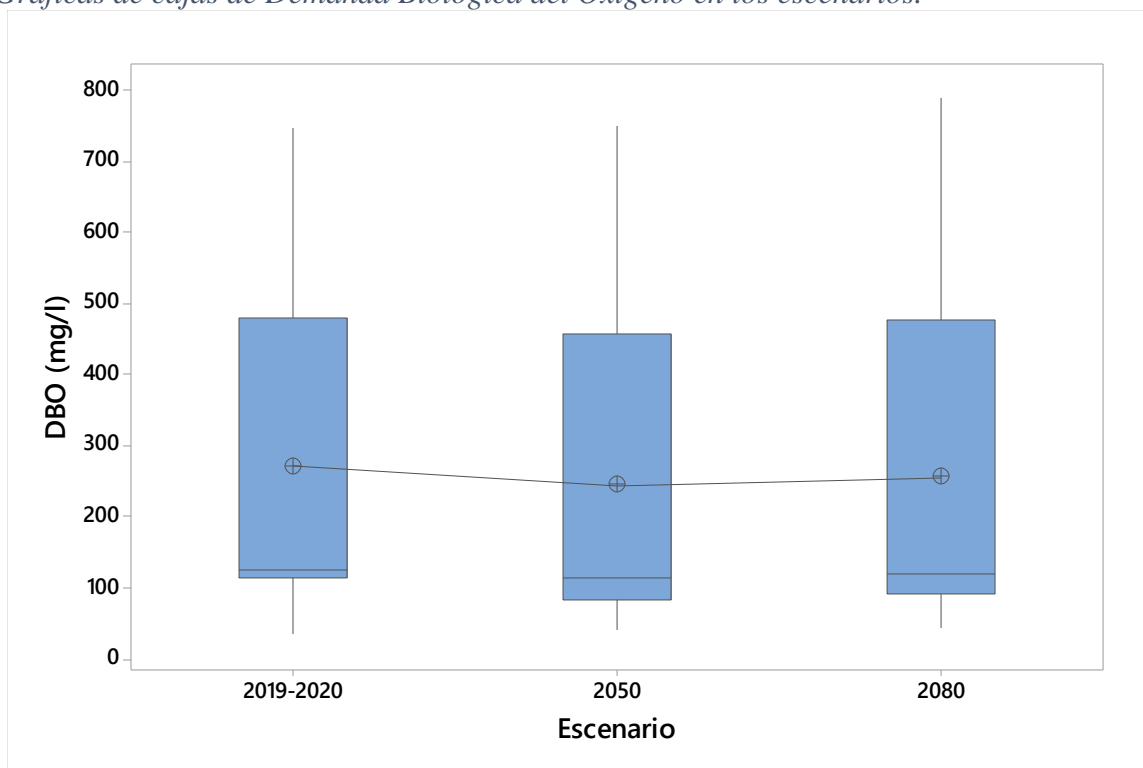
En lo que respecta a la DBO, Figura 24 presenta cajas con gran amplitud, por ende una mayor distribución de los datos. La media es muy similar para los diferentes escenarios con alrededor de 250 mg/l. Se aprecia una amplitud extensa de los bigotes, teniendo datos hasta de 700 mg/l, una carga muy importante para contaminante en el río de estudio. El escenario actual (2019-2020) y el Esc 1 (2050), mantienen un comportamiento muy similar, con un centro de distribución de datos incluso menor por parte del Esc 1, lo que representa incluso una disminución de carga orgánica.

La amplitud de bigotes para el Esc 2 es un poco mayor a los demás escenarios pero con una distribución del centro de los datos muy similar al escenario actual. Con lo anterior, se puede mencionar que, a pesar de aumentar la carga orgánica para los escenarios futuros, el comportamiento de los datos es muy similar al escenario actual, ocasionado posiblemente por una asimilación de los contaminantes por parte del río Bermúdez, tomando en cuenta

además los niveles aceptables de oxígeno disuelto que presenta para los distintos escenarios, posiblemente por su capacidad de autodepuración, debido a las características propias del río Bermúdez como sus altas pendientes que permiten la aireación natural (Chaves, 2014).

Figura 24.

Graficas de cajas de Demanda Biológica del Oxígeno en los escenarios.



4.3.2.3 Analisis de ANOVA multifactorial

Mediante el análisis de varianza ANOVA multifactorial Tabla 22, se determinó la significancia del oxígeno disuelto en los distintos factores contemplados. Para los parámetros evaluados, los escenarios actuales y futuros, no existe una diferencia estadísticamente significativa, debido a que, el valor $p > 0,05$. El resultado es acorde a lo observado en los análisis gráficos del oxígeno disuelto mencionados en apartados anteriores. Además, tampoco existe diferencias significativas entre los escenarios y la relación entre los factores partes de la cuenca, campaña y la combinación.

Caso contrario sucede entre campañas y las distintas partes de la cuenca, donde si se reflejan diferencias estadísticamente significativas tanto para la DBO como para el OD, debido al valor $p < \alpha$ lo que refleja que el río Bermúdez presenta un comportamiento muy variable dependiendo de época climática y el sector de la cuenca lo que repercute en su capacidad de asimilación de contaminantes. Lo anterior es un análisis importante que se debería considerar por ejemplo en las concesiones de vertimientos hacia el río, como es el caso de Colombia, en donde el (Decreto N°1076, 2015) indica, que se debe llevar una evaluación ambiental del vertimiento, en el cual, mediante modelos de simulación, se debe valorar los impactos que cause el vertimiento al cuerpo de agua en función a la capacidad de autodepuración que presente el río en ese sector, con ello se permite gestionar de forma adecuada el río, evitando posibles puntos críticos de contaminación que afecten el recurso hídrico de las cuencas.

Tabla 22.
Análisis de varianza de los parámetros de OD y DBO

Fuente	Oxígeno Disuelto		Demanda Biológica Oxígeno	
	Valor p	Significativo	Valor p	Significativo
Escenario	0,885	NO	0,162	NO
Parte de la Cuenca	0,000	SI	0,000	SI
Campaña	0,000	SI	0,000	SI
Escenario*Parte de la cuenca	0,988	NO	0,961	NO
Escenario*Campaña	0,947	NO	0,343	NO
Parte de la cuenca*Campaña	0,000	SI	0,000	SI
Escenario*Parte de la cuenca*Campaña	0,987	NO	0,992	NO

CAPITULO 5. CONCLUSIONES

Las campañas de muestreo y trabajo de campo sirvieron como fuente de información para el análisis del área de estudio, montaje y calibración del modelo QUAL2KW, ya que por medio de éste se realizó la caracterización de calidad del agua por medio de la modelación acorde a las tendencias de los datos en campo.

La modelación en las tres campañas, reflejan en la parte media de la microcuenca del río Bermúdez un punto crítico de alta carga orgánica y disminución considerable de Oxígeno Disuelto ocasionado por el vertido de Quebrada la Guaria, que el río Bermúdez logra asimilar en su proceso de autodepuración en su parte baja.

Para la evaluación de las condiciones actuales en lo referente al proceso de autodepuración en el área de estudio establecida en el río Bermúdez, presenta capacidad de autodepuración en las distintas épocas climáticas que permite asimilar la carga orgánica procedentes de los vertidos asociados a la actividad antropogénica.

Por medio de las modelaciones a futuro realizadas por la herramienta ambiental QUAL2KW reflejan que la microcuenca del río Bermúdez no muestra afectación significativa en el proceso de autodepuración ante los escenarios futuros de cambio climático de aumento de temperatura del aire y variación de precipitación.

CAPITULO 6. RECOMENDACIONES

Se debería incentivar la incorporación de más proyectos de modelación ambiental a nivel país en ríos críticos, considerando las limitantes de este proyecto de graduación experimental con el fin de evitar complicaciones de modelaciones y obtener resultados más detallados de modelación que pueden ser un insumo en acciones enfocados a mejoras de cuencas a nivel país.

El estado debe fortalecer las acciones y replantearse objetivos para el mejoramiento de la calidad de las cuencas del país, principalmente el Gran Área Metropolitana que aborden los problemas reales de vertimientos ilegales tanto de industrias como de comunidades, mediante instrumentos de apoyo y desarrollo integral, en respuesta a las problemáticas reales que presenta el río Bermúdez.

Una planificación territorial adecuada para las zonas aledañas a los cauces, implementada en función de las necesidades de los poblados, pero también se debe tomar en cuenta la capacidad y necesidades de las cuencas involucradas, como es el caso del río Bermúdez, en donde no se respeta los límites del cauce estipulados en la ley N° 7575

Se debe mejorar la gestión de permisos de vertidos por medio del reglamento en el cual se realice una evaluación de la capacidad de asimilación de contaminantes del cuerpo receptor, evitando consigo puntos críticos de contaminación en los ríos que afectan o comprometan la calidad del agua.

Incentivar el desarrollo de proyectos relacionados con el cambio climático y las cuencas hidrográficas del país, para determinar variaciones a futuro de los procesos de calidad del agua principalmente en los ríos que presentan mayor nivel de contaminación en el país.

CAPITULO 7. REFERENCIAS

- Alvarado, E. (2017). ICC Instituto Privado de Investigación sobre Cambio Climático (ICC). Manual de medición de caudales. Guatemala. 18 p
- Atuel, F. (2016). Estudio de la capacidad de autodepuración de los cursos de agua interiores de la provincia de Entre Ríos. (tesis de pregrado). Universidad Tecnológica Nacional. Concepción, Uruguay.
- Arenas, G. (2004). Modelación de la calidad de agua en el río Montaña Colombiano (Quebrada Lejía). (Tesis de pregrado). Universidad de los Andes, Colombia.
- Amarilla, R. (2017). Modelación matemática del contenido de oxígeno disuelto en el brazo ña cuá, aguas debajo de la represa de Yacyretá. (tesis de posgrado). Universidad Nacional de la Plata, Buenos Aires, Argentina.
- Amay, E & López, E. (2015). Estimación del Impacto del Cambio Climático en la Calidad del agua para la cuenca del Río Tomebamba en Monay. (Tesis de grado). Universidad de Cuenca. Cuenca, Ecuador.
- Ballesteros, E. (2015). Métodos y técnicas de investigación Aplicada y de Mercados y Teoría de la comunicación.
<https://eprints.ucm.es/id/eprint/35985/19/EL%20%20GR%C3%81FICO%20%20DE%20%20CAJA.pdf>
- Brand, D. (2019). Efectos de los tensos activos en el medio ambiente. Gerencia Ambiental y Desarrollo Sostenible Empresarial.
- Bozal, J., & Cabrezizo, D. (2016). Física y Química. Madrid, España: Editex S.A.
- Buitrago, C., Hernández, J & González, J. (2018). Guía Nacional de modelación del recurso hídrico para aguas superficiales continentales. Dirección de gestión integral del recurso hídrico. Colombia, Bogotá.
- Bedoya, S & Lozano, N. (2019). *Comparación de resultados arrojados por un modelo simplificado a partir de información de corrientes poco complejas simuladas en Qual2kw. (Tesis pregrado)*. Universidad Tecnológica de Pereira. Risaralda, Colombia.

- Caicedo, J & Coello, J. (2010). *Determinación de la calidad del agua de los ríos de la provincia de Chimborazo, parámetros: Demanda Bioquímica de Oxígeno, Nitratos, Sólitos Totales Disueltos, Oxígeno Disuelto y Amonio*. (Tesis pregrado). Universidad Nacional de Chinborazo, Riobamba, Ecuador.
- Castro, M. (2015). *APLICACIÓN DEL QUAL2Kw EN LA MODELACIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA DEL RÍO GUACAICA, DEPARTAMENTO DE CALDAS, COLOMBIA*. (Tesis posgrado). Universidad Nacional de Colombia, Manizales, Colombia.
- Cárdenas, G., Mafla, F., López, M., y Duque, C. (2009). Simulación de la calidad de agua en la quebrada Chapal. Una aplicación al modelo QUAL2K. *Revista UNIMAR*
- Chapra, S., Pelletier, G y Tao, H. (2012). *QUAL2K: A Modeling Framework for Simulating River and Stream Water Quality, Version 2.12: Documentation and Users Manual*. Civil and Environmental Engineering Dept., Tufts University, Medford, MA.
- Chaves, M. (2014). *Análisis de los cambios de uso de suelo y su respuesta hidrológica de los años 2000 al 2020 en la cuenca de los ríos quebrada Seca y Bermúdez*. (Tesis de posgrado). Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica.
- Chavarría, B. (2018). Efecto del cambio climático sobre la capacidad de autodepuración de la microcuenca del Río Bermúdez mediante el modelo QUAL2K. *Practica Profesional Supervisada*. Universidad Nacional, Costa Rica.
- Chapra, S., Pelletier, G y Tao, H. (2012). *QUAL2K: A Modeling Framework for Simulating River and Stream Water Quality, Version 2.11: Documentation and Users Manual*. Civil and Environmental Engineering Dept., Tufts University, Medford, MA.
- Decreto Ejecutivo 33903-MINAE-S. (2007). Reglamento para la Evaluación y Clasificación de la Calidad de Cuerpos de Agua Superficiales. *Diario Oficial La Gaceta*, 178.
- Decreto 1076. (2015). Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible. <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=78153>
- Díaz, B. (2004). Modelación de la calidad del agua en el interceptor Río Bogotá en los tramos Fucha-Tunjuelo-Canoas. (Maestría). Universidad de los Andes, Colombia.
- Echeverría, C. (2016). Modelación de la calidad del agua del río Mapocho frente a escenarios futuros. (Maestría). Universidad Católica de Chile. Santiago, Chile.

Environmental Protection Agency, (EPA). <http://www.epa.gov/>. 2007-2008.

Estado de la Nación. (2018). Desarrollo Humano Sostenible. Recuperado de <https://estadonacion.or.cr/2017/assets/en-23-2017-book-low.pdf>

Escobar, J. (2002). La Contaminación de los Ríos y sus efectos en las áreas costeras y el mar. Naciones Unidas, CEPAL, Santiago de Chile, Chile.

Fernández, C & Baptista, P. (2014). Metodología de la Investigación. DF, México: McGRAW-HILL/Interamericana Editores S.A.

García, M., Carvakal, Y & Jiménez, H. (2007). La gestión integrada de los recursos hídricos como estrategia de adaptación al cambio climático. *Ingeniería y Competitividad*. Vol 9 (1):p 19-29.

Gil, C. (2018). R para profesionales de los datos: una introducción. Recuperado de https://datanalytics.com/libro_r/_main.pdf

Guía Nacional de Modelación del Recurso Hídrico para aguas superficiales continentales. (2018). Dirección de Gestión Integral de Recurso Hídrico. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, Bogotá, Colombia.

Guzmán, I; Watson, F & Villagra, K. (2018). Modelación Hidrodinámica y de Transporte de Sedimentos para identificar las zonas de riesgo de inundación en la parte baja de la cuenca del Río Matina, Limón. (Tesis pregrado). Tecnológico de Costa Rica. Cartago, Costa Rica.

Herzog, S. K., Martinez, R., Jorgensen, P. M & Tiessen, H. (2012). Cambio climático y Biodiversidad de los Andes Tropicales, París,

Holguín, J. (2014). Estudio de actualización del modelo de calidad del agua del río Palo 2011 tramo puente de Guachené-Bocas del Palo. Subdirección de Gestión Ambiental. Corporación Autónoma Regional de Cauca. Recuperado de

http://www.crc.gov.co/files/GestionAmbiental/RHidrico/INFORME_MODELACION_DE_L_RIO_PALO_CONVENIO_MARCO_25-05-2012.pdf

Instituto Meteorológico Nacional. (2008). Clima, variabilidad y cambio climático en Costa Rica. Comité Regional de Recursos Hidráulicos. Recuperado de

http://www.cambioclimaticocr.com/multimedia/recursos/mod-1/Documentos/el_clima_variabilidad_y_cambio_climatico_en_cr_version_final.pdf

- Illiana, M. (2014). Estudio de absorción de fosfatos en aguas de depuradora mediante intercambiadores iónicos. Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial de Barcelona. España, Barcelona.
- Isea, D., Vargas, L., Durán, J., Delgado, J., & Mendoza, R. (2015). Parámetros biocinéticos que rigen la ecuación de la DBO en aguas residuales de una industria procesadora de cangrejos. *Revista Técnica de la Facultad de Ingeniería Universidad del Zulia*, 38(2), 112-121.
- Hernando, L., y Orozco, R. (2015). Disponibilidad del recurso hídrico en la microcuenca del río Bermúdez. Región Central de Costa Rica. Observatorio Medio Ambiental, Volumen (18), 165-181.
- Herrera, J., Rodríguez, S., Rojas, J., Herrera, E., y Chaves, M. (2013). Variación temporal y espacial de la calidad de las aguas superficiales en la subcuenca del río Virilla (Costa Rica) entre 2006 y 2010. *Revista de Ciencias Ambientales*. Vol 45(1): 51-62.
- Jaramillo, M., Escobar, G., Forni, L., Purkey, D., Lozano, G., Rodríguez, C., y Castaño, J. (2016). Integración de los modelos WEAP y QUAL2K para la simulación de la calidad del agua de fuentes superficiales. *Aqua-LAC*, 8(2):14-24.
- Ley Forestal N° 7575. Protocolo de lineamientos de las áreas de protección.
- La Nación. (2007). Un voto Trascendental: Acciones para eliminar los focos de contaminación en la cuenca del Tárcoles. Recuperado de <https://www.nacion.com/opinion/un-voto-trascendental/J5ZKLWJOMFE5BAGT3VJU6JD4RY/story/>
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2018). Guía Nacional de Modelación del Recurso Hídrico para Aguas Superficiales Continentales Bogotá, D.C.2018. Recuperado de http://www.andi.com.co/Uploads/Propuesta_gu%C3%ADa_modelaci%C3%B3n.pdf
- Monzón Pineda, Andrés, & Mojica, Daniel, & Pino, Natalia, & Bustamante, Carlos, & Posada, Enrique (2013). *Establecimiento de índices de calidad ambiental de ríos con bases en el comportamiento del oxígeno disuelto y de la temperatura*. *Dyna*, Vol (80), 192-200

- Montes, R., Navarro, I., Domínguez, R y Jiménez, B. (2013). *Metodología para evaluar la modificación de la capacidad de autodepuración de los ríos por efecto del cambio climático*. (Tesis de doctorado). Universidad Nacional Autónoma de México. México.
- Rodríguez, D. (2020). Implementación del modelo de calidad de agua QUAL2K, sobre un tramo del río Pamplonita, para simulación de escenarios.
- Mondragón, M. (2014). *Uso de la correlación de Spearman en un estudio de intervención en fisioterapia*. Movimiento Científico. Corporación Universitaria Iberoamericana, Vol (1), 98-104.
- Muñoz, H., Orozco, S., Vera, A., Suárez, J., García, E., Neria, M & Jiménez, J. (2015). *Relación entre oxígeno disuelto, precipitación pluvial y temperatura: río Zahuapan, Tlaxcala, México*. Universidad Autónoma de Tlaxcala, México. Vol (5), 59-74.
- Organización de Naciones Unidas (ONU). (2019). *Informe de políticas de ONU-AGUA sobre el cambio climático y el Agua*. Recuperado de https://www.unwater.org/app/uploads/2019/12/UN-Water_PolicyBrief_Water_Climate-Change_ES.pdf
- Raffo, E & R, E. (2014). Caracterización de las aguas residuales y la demanda bioquímica de oxígeno. *Industrial Data*. 17(1), 71-80.
- Reglamento N°33601. (2007). Reglamento Vertido y Reúso de Aguas Residuales.
- Reglamento N°33903. (2007). Reglamento para la Evaluación y Clasificación de la Calidad de los Cuerpos de Agua Superficiales.
- Riaño, M., F, Vigoya, L., Mancipe, N & Sanabria, M. (2018). Formulación eco hidráulica para evaluar la capacidad de autodepuración de ríos de montaña. *Producción+ limpia*, 13(2), 103-118
- Rueda, O. (2016). Análisis comparativo de tres métodos para la medición de caudales en canales abiertos. (Tesis de pregrado). Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Bogotá, Colombia
- Ros, A. (2011). Parámetros químicos de calidad de las aguas, Nitritos, nitratos y fosfatos. El agua, calidad y contaminación. Recuperado de <http://www.mailxmail.com/curso-agua-calidad-contaminacion-1-2/parametros-quimicos-calidad-aguas-nitritos-nitratos-fosfatos>.

- Rodriguez, D. (2020). Implementación del modelo de calidad del agua QUAL2K, sobre un tramo del Río Pamplonita, para simulación de escenarios. (Tesis de grado). Universidad Católica de Colombia, Bogotá, Colombia.
- Poveda, G., Vélez, J., Mesa, O., Ceballos, L., Zuluaga, M & Hoyos, C. (2002). Estimación de caudales mínimos para Colombia mediante regionalización y aplicación de la curva de recesión de caudales. Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia.
- Sánchez, D. (2019). Calidad del agua en ríos. Ingeniería Ambiental. Universidad de Castilla. La Mancha, España.
- Suárez, J. (2008). *Calidad de agua en ríos Autodepuración. Modelos de calidad de aguas.* (Tesis Posgrado). Universidad de Coruña. La Coruña, España
- Solano, M. (2011). Impacto ambiental por aguas residuales y residuos sólidos en la calidad del agua de la parte media-alta de la microcuenca del río Damas y propuesta de manejo. (tesis de pregrado). Universidad Nacional. Costa Rica, Heredia.
- Solano, C. (2016). Estimación preliminar de cargas de nutrientes y sedimentos debido a cambios en el uso del suelo, considerando la implementación de un modelo SWAT. Caso de estudio río Teusacá. (Tesis de pregrado). Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia.
- Soto, L. (2019). *Análisis del nivel de contaminación en la cuenca media alta del río Guápiles, Pococí.* (Tesis pregrado). Tecnológico de Costa Rica. Cartago, Costa Rica
- Suarez, A; Morera, C & Blanco, K. Gestión de cuencas hidráficas: Experiencias y perspectivas desde la UNA. *EUNA*. Vol (1):197
- Tapia, G & Molina, J. (2012). Metodología para la medición de la velocidad del flujo en un río en el diagnóstico de la socavación en pilas de un puente, utilizando un dispositivo electrónico. Instituto Mexicano del Transporte. Sanfandila, México.
- Torres, G & L, E. (2017). DISMINUCIÓN DE SÓLIDOS DE AGUAS GRISES MEDIANTE UN PROCESO DE AIREACIÓN. *Ra Ximhai*, 13(3),393-404
- Uecker, D. (2016). Application of QUAL2K model to macrophyte rich silver bow creek. (Tesis de Maestría). Montana Tech, United States.

United Nations Environment. (2019). *Global Environment Outlook – GEO 6: Healthy Planet, Healthy People*. Nairobi, Kenya. doi: 10.1017/9781108627146

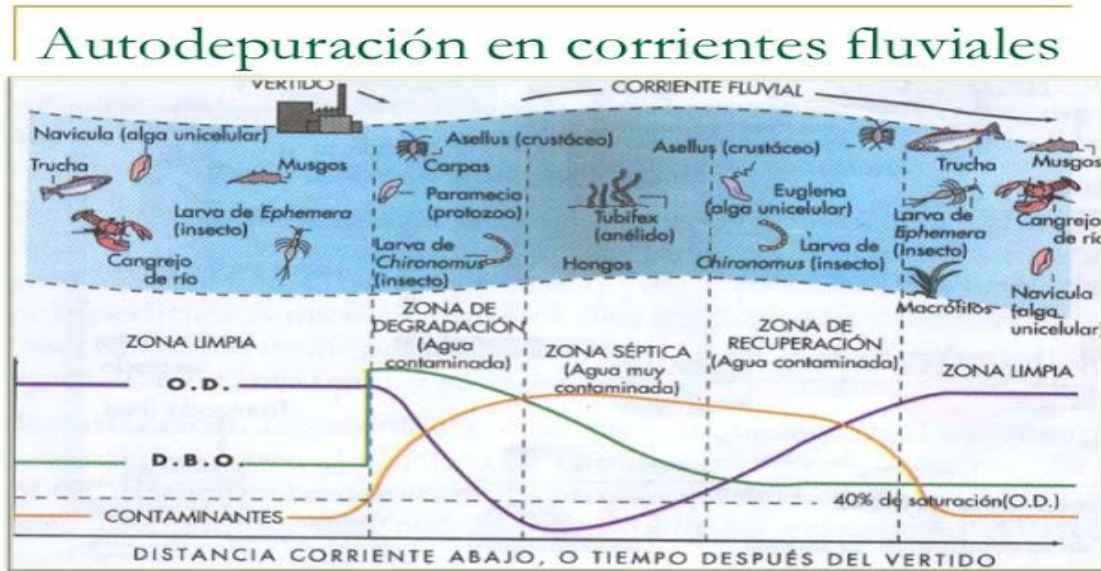
Valencia, R., Sánchez, J., Ortiz, E & Gómez, J. (2007). La contaminación de los ríos, otro punto de vista Primera Parte. *Revista de ciencia y tecnología de la UACJ*. Vol 5(1): 35-49.

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 pregrado). Universidad de Costa Rica. San José. Costa Rica.

Anexos

Anexo 1.

Fases del proceso de autodepuración



Anexo 2.

Plataforma visual del modelo QUAL2KW

La imagen muestra la interfaz de usuario del modelo QUAL2KW, implementada en Microsoft Excel. El archivo se llama "Bermúdez River".

El menú de opciones incluye:

- Open Old File
- Run Fortran

El panel de configuración muestra los siguientes parámetros:

Parameter	Value
System ID:	
River name	Bermúdez River
Saved file name	Ejercicio8
Directory where file saved	E:\archivos\
Month	11
Day	22
Year	2018
Local time hours to UTC	-5
Daylight savings time	Yes
Calculation:	
Calculation step	0.3 hours
Final time	2 day
Solution method (integration)	Euler
Solution method (pH)	Bisection
Time zone	Eastern Standard Time
Program determined calc step	0.187500 hours
Time of last calculation	0.12 minutes
Time of sunrise	7:35 AM
Time of solar noon	1:23 PM
Time of sunset	7:46 PM

El panel inferior muestra los módulos de simulación: QUAL2K, Time Zones, Headwater, Downstream, Reach, Reach Rates, Air Temperature, Dew Point Temp, etc.

Anexo 11.

Determinación de los instrumentos, productos y limitaciones que se presentan en cada actividad de las etapas

*E	Actividades	Instrumentos	Producto	Limitaciones
1	Investigación previa	Guías de modelo, tesis relacionadas	Información, datos necesarios	-
	Inspección de campo	Guías caudales y, trazadores, equipo de trabajo, equipo medición	Descripción área de estudio, caracterización de vertidos	Compra de caudalímetros y conductímetros para medición.
	Caracterización hidráulica	Trazadores (Sal), conductímetro, equipo de medición, equipo de trabajo	Tiempos de viaje del río, hidrodinámica	
2	Campaña de toma de muestras	Equipo de trabajo, equipo de medición, reunión de coordinación	Muestras para parámetros químicos y biológicos, determinación de parámetros físicos.	Cierta cantidad de muestras, debido al incremento de costos monetarios.
	Análisis de muestras	Laboratorio de análisis ambiental	Determinación de parámetros químicos y biológicos	Largos tiempos de análisis que retrasan modelación
	Modelación preliminar	Modelo QUAL2KW	Resultados de la modelación preliminar	-
	Ajuste del modelo	QUAL2KW	Modelación más representativa del estado	

3			actual debido a la reducción de incertidumbre	Errores inesperados en el proceso de la modelación y ajuste de la incertidumbre.
	Modelación en condiciones futuras	Informe IMN (2012), QUAL2KW	Modelación con inclusión del cambio climático	
	Análisis de datos	Excel	Resultados de correlación entre modelación actual y futura	

*E: Etapa

Anexo 12.

Método de análisis del Laboratorio de Análisis Ambiental para cada parámetro fisicoquímico

Parámetro	Método de análisis de laboratorio
DBO rápida y lenta	Método modificado a partir de: SMEWW-APHA-AWWA-WEF5210D (2017) y 5510B (2017), HACH10360 (2015) y OXITOPBA 31107DE02/11.04/AS/OxiTopIS-6_IS-12, conforme al reglamento para Vertido y reuso de aguas residuales N°33601-MINAE-S/Electrodo
Nitrógeno Orgánico	Método basado en: HACH10072(2015) / Espectrofotometría UV-Vis
Nitrato	Método modificado a partir de: SMEWW-APHA-AWWA-WEF4110B (2017) /Cromatografía de Iones
Nitrito	Método modificado a partir de: SMEWW-APHA-AWWA-WEF4500NO2-B(2017)/Espectrofotometría UV-Vis
Amonio	Método modificado a partir de: SMEWW-APHA-AWWA-WEF4500-NH3F(2017)/Espectrofotometría UV-Vis
Fosforo Orgánico	Método modificado a partir de: SMEWW-APHA-AWWA-WEF4500-PC (2017), conforme al reglamento para Vertido y reuso de aguas residuales N°33601-MINAE-S/Espectrofotometría UV-Vis
Fosforo Inorgánico	Método modificado a partir de: SMEWW-APHA-AWWA-WEF4500-PC (2007) /Espectrofotometría UV-Vis

Alcalinidad	Método modificado a partir de: SMEWW-APHA-AWWA-WEF2320B (2017) /Volumétrico
-------------	---

Anexo 13.

Datos geográficos para la modelación del río Bermúdez

Parte de microcuenca	Punto	Código	Este	Norte	Elevación (m)
			CRTM05 (m)	CRTM05 (m)	
Alta	Inicial	I1	1106169.982	490093.986	1240
	Medio	I2	1105542.142	490397.031	1214
	Final	I3	1104535.174	490104.805	1200
Media	Inicial	M1	1102722.999	485936.623	1024
	Medio	M2	1102384.419	484735.407	1001
	Final	M3	1102363.012	483141.861	975
Final	Inicial	F1	1102775.414	479129.329	899
	Medio	F2	1102417.559	478716.273	897
	Final	F3	1102293.561	478067.697	886

Anexo 14.

Medición de caudal volumétrico de los vertidos del área de estudio



Anexo 22.

Material de muestreo: (1) Galón, (2) medidor oxígeno disuelto, (3) pH metro, (4) recipiente fosforo total y soluble

