

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA

LA MOLINA

ESCUELA DE POSGRADO

MAESTRÍA EN RECURSOS HÍDRICOS



**“APLICACIÓN DEL MODELO QUAL2KW EN LA EVALUACIÓN
DE LA CALIDAD DEL AGUA EN LA CUENCA DEL RÍO
CHILLÓN, PERÚ”**

Presentada por:

CAROL VANESSA HERRERA LEÓN

**TESIS PARA OPTAR EL GRADO DE MAESTRO
MAGISTER SCIENTIAE EN RECURSOS HÍDRICOS**

Lima - Perú

2024

APLICACIÓN DEL MODELO QUAL2KW EN LA EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA EN LA CUENCA DEL RÍO CHILLÓN, PERÚ

INFORME DE ORIGINALIDAD

15%

INDICE DE SIMILITUD

14%

FUENTES DE INTERNET

10%

PUBLICACIONES

6%

TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1	docta.ucm.es Fuente de Internet	<1 %
2	repositorio.cuc.edu.co Fuente de Internet	<1 %
3	dspace.ups.edu.ec Fuente de Internet	<1 %
4	www.transparencia.munlima.gob.pe Fuente de Internet	<1 %
5	qdoc.tips Fuente de Internet	<1 %
6	repositorio.unp.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
7	www.coursehero.com Fuente de Internet	<1 %
8	es.scribd.com Fuente de Internet	<1 %

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA
LA MOLINA**

**ESCUELA DE POSGRADO
MAESTRÍA EN RECURSOS HÍDRICOS**

**“APLICACIÓN DEL MODELO QUAL2KW EN LA
EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA EN LA
CUENCA DEL RÍO CHILLÓN, PERÚ”**

**TESIS PARA OPTAR EL GRADO DE MAESTRO
MAGISTER SCIENTIAE**

Presentada por:

CAROL VANESSA HERRERA LEÓN

Sustentada y aprobada ante el siguiente jurado:

Mg.Sc. Rosa Miglio Torres
PRESIDENTE

Dr. Edilberto Guevara Pérez
ASESOR

Ph.D. Absalón Vásquez Villanueva
MIEMBRO

M.Sc. Ricardo Apaella Nalvarte
MIEMBRO

DEDICATORIA

A mi mamá por su amor y apoyo en todo momento, mucho más en los días más complicados, por siempre darme y demostrarme con el ejemplo los mejores hábitos y valores que me han ayudado a crecer profesionalmente y ser una mejor persona cada día, gracias por escuchar mis sueños y ayudarme a cumplirlos.

A Canela por hacer cada día más feliz, hacerme una mejor persona y por todo el amor que me demuestras sin decirme una palabra.

A mi hermana por su cariño y con su forma de ser darme el impulso de arriesgarme a cumplir mis sueños.

A mi papá por impulsarme a ser más independiente cada día, por su apoyo y cariño.

Los amo y admiro mucho.

AGRADECIMIENTO

Agradecer a Dios por guiarme y darme la fortaleza para continuar todos los días cumpliendo mis sueños.

A mi asesor Edilberto Guevara por su apoyo en todo momento en la elaboración de la tesis, su constante motivación y paciencia para la realización de esta investigación.

ÍNDICE

I.	INTRODUCCIÓN.....	1
II.	REVISIÓN DE LA LITERATURA.....	3
	2.1. ANTECEDENTES DEL ANÁLISIS COMPARATIVO DE DOS MODELOS DE CALIDAD DEL AGUA	3
	2.2. CONCEPTOS TEÓRICOS.....	7
	2.3. ANÁLISIS DE LA CALIDAD DEL AGUA Y SU IMPACTO AMBIENTAL...	9
	2.4. MODELACIÓN PARA EL ESTUDIO DE LA CALIDAD DEL AGUA.....	10
	2.5. BASE LEGAL	17
III.	MATERIALES Y MÉTODOS.....	21
	3.1. RECOPIACIÓN Y ANÁLISIS DE INFORMACIÓN	21
	3.1.1. TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS.....	21
	3.1.2. DELIMITACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO Y PUNTOS DE MONITOREO	21
	3.2. EVALUACIÓN DE MODELOS EXISTENTES Y SELECCIÓN	21
	3.2.1. IDENTIFICACIÓN Y EVALUACIÓN DE MODELOS DE ESTUDIO PARA LA EVALUACIÓN DE CALIDAD DEL AGUA.....	21
	3.2.2. ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS MODELOS DE CALIDAD DE AGUA	22
	3.3. APLICACIÓN DEL MODELO QUAL2KW EN LA CUENCA DEL RÍO CHILLÓN.....	22
	3.3.1. INFORMACIÓN GENERAL DEL MODELO	23
	3.3.2. INGRESO DE RESULTADOS DE MONITOREO DE LA CALIDAD DEL AGUA	24
	3.3.3. IDENTIFICACIÓN DE FUENTES PUNTUALES Y DIFUSAS	28
	3.3.4. DEFINICIÓN DE PARÁMETROS A EVALUAR.....	29
	3.3.5. DEFINICIÓN DE CONSTANTES HIDRÁULICAS	30

3.3.6. DEFINICIÓN DE CONSTANTES CINÉTICAS.....	30
3.3.7. CALIBRACIÓN	31
3.3.8. VALIDACIÓN.....	32
3.4. ESCENARIOS DE APLICACIÓN CON MEDIDAS DE MITIGACIÓN Y SIN MEDIDAS.....	32
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	34
4.1. RECOPIACIÓN Y ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN	34
4.2. EVALUACIÓN DE LOS MODELOS EXISTENTES Y SELECCIÓN DEL MODELO A APLICAR A LA CUENCA.....	36
4.3. APLICACIÓN DEL MODELO QUAL2KW EN LA CUENCA DEL RÍO CHILLÓN	37
4.3.1. CALIBRACIÓN	37
4.3.2. VALIDACIÓN DEL MODELO	38
4.3.3. APLICACIÓN DEL MODELO.....	38
4.4. ESCENARIO DE APLICACIÓN.....	44
V. CONCLUSIONES.....	48
VI. RECOMENDACIONES	50
VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	51
VIII. ANEXOS.....	54

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Información general del modelo.....	23
Tabla 2: Puntos de monitoreo del río Chillón y ubicación	28
Tabla 3: Fuentes contaminantes identificadas en la cuenca del río Chillón	29
Tabla 4: Definición de constantes hidráulicas	30
Tabla 5: Definición de constantes cinéticas	31
Tabla 6: Puntos de monitoreo de calidad del agua en la cuenca del río Chillón	36
Tabla 7: Evaluación y comparación de modelos de calidad del agua	36
Tabla 8: Parámetros para determinar la aplicabilidad del modelo a la cuenca de estudio	37
Tabla 9: Constantes calibradas en la cuenca del río Chillón	38
Tabla 10: Puntos de monitoreo de calidad del agua en la cuenca del río Chillón año 2014	54
Tabla 11: Puntos de monitoreo de calidad del agua en la cuenca del río Chillón año 2017	56
Tabla 12: Puntos de monitoreo de calidad del agua en la cuenca del río Chillón año 2021	59

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Esquema general del QUAL2KW	12
Figura 2: Esquema del balance de flujo.....	13
Figura 3: Esquema del balance térmico.....	13
Figura 4: Esquema del balance de masa.....	14
Figura 5: Diagrama del desarrollo del modelo	22
Figura 6: Unidad hidrográfica Chillón	25
Figura 7: Imagen de hoja de cálculo de datos generales del río	26
Figura 8: Imagen de la hoja de cálculo de los datos de calidad del agua a calibrar	26
Figura 9: Imagen de la hoja de cálculo Reach.....	27
Figura 10: Hoja de trabajo temperatura.....	27
Figura 11: Imagen de la hoja de point sources	29
Figura 12: Ubicación de los puntos de monitoreo.....	35
Figura 13: Calibración del caudal.....	39
Figura 14: Validación del caudal.....	39
Figura 15: Calibración de la temperatura	40
Figura 16: Validación de la temperatura	40
Figura 17: Calibración de oxígeno disuelto.....	41
Figura 18: Validación de oxígeno disuelto.....	41
Figura 19: Calibración de DBO5.....	42
Figura 20: Validación de DBO5.....	42
Figura 21: Calibración de sólidos totales disueltos	43
Figura 22: Validación de sólidos totales disueltos	43
Figura 23: Análisis de modelo y escenario DBO5 sin medidas de control	44
Figura 24: Análisis de modelo y escenario DBO5 con medidas de control	45
Figura 25: Análisis de modelo y escenario sólidos totales disueltos sin medidas de control.....	45
Figura 26: Análisis de modelo y escenario sólidos totales disueltos con medidas de control	46

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO 1: PUNTOS DE MONITOREO DEL 2014	54
ANEXO 2: PUNTOS DE MONITOREO DEL 2017	56
ANEXO 3: PUNTOS DE MONITOREO DEL 2020	59

RESUMEN

El crecimiento poblacional e industrial ocasionan un incremento en el uso del agua e impactos en los cuerpos de agua superficial, debido a que son las principales fuentes de agua y receptores de vertimientos de aguas residuales. Este escenario ocurre en la zona de estudio, parte de la población que vive cerca de la cuenca de agua del río Chillón, consume el agua directamente para sus actividades básicas, riego de sus cultivos agrícolas, así como para las actividades industriales, por lo que es importante resaltar que también vierten sus efluentes directamente al río. Si bien es cierto, los monitoreos de calidad del agua, realizados por la ANA permiten conocer la concentración de los diferentes contaminantes en un punto determinado, sin embargo, no es del todo apropiado por las características particulares y variables a lo largo de la cuenca. Por lo expuesto y de acuerdo con las características del río Chillón, fue necesario seleccionar y desarrollar el modelo QUAL2Kw para evaluar la calidad del agua de su cauce natural y bajo diferentes escenarios de cuenca, simulando la interacción de degradación y transporte de los componentes descargados en el cuerpo de agua en temporada seca y temporada de avenida. El uso de un software especializado y de los datos de los parámetros de campo de la corriente de agua de los puntos de interés, permitieron establecer una línea base de modelamiento de calidad del agua en la cuenca del río Chillón, identificando los tramos críticos de la cuenca.

Esta información permitirá que las instituciones responsables de la gestión del agua puedan tomar acciones preventivas en el manejo de la cuenca.

Palabras clave: Río Chillón, Modelo QUAL2Kw, Software, Calidad de Agua, Simulación.

ABSTRACT

Population and industrial growth cause an increase in water use and impacts on surface water bodies, since they are the main sources of water and receivers of wastewater discharges. This scenario occurs in the study area, part of the population that lives near the Chillón River watershed consumes water directly for their basic activities, irrigation of their agricultural crops, as well as for industrial activities, so it is important to highlight that they also discharge their effluents directly into the river. Although it is true that water quality monitoring, carried out by ANA, allows us to know the concentration of different pollutants at a given point, however, it is not entirely appropriate due to the particular characteristics and variables throughout the basin. For the reasons stated above and in accordance with the characteristics of the Chillón River, it was necessary to select and develop the QUAL2Kw model to evaluate the water quality of its natural channel and under different basin scenarios, simulating the interaction of degradation and transport of the components discharged into the water body during the dry season and flood season. The use of specialized software and data on field parameters of water flow at points of interest allowed the establishment of a baseline for water quality modeling in the Chillón River basin, identifying critical sections of the basin.

This information will allow institutions responsible for water management to take preventive actions in the management of the basin.

Keywords: Chillón River, QUAL2Kw Model, Software, Water Quality, Simulation.

I. INTRODUCCIÓN

El agua es la base del desarrollo para las actividades humanas, por lo que es necesario e importante conocer su calidad antes y después de su uso; los efluentes vertidos a los ríos en cada actividad deben cumplir los estándares de los parámetros químicos, físicos y biológicos relacionados directamente con el uso que se le da a dicho recurso. El Perú cuenta con los estándares de calidad ambiental (ECA) para agua, establecidos en el Decreto Supremo (DS) N° 004-2017-MINAM, los cuales se agrupan en las siguientes categorías, de acuerdo con los usos: “...1: Poblacional y recreacional, 2: Extracción, cultivo y otras actividades marino-costeras y continentales, 3: Riego de vegetales y bebida de animales y 4: Conservación del ambiente acuático”. Estas categorías constituyen una herramienta práctica de análisis de la calidad del agua.

La ANA (2019) indicó que el río Chillón es la segunda fuente hídrica para las ciudades de Lima y Callao, con aproximadamente 107,2 hm³ de agua, de los cuales solo se gestionan 31 hm³. En la cuenca, esta agua se utiliza como fuente directa de agua, así como para las actividades industriales y la agricultura, siendo además un receptor y portador de las aguas residuales que recibe a lo largo de su recorrido. Sin embargo, la cuenca está sometida al impacto de diferentes fuentes de contaminación que limitan su uso y demandan grandes inversiones para el tratamiento previo. Por tanto, dentro de las buenas prácticas de manejo, se requiere llevar a cabo investigaciones para modelar la calidad de los cuerpos de agua, para prevenir los impactos ambientales o analizar modelos que ya han sido satisfactorios en otras latitudes y evaluar su aplicabilidad al caso de estudio.

El objetivo de la presente investigación es aplicar el modelo QUAL2Kw para la evaluar la calidad del agua en la cuenca del río Chillón, utilizando la información contenida en la base de datos de los resultados del monitoreo de calidad del agua realizados por la Autoridad Nacional del Agua (ANA). Así, se determina el impacto de diversas fuentes de contaminación sobre los cuerpos de agua de toda la cuenca y se identifican cambios en la calidad del agua bajo diferentes escenarios de desarrollo y gestión; también en zonas sin monitoreo. Por lo que la aplicación del modelo constituye una herramienta muy importante para los organismos que controlan la calidad del agua en las cuencas y los responsables de

tomar decisiones formulen medidas preventivas y de gestión en la planificación del manejo de cuencas.

II. REVISIÓN DE LA LITERATURA

2.1. ANTECEDENTES DEL ANÁLISIS COMPARATIVO DE DOS MODELOS DE CALIDAD DEL AGUA

De acuerdo con el Informe de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos en el Mundo WWAP (2016), la gestión sostenible del agua promueve el acceso a servicios de saneamiento seguros, confiables y asequibles, mejorando los niveles de vida, expandiendo las economías locales, generando mejores empleos y cohesión social. El manejo sostenible del agua es un elemento clave del crecimiento y el desarrollo sostenible.

Aliaga (2010), realizó un estudio sobre la calidad ambiental del agua en el río Chillón, basado en fuentes de contaminación con visitas a campo e información bibliográfica en catorce estaciones de la cuenca, durante los años 2004 al 2006, analizando diversos parámetros físicos, químicos y microbiológicos. Los resultados indican un alto riesgo de presencia de: DBO₅, coliformes fecales o termotolerantes, Pb, coliformes totales y Fe.

La Dirección General de Salud Ambiental DIGESA (2011) también realizó evaluaciones a la calidad del agua en la cuenca del río Chillón, habiendo encontrado un elevado riesgo de contaminación, significativa para la salud de las personas y el ambiente en los siguientes parámetros: coliformes termotolerantes, escherichia coli, hierro, aceites y grasas plomo y coliformes totales; así mismo, observándose un alto riesgo en los parámetros de manganeso y cobre.

Los agricultores de la cuenca utilizan el agua del río Chillón, por lo que se evidenciaron algunos segmentos de la cuenca sin agua, sin embargo, el caudal se incrementó en asentamientos humanos que presentaban vertimientos directos de agua residuales industriales. Según el Ministerio del Ambiente, MINAM (2010) los puntos de contaminación más importantes observados en esta cuenca se deben principalmente a residuos industriales y vertidos de residuos. Esto es un riesgo para la salubridad de los cultivos regados con estas aguas y de la población que vive principalmente en las zonas aledañas.

Reyes (2012), analizó las características fisicoquímicas y microbiológicas durante los años 2008 al 2010 en la investigación sobre “Estudio de la contaminación de las aguas del río Chillón”, se detectaron que las concentraciones de coliformes totales y de coliformes fecales excedían la categoría 3 del agua de la ECA y, por lo tanto, no eran aptas para el riego de vegetales y el consumo de agua para animales, así como los valores de concentración de cobre, cromo, hierro y plomo significativamente altos.

Terrones y Herrera (2015), realizaron un estudio para identificar el riesgo potencial para las áreas agrícolas irrigadas con agua de la cuenca baja del río Chillón. Analizaron los resultados de los monitoreos realizados por la ANA, en el periodo 2004 al 2013 y encontraron que los componentes de Cromo, Cadmio, Plomo y Mercurio estaban relacionados con el riego en ECA - Agua, Categoría 3 - Bebidas Vegetales y Animales, concluyeron que durante la estación seca la presencia de metales pesados en el agua supone un alto riesgo.

A través del monitoreo participativo de la calidad del agua, la Autoridad Local del Agua Chillón, Rímac y Lurín se evaluó la calidad de los cuerpos de agua superficiales naturales en la cuenca del río Chillón y se determinó que los parámetros evaluados, como níquel, sulfatos, hierro, sulfuros, cobre, fosfatos, coliformes termotolerantes y aceites y grasas; superaron los estándares de calidad del agua ANA (2016 -b).

La Autoridad Nacional del Agua ANA (2018), indicó que la evaluación de la calidad ambiental del agua se desarrolló comparando los resultados de parámetros químicos, biológicos y físicos, basándose únicamente en los parámetros y las concentraciones especificadas en las normas de calidad ambiental (ECA) para el agua.

Desde hace algunos años se están desarrollando modelos matemáticos para la evaluación de la calidad del agua utilizando información local. Estas herramientas utilizan algoritmos matemáticos y físicos que operan mediante interrelaciones en sus componentes.

A pesar de los recursos computacionales y modelos tradicionales de amplia difusión como QUAL2K, AQUASIM y/o STREETER-PHELPS y WASP (Water Quality Analysis Simulation Program), entre otros, se continúan actualizando e innovando, estos conservan el algoritmo básico de búsqueda para el modelamiento García (2008).

Rangel (2012) en su estudio sobre el desarrollo de un modelo hidrodinámico y de calidad del agua para la Presa Aguamilpa Nayarit en México, afirmó que dependiendo de las condiciones de la presa se puede desarrollar el modelamiento bidimensional utilizando el

modelo CE QUAL-W2 (longitudinal y vertical), caracterizando las propiedades químicas, biológicas y físicas del agua en diferentes condiciones y predice con precisión el comportamiento de variables clave de calidad del agua.

Cubillos (2013) indicó en su estudio “Transporte de Contaminantes en Sistemas Fluviales y Evaluación de aplicabilidad del modelo WASP”, que el modelo se puede utilizar para evaluar la efectividad del transporte de contaminantes en los sistemas fluviales de las cuencas del Elqui y Choapa en la región de Coquimbo de Chile. Teniendo en cuenta los fenómenos de alto y bajo flujo, presentan concentraciones de metales, señala además que el modelo WASP cuenta con una interfaz amigable que se puede utilizar en todas las versiones de Windows.

García et al. (2014) en su estudio “Dispersión de contaminantes en cuenca Tumaque entre Lara y Yaracuy en Venezuela”, desarrollaron el modelo WASP 7.4 para estimar la dispersión de contaminantes mediante la segmentación de la columna de agua y derivar resultados de cloruro y SST.

Castro (2015) en su estudio “Aplicación de QUAL2Kw en el modelamiento de la calidad del agua del río Guacaca en la provincia de Caldas, Colombia” indicó que el modelo QUAL2Kw puede ser utilizado como una herramienta para la gestión adecuada de los recursos hídricos a través del monitoreo microbiológico y fisicoquímico, parámetros tales como: sólidos en suspensión, conductividad, oxígeno disuelto y otros similares. Utilizando el modelo, se pudieron identificar segmentos clave con altos niveles de contaminantes en la fuente de agua, debido a actividades agrícolas y descargas de aguas residuales domésticas. Sin embargo, el impacto fue evidente en el río Olivares, confirmando la importancia de utilizar modelos de simulación para gestionar las cuencas.

Según la valoración de Jaramillo et al. (2016), el impacto de los caudales domésticos y agrícolas en el río La Vieja en su estudio “Integración de modelos WEAP y QUAL2K utilizados para el modelamiento de aguas superficiales en la cuenca del río La Vieja, Colombia”; una de las ventajas mencionadas de integrar WEAP con QUAL2k, dos herramientas para analizar la cantidad y calidad de 11 fuentes de agua, es la posibilidad de utilizar modelos QUAL2k para cambiar el comportamiento físico de los componentes del río y la estimulación de resultados utilizando WEAP a lo largo del tiempo. Asimismo, durante el 2011 se observaron evaluaciones situacionales de la contaminación y del comportamiento de parámetros de calidad del agua como temperatura, DBO5 y OD; se

concluyó que se podría realizar un análisis sistemático incluido en los modelos WEAP y QUAL2K.

Es importante destacar que en el estudio “Modelación de la calidad del agua de ríos de montaña impactados por humanos en la Serra Chica de Córdoba, Argentina”, se desarrolló en las principales fuentes hídricas en los fondos “Ríos Ceballos y Salsipuedes”. Se logró utilizar el modelo QUAL2K para evaluar la calidad y cantidad de vertimientos en el curso de agua, demostrando que el aporte de patógenos es del 100% en el Río Ceballos y del 90% en el Río Salsipuedes, afirmando que el modelo permite la planificación integrada de la gestión del agua a través del análisis del comportamiento actual y futuro de los cuerpos de agua (Formica et al 2015).

Bui et al. (2019), en la investigación “Integration of SWAT and QUAL2K for water quality modeling in a data scarce basin of Cau River basin in Vietnam” utilizaron los modelos QUAL2K y SWAT para obtener los datos requeridos; el primer modelo mencionado en el río Cau fue dividido en 46 segmentos, mostrando que los efluentes en su mayoría son domésticos, agrícolas e industriales de producción de alimentos. En el modelamiento se analizaron los parámetros como nitrógeno total (NT), temperatura, fósforo total (PT), oxígeno disuelto (OD) y demanda biológica de oxígeno (DBO). Llegando a la conclusión que la aplicación del modelo permite la gestión adecuada del cuerpo de agua.

Garcia (2019), en su investigación “Modelización de la calidad del agua del estero Guayjí, Cantón Quevedo, Provincia De Los Ríos, Año 2018-2019” indicó que el modelamiento con el software QUAL2K, del parámetro Oxígeno Disuelto, mostró un mejor desarrollo, que el modelo Streeter -Phelps durante el tiempo de trabajo.

Rodriguez (2020), aplicó el modelo QUAL2Kw en un tramo de 2 kilómetros del río Pamplonita y simuló cuatro escenarios. El primer escenario incluye vertimientos residuales domésticos, el segundo escenario no considera efluentes, el tercer escenario incluye vertimientos tratados y el cuarto escenario incluye vertimientos domésticos proyectados al 2030. Las simulaciones detectaron altas concentraciones de SST, DBO5 y coliformes totales, concluyendo que el modelo era apropiado y recomendando ampliar el estudio a otros tramos del río.

Ordoñez (2020), realizó el estudio de la calidad del agua del Río Chili en Arequipa, Perú, se realizó mediante el modelo WASP antes y después de la operación de la planta de

tratamiento “La Enlozada”, en tres estaciones 1-D, 2-D y 3-D, concluyendo que su investigación es una herramienta técnica para el manejo y procesamiento del sistema hídrico.

El modelo Streeter-Phelps permitió determinar el comportamiento del oxígeno disuelto en el río Uctubamba, posterior al vertimiento de aguas, Quiñones et al. (2020).

Hodali (2021), con la investigación “Evaluación de la Aplicabilidad del Programa Computacional WASP en la Simulación de la Calidad del Agua del Humedal del Río Cruces, Cuenca del Río Valdivia, Región de los Ríos, Chile”, permitió demostrar una adecuada simulación de la Temperatura, pH y OD.

2.2. CONCEPTOS TEÓRICOS

- **Aguas residuales:** Aguas que presentan cambios negativos en su calidad por las actividades humanas, necesitando tratamiento previo a su disposición en un cuerpo natural de agua o en el sistema de drenaje, OEFA (2014).
- **Calidad del agua:** Refleja las concentraciones físicas, químicas, orgánicas, inorgánicas y biológicas en los cuerpos de agua en el tiempo y el espacio (Sierra, 2011).
- **Contaminación física:** Es la concentración de sedimentos y otros parámetros físicos, que alcanzan un nivel de alteración del cuerpo de agua, así como la temperatura, así como oxígeno disuelto, Guevara (2016).
- **Contaminación química:** Es la concentración de los parámetros químicos que se relacionan con compuestos en el recorrido del cuerpo de agua, Guevara (2016).
- **Contaminación biológica:** Es la concentración de los parámetros biológicos presentes en el cuerpo de agua, como coliformes, bacterias y otros similares, Guevara (2016).
- **Estándar Nacional de Calidad Ambiental para Agua (ECA-Agua):** Es la concentración máxima de un elemento, sustancia química, física o biológica en el agua, que no afecta la salud humana ni al medio ambiente. Esto se aplica a las aguas nacionales presentes en la naturaleza, siendo importante para el diseño de políticas públicas, normas, y herramientas de gestión ambiental, ANA (2016-a).

- **Modelamiento:** Es una forma de representar la realidad y pronosticar el comportamiento de un determinado escenario, a través de variables y la relación entre las mismas, Brito et al (2011).
- **Monitoreo de calidad del agua:** Es la metodología que permite obtener la concentración de parámetros y determinar la calidad ambiental del agua en función de su uso, ANA (2016-a).
- **Parámetros de calidad del agua:** Son el conjunto de parámetros químicos, físicos y biológicos que participan en la obtención de resultados de calidad ambiental del agua, ANA (2016-a).

Según la investigación realizada por Reyes (2012) las características de calidad del agua, de acuerdo con su uso son:

- **Físicos:**

pH: Es un indicador que representa la potencial toxicidad de la concentración de metales pesados.

Temperatura: Es un indicador que altera la toxicidad de algunos parámetros presentes en el agua y disminuye el oxígeno disuelto.

Conductividad: Es un indicador indirecto de la salinidad

Sólidos Totales, volátiles, suspendidos y disueltos: Es un parámetro que refleja la participación de las sales disueltas, partículas en suspensión orgánicas o inorgánicas.

- **Bioquímicos:**

DBO₅: La Demanda Bioquímica de Oxígeno de cinco días, representa la contaminación originada por vertimientos industriales orgánicos y domésticos.

- **Químicos:**

Acidez/Alcalinidad: Es el indicador que permite identificar los impactos de carbonatos y sus derivados.

Nitritos: Es el indicador que forma ácido nitroso en solución ácida.

Plomo: Es el parámetro de metal pesado donde el agua presenta moderados niveles de acidez.

Mercurio: Es el parámetro de contaminación del agua proveniente habitualmente de actividades como la industria y minería, así como también de fenómenos naturales.

- **Punto de monitoreo:** Es la ubicación geográfica en campo, de donde se toma la muestra representativa del cuerpo de agua, para el posterior análisis de los parámetros que definen la calidad del agua, ANA (2016-a).
- **Recurso hídrico:** Es el recurso natural disponible en la superficie, de forma subterránea o continental, ANA (2016-a).
- **Ríos:** Es un conjunto de corrientes de agua que transcurren en una sola dirección con variación de la velocidad y el fujo, en función de las condiciones climáticas y del suelo, Sierra (2011).

2.3. ANÁLISIS DE LA CALIDAD DEL AGUA Y SU IMPACTO AMBIENTAL

La concentración humana cerca de los cursos de agua ha provocado que los sistemas de agua dulce se encuentren entre los primeros hábitats en degradarse. Emplean el agua, sus animales la consumen, usan sus cauces para recoger y transportar residuos que desembocan en instalaciones de tratamiento de aguas residuales. También es importante señalar que los ecosistemas de agua dulce son muy frágiles, los canales soportan cambios continuos en las condiciones de flujo, los lagos y estanques tienen ciclos ambientales lentos y tardan mucho en eliminar contaminantes, Guevara (2013).

Antes de elegir uno o más métodos de análisis de la calidad del agua o desarrollar un modelo, es importante comprender los estándares de calidad del agua que generalmente establecen regulaciones nacionales específicas, los cuales se definen como niveles de concentración adecuados de los componentes para garantizar la calidad del agua para una aplicación específica. Por otro lado, los estándares de calidad pertenecen a normativas nacionales que reducen la concentración de diversos componentes en el agua. En términos generales, se establecen criterios de calidad para los cuerpos de agua y estándares para el vertimiento de efluentes en dichos cauces. Por lo expuesto, se determinó que un criterio de calidad está asociado al logro de un objetivo, mientras que un estándar se refiere a un valor límite que permite cumplirlo, Castillo y Espinoza (2005).

Según el informe de ANA (2019), los principales focos de contaminación detectados en la cuenca del río Chillón son los efluentes de agua residuales directas y tratadas a través de tuberías canalizadas y la presencia de botaderos de residuos sólidos, entre otras actividades de contacto directo con el cuerpo de agua.

2.4. MODELACIÓN PARA EL ESTUDIO DE LA CALIDAD DEL AGUA

El uso del software permite representar el medio a través del modelamiento, ajustando las condiciones ambientales en el cuerpo de agua frente a factores externos, Castillo y Espinoza, (2005).

Actualmente, un cuerpo de agua se representa a través de modelos matemáticos, que permiten analizar una corriente natural, por ello es importante elegir el modelo adecuado, basado en la accesibilidad de la data y el objetivo del estudio a desarrollar. Para utilizar un modelo de calidad del agua es importante considerar los siguientes puntos:

- Definir los objetivos y el problema a solucionar, dado que nos permite definir la información necesaria.
- Determinar la teoría alrededor del problema, con la finalidad de identificar los componentes importantes.
- Construir las relaciones entre variables y parámetros entorno al problema.
- Contrastar el modelo con datos reales, si los resultados son muy distintos debe evaluarse el desarrollo del modelo.
- Analizar las limitaciones del modelo, en función de su aplicación.
- Aplicar el modelo y evaluar resultados, Rodríguez (2020).

Muchas instituciones como la Agencia de Protección Ambiental (EPA), han desarrollado diversos modelos matemáticos, que permiten analizar la calidad de agua de una fuente natural.

Es preciso mencionar que la modelación de un cuerpo de agua, debe darse de forma lógica y secuencial; iniciando por una modelación que estime parámetros hidrodinámicos como la velocidad, profundidad de flujo, coeficientes de dispersión, entre otros, posteriormente se evalúan las sustancias contaminantes no conservativas, es decir aquellos que pueden ser química o bioquímicamente reactivas como: oxígeno disuelto, DBO, fósforo, nitrógeno, patógenos, temperatura, entre otros; así como aquellos conservativos como sedimentos,

metales y sólidos disueltos. El desarrollo del modelo de las variables depende del transporte advectivo y difusivo, García (2008).

Como se ha mencionado, existen modelos matemáticos y físicos cuyo uso depende de la complejidad del caso de estudio. A continuación, se describen algunos conceptos de dichos modelos:

- **Unidimensionales:** Solo consideran la dirección del flujo, es decir en un solo sentido.
- **Bidimensionales:** Normalmente consideran la anchura del cauce y la variación del flujo, Se utilizan en ríos de mayor amplitud, con una variación constante de contaminantes en lo ancho de la ribera, por lo que se analiza la dirección del flujo en un sentido y lateral.
- **Tridimensionales:** Este tipo de modelos se utilizan en cuerpos de agua complejos superficiales y subterráneas, durante el modelamiento se necesita más información que en los modelos anteriores, presentando algunos inconvenientes durante su aplicación, Castillo y Espinoza (2005).

Los modelos también pueden clasificarse en dinámicos y estacionarios. Los primeros usan las dimensiones de espacio (longitud) y tiempo; mientras que los segundos analizan la variación en el espacio. Estos modelos requieren definir e identificar los parámetros de entrada, para obtener resultados representativos en la investigación. A continuación, se describen brevemente los modelos más representativos, Castillo y Espinoza (2005):

- **Streeter Phepls:** Este modelo se desarrolló para simular y obtener el déficit de oxígeno disuelto, directamente relacionado con la DBO permanente en un flujo secuencial a lo largo del río, Chapra y Pelletier (2008).
- **Modelo WASP (Water Quality Analysis Simulation Program):** Es un modelo dinámico, con módulos de sistemas que incluye la columna de agua y bentos, además permite la modelación de los sistemas hasta en tres dimensiones que permiten simular gran cantidad de parámetros de contaminantes, el modelo representa los procesos de diferencia en el tiempo de advección, variación de carga de masa puntual, entre otros García (2008).
- **Modelo QUALK2K (Q2KW):** Es un modelo que permite representar la calidad del agua, principalmente en los ríos, usar versiones gratuitas y constantemente

actualizadas. Una simple concordancia es parte del movimiento por advección - difusión en determinados momentos y tiempos, generando la reacción entre los distintos elementos a analizar. Este modelo permite la simulación de más de 17 variables, entre ellas: oxígeno disuelto, temperatura, fitoplacton, conductividad, nitrógeno, DBO, patógenos, pH, entre otros, García (2008).

Este modelo permite la evaluación de la concentración de los parámetros de calidad del agua con otras variables que también se encuentran en el agua, estas variables son funciones no lineales en sus concentraciones, Chapra (2008).

Las cualidades más destacadas del modelo son:

- La interfaz gráfica del tipo de software y del modelo se ejecuta en Windows usando Visual Basic.
- El software se divide en diferentes longitudes de cobertura, incluidas fuentes puntuales y fuentes no puntuales.
- Software unidimensional y unidireccional, con condiciones permanentes y constantes en el tiempo.
- El modelo permitió realizar simulaciones en la corriente principal y tributarios.

En la figura 1, se representa los segmentos con vertimientos y usos a lo largo de la cuenca en el cuerpo de agua, con propiedades hidráulicas y físicas que se mantienen constantes en cada estación, Castro (2015).

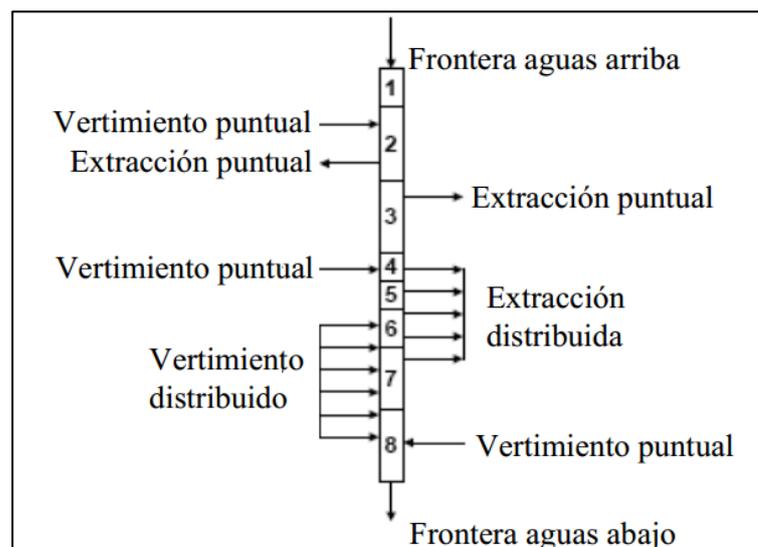


Figura 1: Esquema general del QUAL2KW

FUENTE: Chapra et al. (2008)

El modelo se estructura en un régimen estacionario, en la figura 2, se muestra el esquema del flujo de ingreso y salida constante en el tiempo.

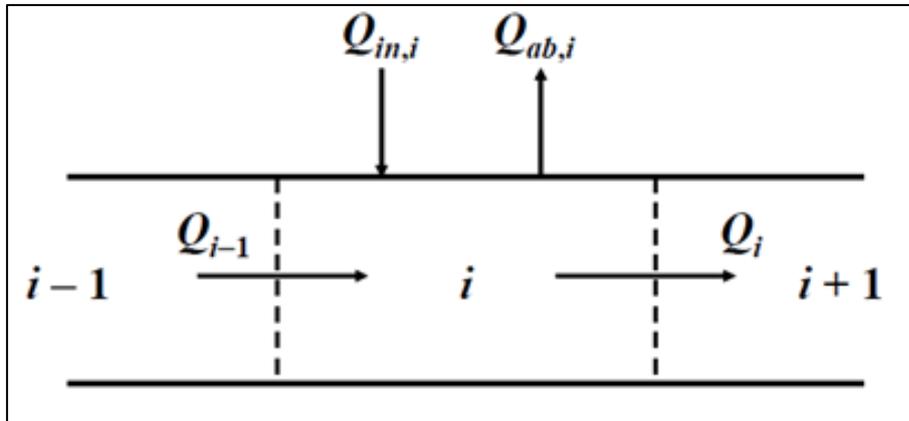


Figura 2: Esquema del balance de flujo

FUENTE: Chapra et al. (2008)

El balance de temperatura se presenta en la figura 3 a través del balance térmico, con de la transferencia de calor entre sólidos sedimentarios del ambiente, así como entre las salidas y entradas externas al sistema.

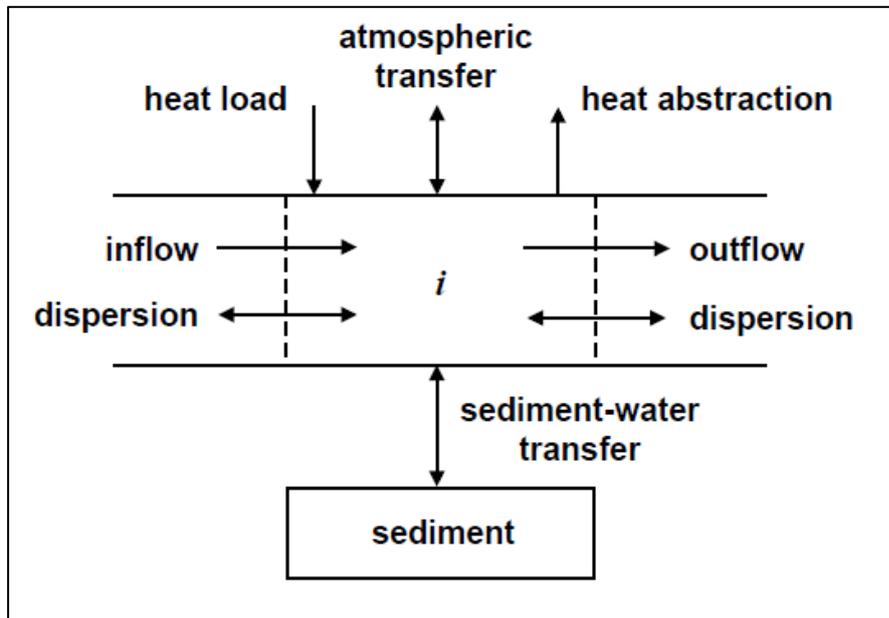


Figura 3: Esquema del balance térmico

FUENTE: Chapra et al. (2008)

El balance general de masa incluye diversos efectos físicos como dispersión, dilución, uso y reacciones químicas y biológicas influidos por factores externos e internos. En la figura 4 se muestra el balance de masa.

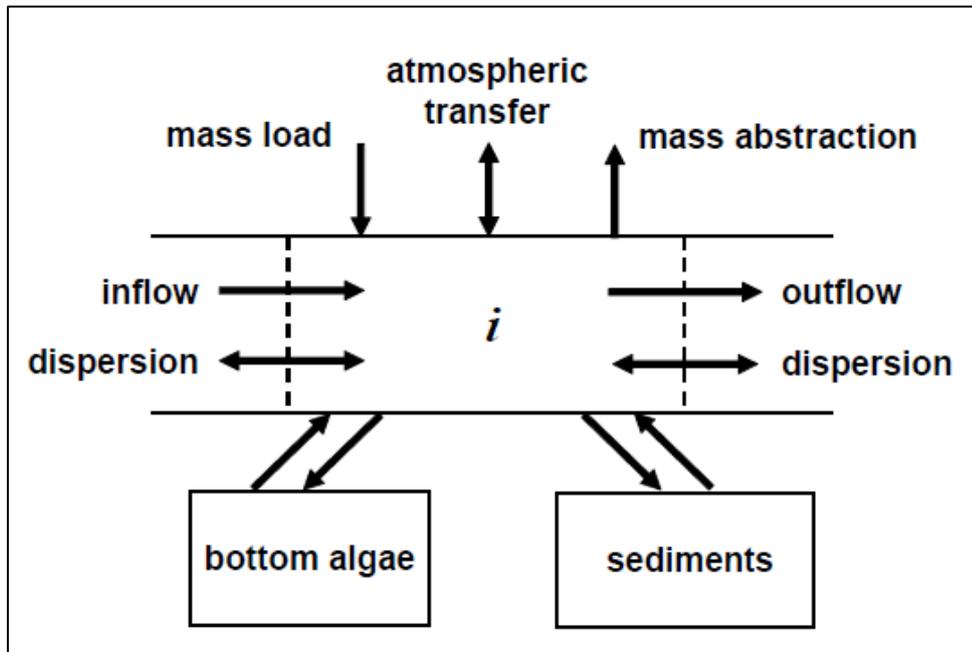


Figura 4: Esquema del balance de masa

FUENTE: Chapra et al. (2008)

A continuación, se describen los principales usos de los modelos matemáticos y físicos desarrollados en la actualidad:

- **Predictiva:**

Análisis de la interacción en la gestión de la cuenca

Brinda opciones de gestión del agua y determina sus efectos, los mismos que pueden tenerse en cuenta a la hora de tomar decisiones Castillo y Espinoza (2005).

La función más importante de los modelos matemáticos de simulación está relacionada con su capacidad predictiva, la misma que permite describir otras series de tiempo sin que se requiera el ajuste de alguno de los parámetros calibrados, lo cual implica la posibilidad de describir otras series de tiempo sin necesidad de ajustar alguno de los parámetros calibrados. Por tanto, tras la calibración y validación del modelo QUAL2Kw, se convierte en una herramienta de medición de respuestas de potencia ante diferentes intervenciones, ya que puede predecir escenarios.

Predicción de cambios en la calidad del agua bajo diversos escenarios de desarrollo y gestión

A medida que aumenta el nivel de desarrollo, el uso de los recursos hídricos y la descarga de aguas residuales nocivas para el medio ambiente, la calidad del agua de los cuerpos de agua naturales puede deteriorarse gradualmente.

Esta degradación es una consecuencia común de las políticas de desarrollo aplicadas y de los métodos utilizados para controlar la calidad de los recursos hídricos, y los modelos matemáticos pueden ayudar a predecir los impactos asociados a las diferentes políticas Castillo y Espinoza (2005).

- **Estrategia de gestión**

Determinación de metas ambientales

Los modelos matemáticos de calidad del agua nos permiten evaluar los resultados de las diferentes políticas de gestión y control, permitiéndonos elegir la estrategia óptima en términos de costos y beneficios involucrados. Cuando surgen problemas naturales de calidad del agua como resultado de los efectos mezclados de múltiples descargas, se pueden utilizar modelos matemáticos de calidad del agua para evaluar la importancia relativa de cada descarga, facilitando así una asignación y gestión simple, lo que permite una distribución más justa de la responsabilidad y costos de asignación, Castillo y Espinoza (2005).

- **Identificación de ambientes complejos**

Los modelos de calidad del agua brindan una mejor definición integral de procesos que producen cambios temporales y espaciales en la calidad natural del agua, así mismo conducen a elegir las variables y procesos necesarios en el sistema. Este conocimiento es una herramienta muy útil a la hora de tomar decisiones rápidas, como, por ejemplo, para gestionar recursos en situaciones de emergencia, Castillo y Espinoza (2005).

- **Otras aplicaciones**

Análisis de riesgos

Los modelos matemáticos de calidad del agua pueden estimar la probabilidad de una liberación accidental, debido a fallas operativas de obras que eventualmente pueden colapsar, controles deficientes de efluentes, vías de transporte sistémico de

contaminantes o vías de transporte de combustible, incidentes de contaminación y así proporcionar una asistencia excepcional en la formulación de políticas preventivas Castro (2015).

Verificación y desarrollo de data

Los modelos son la solución más poderosa que se encuentra disponible para transformar la información sobre la calidad del agua en un sistema para comprender mejor las características del sistema de recursos hídricos y su respuesta a estímulos externos. En el mismo contexto, el modelo brinda pautas para la implementación de programas efectivos de monitoreo y control de la calidad del agua, Castro (2015).

Los elementos que afectan el nivel de complejidad del modelo incluyen el tipo de problema de calidad del agua que se está resolviendo, las características del cuerpo de agua, datos de observación sobre la calidad del agua y las descargas de aguas residuales, la disponibilidad de información histórica y actual, la salud pública asociada, cuestiones ambientales relacionadas con la región, la gama de opciones y estrategias disponibles, así como el tiempo y recursos financieros, Castillo y Espinoza (2005).

El modelo debe tener en cuenta la disminución de la concentración de contaminantes debido al impacto de la entrada de flujo adicional. A la hora de elegir un modelo, se deben tener en cuenta algunas características:

- **La flexibilidad:** Permite la adaptabilidad a diferentes condiciones de los ríos, porque no es tangible técnica y económicamente posible usar diferentes modelos distintos de simulación para cada río.
- **Aplicabilidad:** Programas que hayan sido empleados en otras regiones similares a la de aplicación del modelo.
- **Practicidad:** Precisión de los tiempos de ejecución y definición de resultados.
- **Viabilidad económica:** Evaluar la inversión de distintos programas.
- **Integración:** Incluye información sobre la calidad del agua, Castro (2015).

Las condiciones que afectan el cuerpo de agua son necesarias que se identifiquen tempranamente en el proceso de análisis de la calidad del agua. Las necesidades de agua, incluidas las descargas de residuos y las actividades relacionadas, deben definirse teniendo en cuenta los recursos crudos y subterráneos en términos de cantidad y calidad relacionadas.

Estas definiciones suelen hacerse relativamente bien, es importante entonces identificar variables específicas que sean indicadores ambientales representativos cuantificables, de manera que, al realizar el análisis de variables independientes, los valores del caso base puedan superponerse al valor estimado del proyecto, y a partir de ahí predecir los posibles impactos sobre el agua de calidad. De gran importancia es la selección adecuada del tipo y número de indicadores medioambientales Castillo y Espinoza (2005).

2.5. BASE LEGAL

La Constitución Política Peruana del 1993 indica que todos tenemos derecho a vivir en un equilibrio ecológico, saludable, derecho al desarrollo de la vida, a la protección de la tierra y al medio ambiente, así mismo todos desempeñamos el rol que promueva la protección del medio ambiente", dijo, e instó a aprobar algún tipo de legislación que incluya un marco legal y regulatorio que garantiza la protección medioambiental.

Se promulgó la Ley Orgánica sobre el uso sostenible de los recursos naturales Ley (26821) Congreso de la República (1997), que consideró como fuentes naturales las aguas superficiales y subterráneas.

En el año 2005 se promulgó la Ley General del Ambiente (Ley 28611), la cual formula claramente las leyes y establece obligaciones, derechos y principios básicos de la protección ambiental, entre los que se destacan: 1) los derechos y obligaciones de toda persona de vivir en un ambiente saludable medio ambiente, 2) el derecho de disponibilidad a la información, 3) el derecho a participar en la gestión del medio ambiente, 4) el derecho de acceso a la justicia ambiental, 5) principio de desarrollo sostenible, 6) principio preventivo, 7) principio de precaución, 8) principio de internalizar , 9) principio de responsabilidad ambiental, 10) principio de equidad y justicia, 11) principio de gobernanza y gestión ambiental. Asimismo, contabilizar y determinar todos los organismos de gestión ambiental del país.

En mayo del 2008, el Decreto Legislativo N° 1013 estableció el Ministerio del Ambiente (MINAM) como el organismo nacional de gestión de la política ambiental, que protege y utiliza sustentablemente los recursos naturales, para prevenir y promover la reversión de su degradación, así como monitorear el medio ambiente. Para lograr estas tareas, el Consejo Nacional Ambiental (CONAM) y el Ministerio del Ambiente y DIGESA combinaron actividades ambientales que mantienen preocupaciones por la salud.

En marzo del 2009 se aprobó la Ley de Recursos Hídricos N° 29338, cuyo objetivo es regular el uso y gestión colectiva del agua, las actividades de la administración y de los particulares, su funcionamiento y los bienes relacionados con ella. Lo mismo ocurre con las organizaciones y organismos que gestionan la cuenca. En marzo del 2010 se aprobaron las disposiciones de la misma ley, clasificando las aguas naturales (ríos, lagos y arroyos) en el marco de las actividades establecidas.

En el año 2014, la Ley N° 30157 de Organizaciones de Usuarios de Agua reguló el establecimiento y funcionamiento de las organizaciones de usuarios de agua de acuerdo con lo establecido en la Ley N° 29338, la cual enfatizó que los recursos hídricos son propiedad de toda la comunidad, de acuerdo con lo establecido en la Constitución Política, cuyas disposiciones fueron aprobadas en 2015 mediante D.S. N° 005-2015-MINAGRI.

En febrero del 2016, se aprobó la R.J. N° 042-2016-ANA, la Estrategia Nacional para el mejoramiento de la calidad de los recursos hídricos, como herramienta para impulsar y orientar las actividades de ingeniería y obras no estructurales necesarias para su restauración y protección de la calidad de la fuente de agua.

En el año 2016, según R.J. N° 010-2016-ANA, se aprobó el Protocolo Nacional sobre monitoreo de la calidad de los recursos hídricos superficiales, estableciendo criterios y procedimientos técnicos para evaluar la calidad de los recursos hídricos continentales y costeros, incluyendo desarrollo de red de puntos de seguimiento, frecuencia, medición de parámetros y desarrollo del seguimiento.

En el 2017, el D. S. N° 004-2017-MINAM se aprueban las Normas de Calidad Ambiental (ECA) para el agua y se establecieron normas adicionales para determinar valores, parámetros y categorías según su aplicación, la calidad ambiental, mide la concentración de elementos, sustancias, parámetros químicos, biológicos y físicos en el agua. Se utilizan en los cuerpos de agua dentro del territorio nacional en su estado natural y son de obligado cumplimiento en el desarrollo de normas jurídicas, donde se clasifican en clase I (población y recreación), clase II (actividades marítimas y movimientos costeros), clase III. (riego de hortalizas y ganado), clase IV (protección del medio acuático).

En mayo del 2020, mediante RJ 084-2020-ANA, se aprobó el método “Índice de Calidad Ambiental de los Recursos Hídricos Superficiales”, que resulta eficaz para evaluar el estado de la calidad del agua en cuerpos naturales y sus calificaciones. Es fácil y sencillo de entender en categorías específicas del cuerpo de agua.

De igual forma, existen numerosos organismos involucrados en la gestión de cuencas hidrográficas, como la Junta de la cuenca hidrográfica Chillón-Rímac-Lurín, creada mediante D. S. N° 007-2016-AG en junio del 2016, que brinda espacio de consulta a organismos y organizaciones de la región, relacionados con la gestión integrada de los recursos hídricos, puedan presentar sus necesidades, proyectos y requerimientos con el fin de planificar y coordinar el uso sostenible del agua en la zona de captación.

Las principales tareas del consejo son:

- Elaboración, cumplimiento, implementación y actualización del plan de gestión hídrico.
- Establecer el plan de trabajo anual para el consejo.

Varias agencias del gobierno central también intervienen en el manejo de la cuenca del río Chillón; entre ellos se encuentran la Dirección General de Salud Ambiental (DIGESA) y la Autoridad Nacional del Agua (ANA), los municipios de las provincias de Canta, Lima y Callao, así como 14 municipios distritales. También participan empresas estatales como SEDAPAL y organizaciones como consejos de usuarios, comunidades agrícolas, ONG, etc.

Para los gobiernos civiles y locales, la ley les ha otorgado una serie de facultades para ejercer en sus áreas o municipios, incluyendo la legislación, supervisión y toma de decisiones sancionadoras de algunas de las acciones que se enumeran a continuación:

Dirección General de Salud Ambiental (DIGESA), es el órgano técnico jurídico para los aspectos relacionados con higiene básica, salud ocupacional, higiene de alimentos, zoonótica y protección ambiental, a través del DS N° 023-2005-SA, para la elaboración del establecimiento de una política nacional de salud ambiental, elaboración de normas técnicas para el manejo, reúso y disposición de aguas residuales domésticas, mantenimiento de la calidad de la fuente hídrica a través del control de la calidad del saneamiento del sistema de la fuente hídrica, uso de agua potable. El agua como recurso para la gestión de residuos, registro y control de efluentes, utilizan herramientas como Límites Máximos Permisibles (LMP), Estándares de Calidad Ambiental (ECA), etc. para evaluar los riesgos ambientales.

Autoridad Nacional del Agua (ANA), es el ente rector y responsable técnico del sistema de gestión del agua del país. Es responsable de administrar el sistema dentro del marco de las disposiciones legales ANA (2009).

Actores locales y regionales de la cuenca, en la cuenca del Chillón se pueden encontrar muchas organizaciones sociales agrupadas según diferentes propósitos, en las actividades relacionadas con la problemática ambiental se destacan en diferentes niveles de actividad, afectando la gestión de la cuenca baja.

Las principales organizaciones de la cuenca del río Chillón son el consejo de usuarios de la cuenca del Chillón, 15 comités de riego, 22 comunidades agrícolas, comités de productores, organizaciones regionales, grupos de mujeres, gremios de pescadores y la mesa de diálogo sobre el desarrollo regional Norte y las dos mesas de coordinación para la batalla contra la pobreza de la Provincia de Canta y Cono Norte de Lima.

Desde una perspectiva global, las organizaciones actualmente son frágiles, fragmentadas y desconectadas. El principal desafío ambiental que enfrentan las organizaciones urbanas es la demanda de servicios básicos y públicos. En las zonas de producción rural agrícola, la financiación de la infraestructura de riego, la mejora de los precios de mercado y la revitalización del empleo son importantes para la modernización de la producción.

Las organizaciones de gestión de recursos naturales, como la Junta de Riego de Chillón, las comunidades agrícolas y la asociación de pescadores, están lidiando con problemas de riesgos de los recursos.

III. MATERIALES Y MÉTODOS

La presente investigación es de tipo adaptativa, en base al modelo existente, el cual se desarrolló en las condiciones y parámetros de la ubicación del área de trabajo en la investigación, concluyendo en resultados propios.

- La población para el presente estudio comprende los parámetros de calidad de agua de la cuenca del río Chillón.
- La muestra tomada, corresponde los años 2014, 2017 y 2020, en base a puntos estratégicos a lo largo de la cuenca.

3.1. RECOPIACIÓN Y ANÁLISIS DE INFORMACIÓN

3.1.1. TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS

La recopilación de la data de los parámetros de calidad de agua se obtuvo a través de la información brindada por la Autoridad Nacional del Agua (ANA), propia de monitoreos de forma anual de la Calidad del Recurso Hídrico Superficial en la Unidad Hidrográfica Chillón.

3.1.2. DELIMITACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO Y PUNTOS DE MONITOREO

Se delimitó el área de investigación sobre la cuenca del río Chillón, luego se identificaron los puntos de monitoreo a través de sus coordenadas, para asignarles una codificación propia para la aplicación del modelo.

Se procedió con la evaluación de los parámetros de cada punto monitoreado por la ANA, para verificar lo requerido por el modelo.

3.2. EVALUACIÓN DE MODELOS EXISTENTES Y SELECCIÓN

3.2.1. IDENTIFICACIÓN Y EVALUACIÓN DE MODELOS DE ESTUDIO PARA LA EVALUACIÓN DE CALIDAD DEL AGUA

Se identificaron los modelos de calidad de agua con mayores posibilidades de simular comportamientos y efectos de agentes contaminantes en el agua.

En base a los modelos identificados, se evaluaron los datos de campo de las variables operacionales y los posibles escenarios.

3.2.2. ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS MODELOS DE CALIDAD DE AGUA

Para evaluar la calidad de la Cuenca del Agua del río Chillón se compararon los modelos de calidad del agua QUAL2Kw, desarrollado para la Agencia de Protección Ambiental (EPA) de Estados Unidos, Chapra y Pelletier (2008), el modelo WASP (Water Quality Analysis Simulation Program) y el Modelo de Streeter-Phelps, posteriormente se identificó el modelo más aplicable en la cuenca del río Chillón.

3.3. APLICACIÓN DEL MODELO QUAL2KW EN LA CUENCA DEL RÍO CHILLÓN

El modelo QUAL2KW permitió realizar la simulación de contaminantes de forma puntual, permanente y no uniforme en segmentos con una longitud variable. En la figura 5 se presenta la secuencia de la aplicación del modelo, con la simulación del modelo se realizaron diversos balances como el hidrológico, con el flujo, balance de calor, con la temperatura y materiales, con la concentración de sustancias.

Para la aplicación del modelo, fue importante evaluar el alcance del área de trabajo, la fidelidad de los datos generales y parámetros específicos de la cuenca.

Antes de desarrollar el modelo QUAL2w se identificaron los aspectos funcionales del software, que permitieron ordenar los datos en el sistema para la aplicación del modelo.

Posterior a la revisión sistémica y teórica se realizaron pruebas de ensayo para una adecuada familiarización del software con las páginas de trabajo, así como la evaluación por segmentos, donde se resaltaron los puntos de monitoreo y los de vertimiento.

En la figura 5 se presenta la secuencia de la aplicación del modelo.

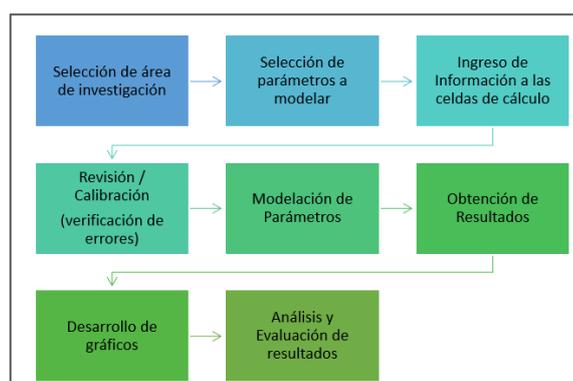


Figura 5: Diagrama del desarrollo del modelo

3.3.1. INFORMACIÓN GENERAL DEL MODELO

La aplicación del modelo de calidad del agua en la cuenca del río Chillón se inició con la verificación de las páginas del software del modelo QUAL2Kw, revisando la información los datos generales del modelo.

El modelo QUAL2Kw pertenece al sistema operativo Windows a través de Visual Basic, el mismo que contiene la interfaz software Excel, el modelo cuenta con páginas de trabajo que almacenan los datos de entrada y desde las cuales se ingresaron al modelo para el procesamiento: parámetros fisicoquímicos y microbiológicos obtenidos en los informes de monitoreo de la ANA, y la descripción general y detallada del río.

Tabla 1: Información general del modelo

Páginas de Trabajo del software	Detalle	Disponibilidad de la información bibliográfica
QUAL2K	Datos generales de la cuenca	Se tiene disponible
Página Headwater	Presenta los datos de la cabecera de la cuenca	Se tiene disponible
Página Reach	Segmentos de la cuenca, ubicación y variables hidráulica	Se tiene disponible
Temperatura del aire, velocidad del viento, radiación	Datos meteorológicos	Se tiene disponible
Hoja de Fuentes Puntuales	Datos del caudal a lo largo de la cuenca y parámetros de calidad de las fuentes puntuales	Se tiene disponible
Hoja de Fuentes Difusas	Datos del caudal a lo largo de la cuenca y parámetros de calidad de las fuentes difusas	Se tiene disponible
Hoja Rates	Información de variables cinéticas y permanencia de otros parámetros modelados por el software	Se tiene disponible
Hydraulic Data, Temperatura Data, WQ Data	Data de los puntos de monitoreo	Se tiene disponible

En la tabla 1 se presentan los datos de entrada del Modelo y la información bibliográfica. Los datos se ingresaron al modelo en cada una de las pestañas del software en el modelo, se usaron colores en las celdas para identificar si la información debe ser ingresada por el usuario o si corresponden a resultados del programa:

- Celdas azules: corresponden a las variables de diseño y los valores de los parámetros que deben ser ingresados por el usuario.
- Celdas amarillas: son los datos medidos en campo que deben ser ingresados por el usuario. Estos datos posteriormente se muestran en las gráficas generadas por el modelo.
- Celdas verdes: corresponden a los resultados del modelo.
- Celdas oscurecidas: se usan para títulos y nomenclatura y no deben cambiarse.

Durante la simulación se generaron datos electrónicos y gráficos de los resultados en función del desarrollo del modelo en el río.

Para la presente investigación se utilizó la información técnica de los monitoreos realizados por la Autoridad Nacional del Agua (ANA), responsable de la gestión y evaluación del monitoreo de la calidad del recurso hídrico superficial de la unidad hidrográfica Chillón, en los 19 puntos de monitoreo a lo largo de su recorrido entre los años 2014, 2017 y 2020.

Los parámetros de campo muestreados y los análisis de los parámetros físicos, químicos, inorgánicos, microbiológicos y parasitológicos de la calidad de agua se ingresan, como parámetros de entrada al modelo de calidad QUALK2w.

3.3.2. INGRESO DE RESULTADOS DE MONITOREO DE LA CALIDAD DEL AGUA

Se definieron los parámetros evaluados, así mismo la información de cantidad y calidad del agua utilizada ingresados al modelo fue recopilada en base a la ANA y las instituciones involucradas.

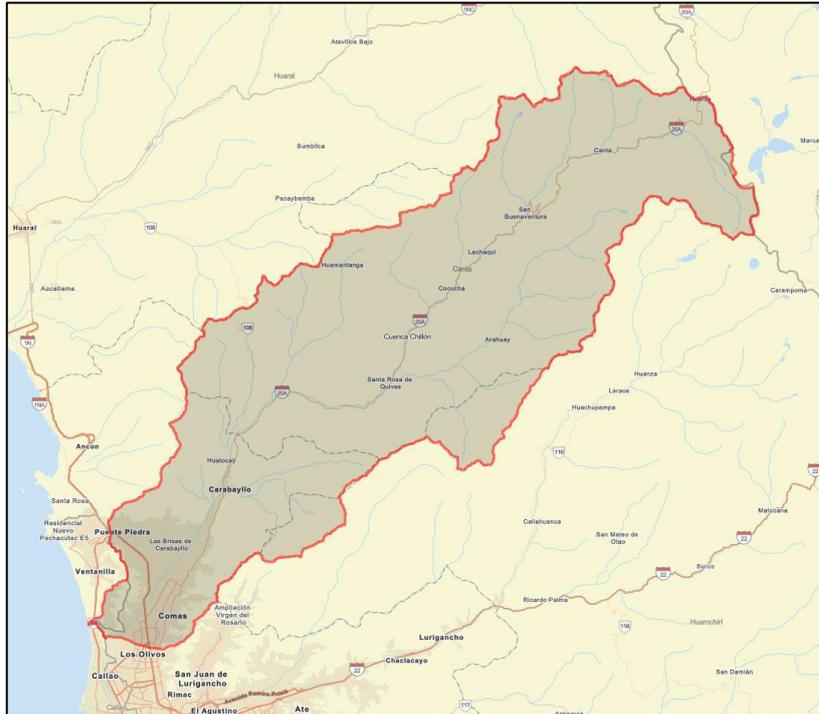


Figura 6: Unidad hidrográfrica Chillón

FUENTE: ANA (2019)

La información de cantidad y calidad del agua que se ingresó en el modelo obtenido de los monitoreos realizados por la Autoridad Nacional del Agua, fueron parámetros fisicoquímicos y microbiológicos monitoreados en cada punto de muestreo detallado líneas arriba. En el anexo N°1 se presentan los resultados de los parámetros en los años 2014, 2017 y 2020 monitoreados.

Los datos se ingresaron al modelo de calidad del agua QUAL2Kw tal y como se describió en la metodología, la información general ingresada en cada hoja de trabajo del programa se resume de la siguiente forma: parámetros fisicoquímicos y microbiológicos obtenidos de los monitoreos, descripción de los tramos del río, constantes hidráulicas, selección de las constantes cinéticas de calibración, condiciones meteorológicas y la información fisicoquímica correspondiente a fuentes puntuales y difusas.

QUAL2K FORTRAN
Stream Water Quality Model
Steve Chapra, Hua Tao and Greg Pelletier
Version 2.12b1



System ID:	
River name	Río Chillón
Saved file name	CritLo_SummerAvg_zeroTribPS_TP-Chla-det_us
Directory where file saved	D:\Carol UNALM\TESIS\MODELOS A SIMULAR\DataFiles
Month	10
Day	23
Year	2019
Local time hours to UTC	5
Daylight savings time	No
Calculation:	
Calculation step	0.1 hours
Final time	30 day
Solution method (integration)	Euler
Solution method (pH)	Brent
Time zone	Central Standard Time
Program determined calc step	0.093750 hours
Time of last calculation	1.49 minutes
Time of sunrise	4:24 AM
Time of solar noon	11:58 AM
Time of sunset	7:32 PM
Photoperiod	15.14 hours

Open Old File

Run Fortran

Figura 7: Imagen de hoja de cálculo de datos generales del río

En la figura 7 se expone la primera hoja de trabajo del modelo QUAL2Kw, sobre la cual se describieron los datos generales de la cuenca del río Chillón, como nombre del río, zona horaria de ubicación de la cuenca, fecha del modelamiento, así como datos propios a la ejecución del modelo.

QUAL2K
Stream Water Quality Model
Headwater Data: Datos de cabecera

Open Old File Run Fortran

Number of Headwaters	1												
Headwater 0 (Mainstem) Cabecera principal													
Headwater label	Reach No	Flow: Flujo	Elevation: Altura	Weir: Presa					Rating Curves: Curva de calificación				
Etiquetas de cabecera	Alcance N°	Rate: Velocidad		Weir: Presa	Height: Altura	Width: Ancho	adam:	bdam	Velocity: Velocidad				
		(m ³ /s)	(m)	Type	(m)	(m)			Coefficient: Coeficiente	Exponent: Exponente	Coefficient: Coeficiente		
Mainstem headwater													
Cabecera del río Principal	1	2.633	222.740		0.0000	0.0000	1.2500	0.9000	0.0200	0.918	0.6897		
Water Quality Constituents													
Componentes de la calidad de agua													
Temperature: Temperatura	C	Units	12:00 a. m.	1:00 a. m.	2:00 a. m.	3:00 a. m.	4:00 a. m.	5:00 a. m.	6:00 a. m.	7:00 a. m.	8:00 a. m.	9:00 a. m.	
Conductivity: Conductividad	umhos		26.89	26.62	26.59	26.49	26.34	26.23	26.09	26.08	26.09	26.33	
Inorganic Solids: Solidos Inorgánicos	mg/DL		33.00	33.00	33.00	33.00	33.00	33.00	33.00	33.00	33.00	33.00	
Dissolved Oxygen: Oxígeno disuelto	mg/L		12.02	11.39	10.94	10.50	9.97	9.42	9.10	9.22	9.27	10.35	
CBODslow: DBOS	mgO2/L												
CBODfast: DBO	mgO2/L		16.56	16.56	16.56	16.56	16.56	16.56	16.56	16.56	16.56	16.56	
Organic Nitrogen: Nitrogeno Orgánico	ugN/L		1800.00	1800.00	1800.00	1800.00	1800.00	1800.00	1800.00	1800.00	1800.00	1800.00	
NH4-Nitrogen: NH4- Nitrogeno	ugN/L		110.00	110.00	110.00	110.00	110.00	110.00	110.00	110.00	110.00	110.00	
NO3-Nitrogen: NO3-Nitrogeno	ugN/L		201.00	201.00	201.00	201.00	201.00	201.00	201.00	201.00	201.00	201.00	
Organic Phosphorus: Fosforo Orgánico	ugP/L		9.97	9.97	9.97	9.97	9.97	9.97	9.97	9.97	9.97	9.97	
Inorganic Phosphorus (SRP): Fosforo Inorgánico	ugP/L		13.92	13.92	13.92	13.92	13.92	13.92	13.92	13.92	13.92	13.92	
Phytoplankton: Fitoplancton	ugA/L		26.11	26.11	26.11	26.11	26.11	26.11	26.11	26.11	26.11	26.11	
Internal Nitrogen (INP): Nitrogeno Interno	ugN/L		429.84	429.84	429.84	429.84	429.84	429.84	429.84	429.84	429.84	429.84	
Internal Phosphorus (IPP): Fosforo Interno	ugP/L		26.11	26.11	26.11	26.11	26.11	26.11	26.11	26.11	26.11	26.11	
Detritus (POM): Detrito	mg/DL		10.03	10.03	10.03	10.03	10.03	10.03	10.03	10.03	10.03	10.03	
Pathogen: Patogeno	cfu/100 mL		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
Alkalinity: Alcalinidad	mgCaCO3/L		230.00	230.00	230.00	230.00	230.00	230.00	230.00	230.00	230.00	230.00	
Constituent I: Constitución I			400.00	400.00	400.00	400.00	400.00	400.00	400.00	400.00	400.00	400.00	
Constituent II: Constitución II													
Constituent III: Constitución III													
pH	isa.		8.63	8.61	8.58	8.56	8.53	8.49	8.48	8.49	8.49	8.55	

Figura 8: Imagen de la hoja de cálculo de los datos de calidad del agua a calibrar

De forma seguida en la figura 8 se completa la hoja de trabajo Headwater, en la cual se ingresaron muchos más datos como la información fisicoquímica de la cabecera de cuenca.

QUAL2K Stream Water Quality Model Río Chillón (10/23/2020) Reach Data:											Open Old File	Run Fortran
Reach for diel plot	10						Location		Element	Elevation		
Element for diel plot	10	Reach	Headwater	Reach	Downstream		Upstream	Downstream	Number	Upstream	Downstream	
Reach	Downstream	Number	Reach	Length	Latitude	Longitude	(km)	(km)	>=1	(m)	(m)	
Label	end of reach label											
RChil1 - RChil2 - Tramo 1		1	Yes	14.50	0.00	0.00	134.500	120.000	10	4019.000	4019.000	
RChil2 - RChil3 - Tramo 2		2		0.10	0.00	0.00	120.000	119.900	10	3460.000	3460.000	
RChil3 - RChil4 - Tramo 3		3		0.10	0.00	0.00	119.900	119.800	10	2662.000	2662.000	
RChil4 - RChil5 - Tramo 4		4		0.10	0.00	0.00	119.800	119.700	10	2682.000	2682.000	
RChil5 - RChil6 - Tramo 5		5		27.20	0.00	0.00	119.700	92.500	10	2692.000	2692.000	
RChil6 - RChil7 - Tramo 6		6		13.50	0.00	0.00	92.500	79.000	10	2267.000	2267.000	
RChil7 - RChil8 - Tramo 7		7		15.00	0.00	0.00	79.000	64.000	10	1600.000	1600.000	
RChil8 - RChil9 - Tramo 8		8		7.00	0.00	0.00	64.000	57.000	10	1144.000	1144.000	
RChil9 - RChil17 - Tramo 9		9		0.50	0.00	0.00	57.000	56.500	10	945.000	945.000	
RChil17 - RChil10 - Tramo 10		10		0.50	0.00	0.00	56.500	56.000	10	487.000	372.000	

Figura 9: Imagen de la hoja de cálculo Reach

En la hoja de cálculo Reach, que se presenta en la figura 9, se ingresaron las constantes hidráulicas de la cuenca del río Chillón, para ello se establecieron segmentos o tramos dentro del río y se colocaron los datos correspondientes, estos datos permitieron establecer las proyecciones del modelamiento.

QUAL2K Stream Water Quality Model Río Chillón (10/23/2020) Air Temperature Data:											Open Old File	Run Fortran		
Upstream	Reach	Downstream	Reach	Distance	Distance	12:00 a. m.	1:00 a. m.	2:00 a. m.	3:00 a. m.	4:00 a. m.	5:00 a. m.	6:00 a. m.	7:00 a. m.	8:00 a. m.
Label	Label	Label	Number	km	km	Hourly air temperature for each reach (degrees C)								
Mainstem headwater	RChil1 - RChil2 - Tramo 1		1	134.50	120.00	26.67	26.11	26.67	25.56	25.56	25.00	27.22	29.44	31.67
	RChil2 - RChil3 - Tramo 2		2	120.00	119.90	26.67	26.11	26.67	25.56	25.56	25.00	27.22	29.44	31.67
	RChil3 - RChil4 - Tramo 3		3	119.90	119.80	26.67	26.11	26.67	25.56	25.56	25.00	27.22	29.44	31.67
	RChil4 - RChil5 - Tramo 4		4	119.80	119.70	26.67	26.11	26.67	25.56	25.56	25.00	27.22	29.44	31.67
	RChil5 - RChil6 - Tramo 5		5	119.70	92.50	26.67	26.11	26.67	25.56	25.56	25.00	27.22	29.44	31.67
	RChil6 - RChil7 - Tramo 6		6	92.50	79.00	26.67	26.11	26.67	25.56	25.56	25.00	27.22	29.44	31.67
	RChil7 - RChil8 - Tramo 7		7	79.00	64.00	26.67	26.11	26.67	25.56	25.56	25.00	27.22	29.44	31.67
	RChil8 - RChil9 - Tramo 8		8	64.00	57.00	26.67	26.11	26.67	25.56	25.56	25.00	27.22	29.44	31.67
	RChil9 - RChil17 - Tramo 9		9	57.00	56.50	26.67	26.11	26.67	25.56	25.56	25.00	27.22	29.44	31.67
	RChil17 - RChil10 - Tramo 10		10	56.50	56.00	26.67	26.11	26.67	25.56	25.56	25.00	27.22	29.44	31.67

Figura 10: Hoja de trabajo temperatura

Posteriormente se ingresaron los datos meteorológicos como la temperatura, donde se pudo evaluar la variación de la temperatura a distintas horas y los diferentes tramos segmentados de la cuenca del río Chillón.

Los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos que se monitorearon en cada punto de muestreo y a partir de los cuales se alimentó el modelo.

En la tabla 2 se presenta la ubicación de los puntos de monitoreo por tramos y su ubicación respectivamente, para el ingreso del modelamiento.

Tabla 2: Puntos de monitoreo del río Chillón y ubicación

Extensión	Número de Tramos del río	Ubicación de Kilómetros en cada tramo		Particiones iguales	Altitud de cada tramo a nivel del mar	
		Río Arriba (km)	Río Abajo (km)	Número ≥ 1	Río Arriba (m)	Río Abajo (m)
Nombre de Tramos del río		(km)	(km)	≥ 1	(m)	(m)
RChil1 - Rchil2 - Tramo 1	1	134.500	120.000	10	4019.000	4019.000
RChil2 - Rchil3 - Tramo 2	2	120.000	119.900	10	3460.000	3460.000
RChil3 - Rchil4 - Tramo 3	3	119.900	119.800	10	2662.000	2662.000
RChil4 - Rchil5 - Tramo 4	4	119.800	119.700	10	2682.000	2682.000
RChil5 - Rchil6 - Tramo 5	5	119.700	92.500	10	2692.000	2692.000
RChil6 - Rchil7 - Tramo 6	6	92.500	79.000	10	2267.000	2267.000
RChil7 - Rchil8 - Tramo 7	7	79.000	64.000	10	1600.000	1600.000
RChil8 - Rchil9 - Tramo 8	8	64.000	57.000	10	1144.000	1144.000
RChil9 - Rchil10 - Tramo 9	9	57.000	56.500	10	945.000	945.000
RChil10 - Rchil11 - Tramo 10	10	56.500	56.000	10	487.000	372.000

Para efectos de la aplicación y desarrollo del modelo QUAL2Kw se ingresaron valores de DBO₅ asumiendo la constante cinética para la DBO (KDBO) igual a 0.23 d⁻¹ de acuerdo con lo reportado en la literatura, puesto que esta variable no fue determinada en los monitoreos realizados en campo Pelletier et al. (2004). A partir de los valores de DBO₅ se calcularon los valores de DBO rápida, conforme a lo que solicitó el modelo, en el caso de la DBO lenta, no se contó con la medición del carbono orgánico disuelto, por lo cual se asumió que dadas las características de la corriente la DBO lenta se pudieron aproximar a cero.

3.3.3. IDENTIFICACIÓN DE FUENTES PUNTUALES Y DIFUSAS

Se identificaron los vertimientos directos e indirectos a lo largo de la cuenca del río Chillón. El desarrollo del modelo permitió simular con fuentes puntuales propias de actividades humanas vertimiento de tuberías y alcantarillas y fuentes difusas.

Tabla 3: Fuentes contaminantes identificadas en la cuenca del río Chillón

TIPO	CANTIDAD
Vertimientos Agua residuales domésticas descargadas a cuerpo receptor	25
Vertimientos Agua residuales municipales descargadas al cuerpo receptor	1
Tuberías conectadas al cauce del río	7
Botaderos de residuos sólidos de la construcción	5
Botaderos de residuos sólidos domésticos	34
Fuente de contaminación Indirecta por infiltración y percolación	16

A lo largo de la cuenca del río Chillón en la zona de estudio se identificaron un total de 72 fuentes contaminantes directas y 16 fuentes indirectas, de las cuales 33 fuentes contaminantes corresponden a aguas residuales, lo que representa un 46%; 39 fuentes contaminantes de residuos sólidos, equivalente al 54%; así como también 16 fuentes indirectas por filtración y percolación, en la tabla 3 se detallan los tipos y la cantidad de vertimientos relevantes.

Name	Tributary No.	Headwater Label	Location km	Point		Temperature			Specific Conductance			Inorgan mean mg/L
				Abstraction m3/s	Inflow m3/s	mean °C	range2 °C	time of max	mean umhos	range2 umhos	time of max	
Aguas laguna Torococha 1	0	Mainstem headwater	134.50		1.1340	7.60				233.00		148.00
Vertimiento Obrajillo 4	0	Mainstem headwater	119.80		0.0200	12.20				774.00		593.00
Poblado Cocucha 7	0	Mainstem headwater	79.00		0.1500	18.70				805.00		611.00
Canal de Regadio 10	0	Mainstem headwater	56.00		0.0250	24.80				816.00		570.00
Descarga PTAR 17	0	Mainstem headwater	56.50		632.0000	24.90				794.00		564.00

Figura 11: Imagen de la hoja de point sources

En la figura 11 se representa la información fisicoquímica de los tributarios a la cuenca del río Chillón, dentro de los cuales podemos identificar vertimientos, esta información permite realizar las simulaciones.

3.3.4. DEFINICIÓN DE PARÁMETROS A EVALUAR

Los parámetros se ingresaron al modelo de calidad de agua para ser evaluados, a través de la identificación y ubicación de los puntos de monitoreo de los informes técnicos de monitoreo realizado por la Autoridad Nacional del Agua (ANA), en base al plan de trabajo para monitoreo de la calidad de agua superficial en la cuenca del río Chillón, los parámetros

que se ingresaron al modelo de calidad de agua de la presente investigación son: temperatura, caudal, demanda bioquímica de oxígeno (DBO5), oxígeno disuelto y sólidos disueltos totales, los cuales fueron analizados en el laboratorio cuyos métodos cuentan con la acreditación de la NTP - ISO/IEC1 17025:2017, otorgado por el Instituto Nacional de Calidad (INACAL).

3.3.5. DEFINICIÓN DE CONSTANTES HIDRÁULICAS

Las constantes hidráulicas se ingresaron al modelo de calidad QUAL2Kw por el método de Manning, esto teniendo en cuenta que, en el estudio realizado por la Autoridad Nacional del Agua, y los monitoreos periódicos, se pudo encontrar la información que se ingresó para el modelamiento a fin de establecer los valores por tramos como lo requiere el modelo. Los valores de las constantes hidráulicas que se determinaron en el río Chillón se presentan a continuación en la tabla 4.

Tabla 4: Definición de constantes hidráulicas

Nombre de Tramos del río	Pendiente	Coefficiente de Manning	Ancho (m)
RChil1 - Rchil2 - Tramo 1	0.051	0.08	5.14
RChil2 - Rchil3 - Tramo 2	0.025	0.08	15.01
RChil3 - Rchil4 - Tramo 3	0.112	0.08	4.08
RChil4 - Rchil5 - Tramo 4	0.014	0.08	20.45
RChil5 - Rchil6 - Tramo 5	0.040	0.08	15.47
RChil6 - Rchil7 - Tramo 6	0.050	0.08	25.02
RChil7 - Rchil8 - Tramo 7	0.115	0.08	4.00
RChil8 - Rchil9 - Tramo 8	0.006	0.08	30.20
RChil9 - Rchil17 - Tramo 9	0.014	0.08	32.25
RChil17 - Rchil10 - Tramo 10	0.017	0.08	33.02

3.3.6. DEFINICIÓN DE CONSTANTES CINÉTICAS

Teniendo en cuenta los parámetros que permitieron aplicar el modelo QUAL2Kw y las constantes cinéticas que se necesitaron, así como la calibración de las constantes cinéticas en la tabla 5.

Tabla 5: Definición de constantes cinéticas

Constante cinética	Unidades
Velocidad de sedimentación de sólidos suspendidos inorgánico	m/d
Tasa de hidrólisis de la materia orgánica de lenta descomposición	1/d
Tasa de oxidación de la materia orgánica de lenta descomposición	1/d
Tasa de oxidación de la materia orgánica de rápida degradación	1/d
Hidrólisis de nitrógeno orgánico	1/d
Velocidad de sedimentación de nitrógeno orgánico	m/d
Tasa de nitrificación de amonio	1/d
Tasa de desnitrificación de nitratos (importante cuando existen condiciones anaeróbicas)	1/d
Coefficiente de transferencia por desnitrificación de sedimentos	m/d
Hidrólisis del Fósforo Orgánico	m/d
Velocidad de sedimentación del Fósforo Orgánico	1/d
Velocidad de sedimentación del Fósforo Inorgánico	m/d
Hidrólisis de la materia orgánica particulada (Detritus (POM))	m/d

3.3.7. CALIBRACIÓN

La calibración se llevó a cabo a través del ingreso de un conjunto de datos en el modelo y posterior análisis de los resultados simulados. Luego se conciliaron los valores observados con los estimados por el modelo, esto se realizó ajustando los parámetros del modelo, de modo tal que los valores simulados coincidieron con los observados dentro de un margen de error aceptable hasta que hubo una coincidencia de por lo menos 80% entre los valores observados y los simulados; demostrando que el modelo es confiable siendo utilizado en la etapa de predicción.

Teniendo en cuenta que el QUAL2Kw realiza la calibración automática de las constantes cinéticas mediante algoritmos genéticos para obtener un margen de error mínimo entre los datos medidos en campo y los datos simulados por el modelo, se seleccionó la función objetivo recomendada por Chapra y Pelletier (2018).

La ponderación asignada a cada variable fue determinada por la importancia del parámetro en la modelación y a la confiabilidad del dato, la función objetivo se programó en la hoja de trabajo “Fitness” del programa y se enlazó al algoritmo genético y las constantes cinéticas a calibrar en la hoja de trabajo “Rates”. En el algoritmo genético los valores de velocidad de mutación inicial, velocidad de mutación mínima y máxima, y el número de dígitos para codificar el genotipo correspondieron a los valores que trae el ejemplo del programa. El número de poblaciones y de generaciones se fue incrementando y para cada combinación se calibró el modelo, al final se seleccionó una población de 10 y un número de generaciones

de 50 para la calibración definitiva, puesto que representaba el mejor ajuste en un menor tiempo de cálculo.

Se ingresó la información del monitoreo del año 2014 seleccionada para la calibración, a través de la pestaña de reaireación, se programó la función objetivo, posterior a ello se seleccionaron las constantes cinéticas a calibrar y se definieron los parámetros del algoritmo genético, se ejecutó la opción “Run Auto-cal” del modelo.

Al finalizar la calibración se obtuvieron las gráficas con los resultados para los parámetros modelados. Para evaluar los resultados de la calibración se determinaron los porcentajes de error entre los datos simulados por el modelo y los datos de campo en las estaciones de monitoreo.

3.3.8. VALIDACIÓN

Finalizado el proceso de calibración, se alimentó el modelo con los datos del monitoreo del año 2017 seleccionado para la validación, se mantuvieron fijas las constantes cinéticas calibradas y se ejecutó la opción de la pestaña “RUN Fortran” del modelo para correr el programa con los nuevos datos ingresados. Al finalizar la corrida del modelo, se obtuvieron las gráficas con los resultados para los parámetros modelados. Para evaluar los resultados de la confirmación se determinaron los porcentajes de error entre los datos simulados por el modelo y los datos de campo en las estaciones de monitoreo.

El modelo calibrado y validado se utilizó para analizar los impactos de la calidad de agua del área de estudio, bajo dos escenarios, con implementación de mejoras y sin mejoras, de tal modo que la diferencia de los resultados de ambos escenarios representa el impacto de la acción.

3.4. ESCENARIOS DE APLICACIÓN CON MEDIDAS DE MITIGACIÓN Y SIN MEDIDAS

A través del modelo seleccionado se evaluó la calidad de agua en la extensión de la cuenca del río Chillón.

El modelo QUALK2w permitió evaluar la calidad de agua en las estaciones de monitoreo determinadas de la cuenca del río Chillón, para los años 2014, 2017 y 2020, a fin de analizar el comportamiento de los contaminantes en distintos escenarios en un mismo cuerpo de agua.

A través del ingreso de información en el modelo, permitió representar los parámetros presentes en la calidad de agua en el río Chillón, así como la simulación de escenarios futuros.

Se modeló el software sobre el escenario de la cuenca del río Chillón con los datos de campo y simulando el impacto que tendría sobre el cuerpo de agua la construcción y operación de una PTAR en la localidad de Obrajillo que trate los efluentes domésticos antes de ser dispuestos en el río Chillón.

Estos efluentes se descargan actualmente sobre el río disminuyendo su calidad, una evidencia de ello es la presencia de alteraciones físicas en el cuerpo de agua, así como los resultados de los monitoreos de campo realizados por la Autoridad Nacional del Agua.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. RECOPILOCIÓN Y ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN

Los datos recopilados, permitieron identificar la cuenca del río Chillón que se encuentra entre los paralelos 11°15' y 12°00' latitud sur y 76° y 77° de longitud oeste. Emplazada en la jurisdicción del departamento de Lima y en la provincia constitucional del Callao (dos distritos), enmarcado en las provincias de Lima (ocho distritos) y Canta (siete distritos) frente a la costa del Perú. El río principal es el Chillón, que se origina en las inmediaciones del flanco occidental de la cordillera La Viuda recibiendo sus deshielos y desembocando al Océano Pacífico por el Callao, ANA (2019).

El río Chillón ubicado en la vertiente del Pacífico limita por el norte con el departamento de Ancash, por Sur con el departamento de Ica, por el este con el departamento de Junín y por el oeste con el Océano Pacífico, cuenta con una longitud de 131,14 Km y tiene una superficie de 2 320 km², en la figura 7 se presenta la unidad hidrográfica del Chillón, la cual corresponde al ámbito administrativo de la Autoridad Administrativa del Agua Cañete Fortaleza, Administración Local de Agua (ALA): Chillón Rímac Lurín. Los límites hidrográficos son:

- Norte: Cuenca Chancay Huaral
- Sur: Cuenca Rímac
- Este: Cuenca Mantaro
- Oeste: Litoral marino costero

Sus principales tributarios son por la margen izquierda: río Quisquichaca, quebrada río Seco y por la margen derecha: quebrada Socos, quebrada Gangay. Las principales actividades que se desarrollan son la agricultura y la ganadería, ANA (2020).

En la estación de verano el caudal es mayor, respecto a la estación de invierno, los ríos están secos debido principalmente al uso de agua en su recorrido. La disponibilidad del agua superficial es escasa, con una distribución temporal e irregular, esta situación ocurre frente a una continua y creciente necesidad del agua, para el uso de la población, usos de

actividades agrícolas, energéticas e industriales, entre otros. El río Chillón constituye una importante fuente de recurso hídrico que abastece a la provincia constitucional del Callao; sin embargo, también es fuente de contaminación marina del litoral del Callao, por la carga orgánica, inorgánica y microbiana que arrastran sus aguas, CENEPRED (2018).

Las principales fuentes de contaminación que influyen en la calidad de agua superficial, ubicados en el ámbito de la cuenca del río Chillón son los vertimientos de aguas residuales domésticas provenientes de la red de alcantarillado de centros poblados o localidades bajo la administración de municipalidades. En la provincia de Canta se han identificado localidades como Licahuasi, Lachaqui, Pariamarca, Canta, Obrajillo, entre otros existen botaderos de residuos sólidos domésticos, especialmente en la parte baja de la cuenca, cercano a localidades y asentamientos humanos. También se han identificado residuos de construcción y demolición a lo largo del cauce y en la ribera, ANA (2019).

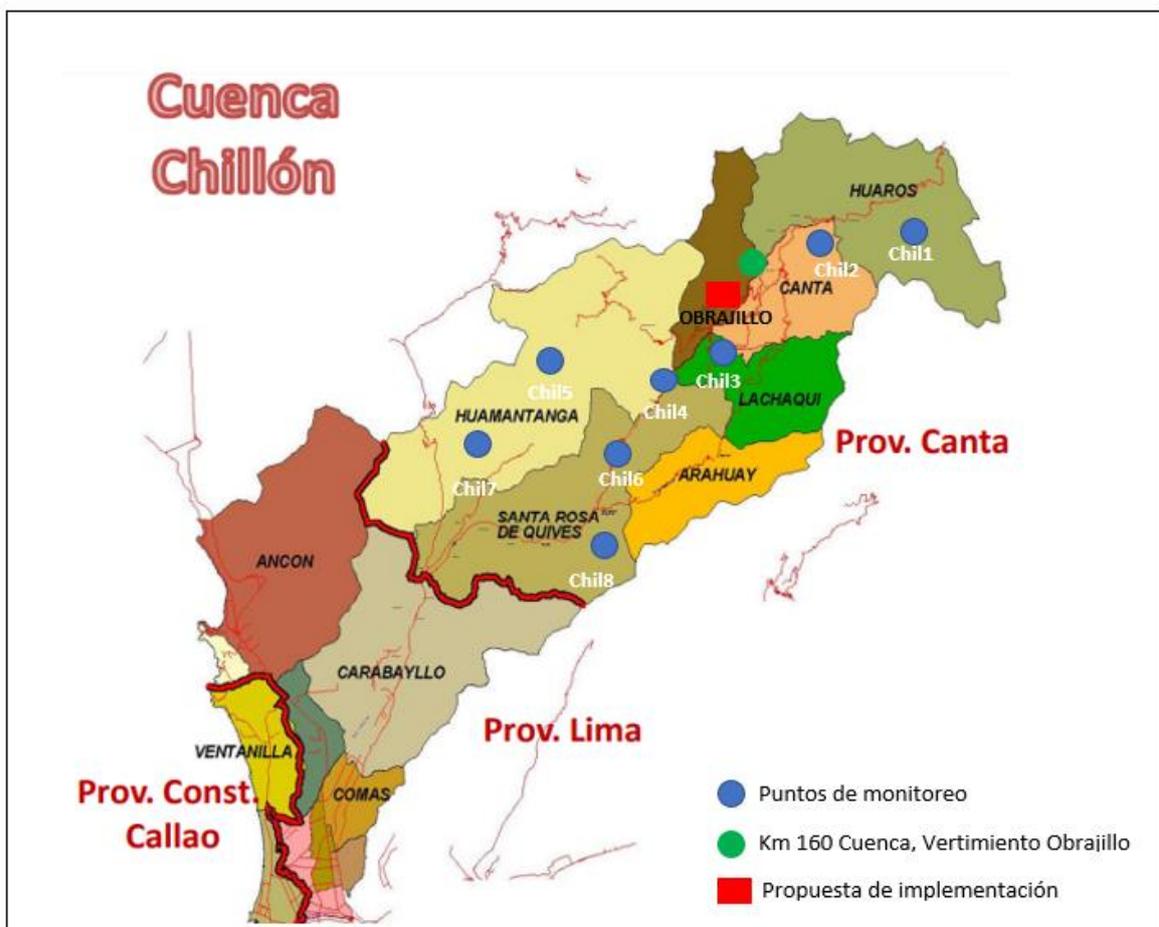


Figura 12: Ubicación de los puntos de monitoreo

FUENTE: ANA (2019)

En la tabla 6 se presentan los puntos de monitoreo, a cada punto se asigna un código, en la figura 12 se muestra la ubicación de los puntos de monitoreo.

Tabla 6: Puntos de monitoreo de calidad del agua en la cuenca del río Chillón

Número	1	2	3	4	5	6	7	8
Código	Chil1	Chil2	Chil3	Chil4	Chil5	Chil6	Chil7	Chil8
Distancia cabecera de cuenca	180	160	140	120	100	80	60	40

Fuente: ANA (2020)

En las tablas 10,11 y 12 de los anexos 2, 3 y 4 se presenta la descripción y ubicación de los puntos de monitoreo realizados en los años 2014, 2017 y 2020, respectivamente.

4.2. EVALUACIÓN DE LOS MODELOS EXISTENTES Y SELECCIÓN DEL MODELO A APLICAR A LA CUENCA

En la tabla 7 se muestra la evaluación y análisis comparativo de los modelos QUAL2K, WASP y Streeter-Phelps:

Tabla 7: Evaluación y comparación de modelos de calidad del agua

Modelo QUAL2K	Modelo WASP	Modelo de Streeter-Phelps
<ul style="list-style-type: none"> - Modela una sola dimensión, considerando una mezcla uniforme vertical y lateral - Simula flujo permanente no uniforme - Simula variaciones térmicas - Interfase amigable - Simula tramos de diferentes longitudes - Identifica interacción agua – sedimentos - Modela parámetros como pH, alcalinidad y patógenos - Es un programa libre, por lo que no requiere inversión económica para su uso. - Se puede aprovechar la información histórica como data de entrada. - Aplicable para río, lagos y embalses - Evalúa los siguientes parámetros: Oxígeno disuelto, DBO, Temperatura, Nitrógeno amoniacal, Coliformes, 	<ul style="list-style-type: none"> - La flexibilidad que tiene de adaptarse a diferentes corrientes del cuerpo de agua. - El modelo es aplicable a cuerpos de agua superficial, lo cual ha sido revisado en diversas investigaciones. - Es de uso simple y muestra precisión en los resultados - Es un programa libre, por lo que no requiere inversión económica para su uso. - Se puede aprovechar la información histórica como data de entrada. - Aplicable para río, lagos, embalses, estuarios y áreas costeras. - Evalúa los siguientes parámetros: Oxígeno disuelto, DBO, Temperatura, Nitrógeno amoniacal, Coliformes, Concentración de algas, Nitratos/Fosfatos, 	<ul style="list-style-type: none"> - Relaciona la rapidez del cambio del déficit de oxígeno con la distancia y con las velocidades de desoxigenación y reoxigenación. - Genera un efecto combinado del decaimiento y la aireación genera un punto de pando, llamado punto crítico en el cual la concentración de oxígeno es mínima. - Adaptado para modelar el efecto de descargas difusas a lo largo de un tramo del cauce.

<<Continuación>>

Modelo QUAL2K	Modelo WASP	Modelo de Streeter-Phelps
Concentración de algas y Nitratos/Fosfatos	Compuestos orgánicos tóxicos y metales pesados.	

Sobre la base de la información dada en la tabla 7, se eligieron cuatro parámetros para seleccionar el modelo cuyas características se ajustan al caso de estudio.

Tabla 8: Parámetros para determinar la aplicabilidad del modelo a la cuenca de estudio

PARÁMETROS	MODELO QUALK2W	MODELO WASP	MODELO DE STREETER-PHELPS
El modelo contempla la corriente del río con mezcla vertical y lateral a través de un flujo permanente no uniforme con variaciones a lo largo de su recorrido.	Sí Cumple	No Cumple	No Cumple
El modelo permite modelar en tramos uniformes de diferentes longitudes, a lo largo de toda la cuenca	Sí Cumple	No Cumple	No Cumple
El modelo permite identificar la interacción del agua y sedimentos	Sí Cumple	No Cumple	No Cumple
El modelo constituye una nueva herramienta en el país.	Sí Cumple	No Cumple	No Cumple

Observando la información presentada en las tablas 7 y 8 para los tres modelos, se observa que el modelo QUAL2K es el que mejor se adapta para ser utilizado en la cuenca.

4.3. APLICACIÓN DEL MODELO QUAL2KW EN LA CUENCA DEL RÍO CHILLÓN

4.3.1. CALIBRACIÓN

La calibración identifica el margen de error mínimo de la diferencia de los datos modelados y los valores obtenidos en el informe de monitoreo de la Autoridad Nacional del Agua. A través de la calibración del modelo de calidad de agua, el algoritmo genético (AG) y la función objetivo recomendada por Chapra y Pelletier (2018), permitió determinar las constantes cinéticas que se adaptan mejor en la cuenca del río Chillón.

4.3.2. VALIDACIÓN DEL MODELO

La validación se realizó a partir de la información del monitoreo del 2017 en la que se mantuvieron fijas las constantes cinéticas calibradas. En la tabla 9 se presenta las constantes cinéticas calibradas para la corriente, se pueden presentar los valores encontrados por el modelo se encuentran en los rangos establecidos en la literatura.

Tabla 9: Constantes calibradas en la cuenca del río Chillón

Constante cinética	Unidad	Valor	Rango
Velocidad de sedimentación de sólidos suspendidos inorgánico	m/d	0.002	0 – 2
Tasa de hidrólisis de la materia orgánica de lenta descomposición	1/d	0.298	0 – 3
Tasa de oxidación de la materia orgánica de lenta descomposición	1/d	0.018	0 – 0.6
Tasa de oxidación de la materia orgánica de rápida degradación	1/d	0.353	0 – 5
Hidrólisis de nitrógeno orgánico	1/d	3.498	0 - 2
Velocidad de sedimentación de nitrógeno orgánico	m/d	0.994	0 - 5
Tasa de nitrificación de amonio	1/d	6.485	0 - 11
Tasa de desnitrificación de nitratos (importante cuando existen condiciones anaeróbicas)	1/d	0.256	0 - 2
Coefficiente de transferencia por desnitrificación de sedimentos	m/d	0.609	0 - 1
Hidrólisis del Fósforo Orgánico	m/d	0.615	0 – 5
Velocidad de sedimentación del Fósforo Orgánico	1/d	1.068	0 - 2
Velocidad de sedimentación del Fósforo Inorgánico	m/d	0.038	0 – 5
Hidrólisis de la materia orgánica particulada (Detritus (POM))	m/d	1.007	0 - 2
Velocidad de sedimentación de la materia orgánica particulada (Detritus (POM))	1/d	4.058	0 - 5

4.3.3. APLICACIÓN DEL MODELO

Los resultados de la aplicación por primera vez del modelo sobre la cuenca del río Chillón constituyen la línea base para futuras investigaciones.

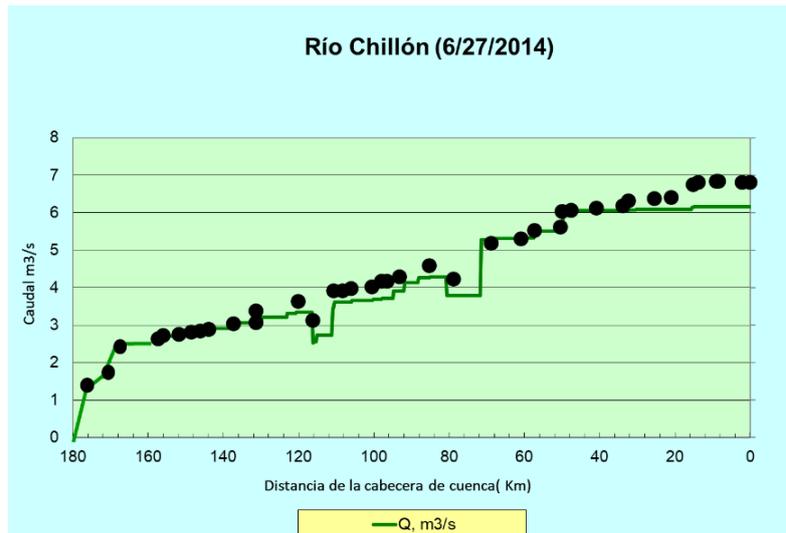


Figura 13: Calibración del caudal

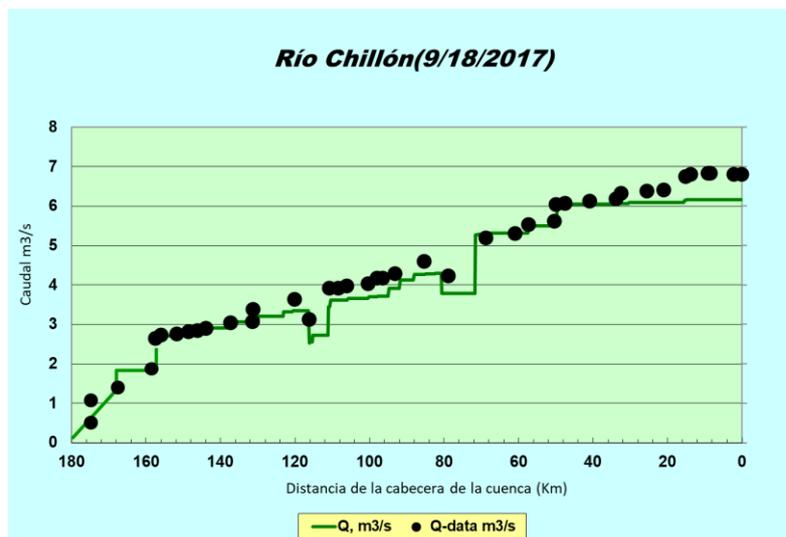


Figura 14: Validación del caudal

En las figuras 13 y 14 se presentan los resultados del modelamiento para el caudal, siendo la línea verde continua la proyección y determinación del caudal, a través del balance de flujo del propio software, en base a la información ingresada del caudal de los tributarios y fuentes difusas; incrementándose a lo largo de su recorrido, iniciando con $0.03 \text{ m}^3/\text{s}$ y alcanzando a desembocar con un caudal aproximado de $6.02 \text{ m}^3/\text{s}$, los puntos de color negro representan los datos monitoreados en campo.

La temperatura influye en los procesos del río en la cuenca, debido a que aumenta la solubilidad de los sólidos y disminuye la de los gases, además la presencia de este indicador eleva el potencial tóxico de ciertas sustancias disueltas en el agua, originando además la reducción del oxígeno disuelto como lo denomina Reyes en su investigación del 2012.

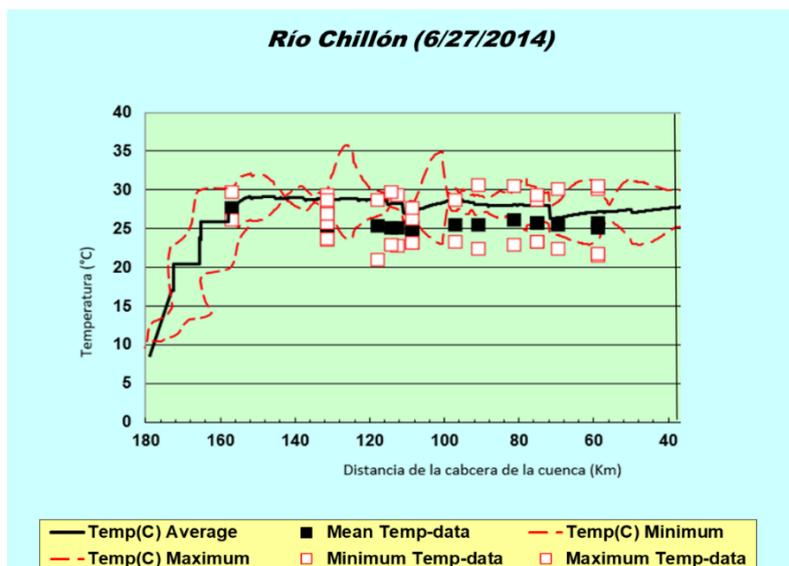


Figura 15: Calibración de la temperatura

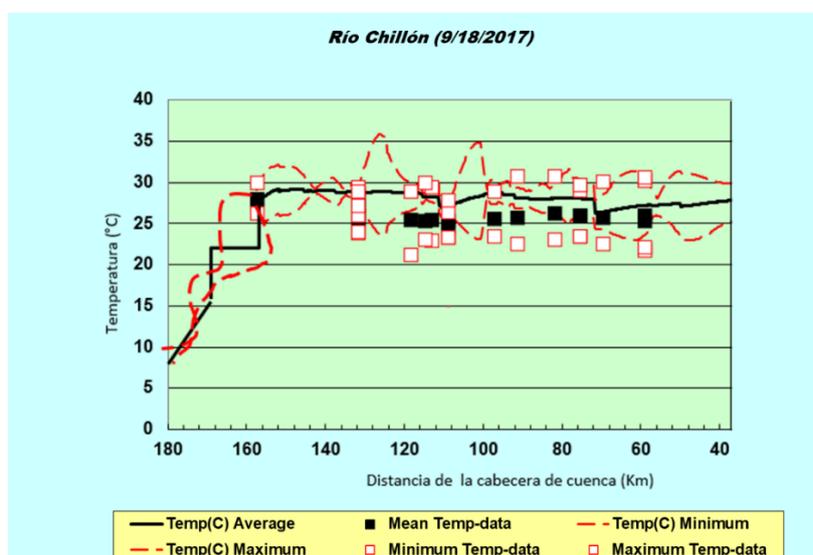


Figura 16: Validación de la temperatura

En las figuras 15 y 16 el modelamiento proyecta la temperatura de los años 2014 y 2017 en la parte alta de la cuenca de 6.8 °C, mientras que el río avanza su recorrido la temperatura se va incrementando progresivamente por la transferencia de calor de los vertimientos.

Gran parte de los organismos dependen del oxígeno para mantener sus procesos metabólicos, para producir energía, crecer y reproducirse, sin embargo, ciertos factores como producen la reducción de este parámetro afectando el proceso de la cuenca. En las figuras 17 y 18 se presentan los resultados de la calibración y validación del oxígeno disuelto, siendo la línea continua los resultados del modelamiento, los puntos cuadrados los datos provenientes de los monitoreos en campo y la línea discontinua de color azul, los valores máximos que se alcanzan a lo largo de la corriente en la cuenca.

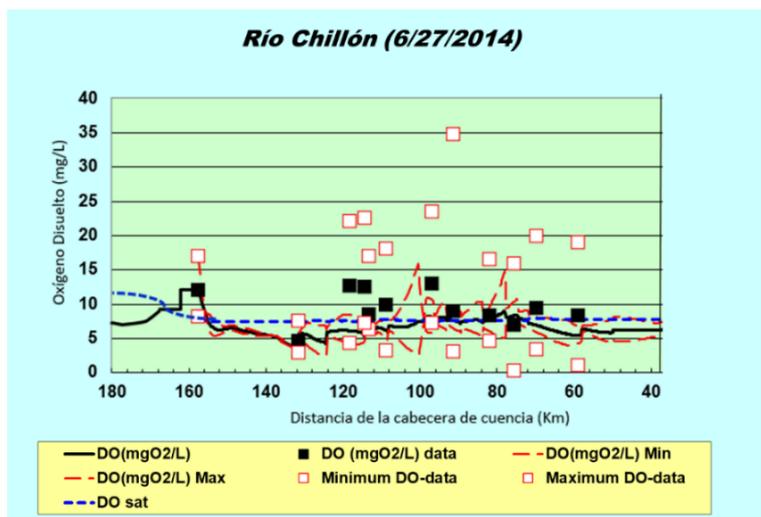


Figura 17: Calibración de oxígeno disuelto

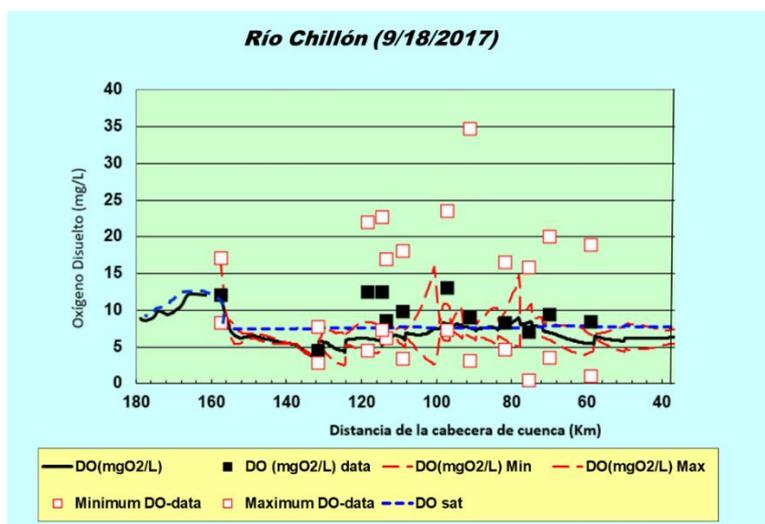


Figura 18: Validación de oxígeno disuelto

Los resultados del modelamiento en la cuenca del río Chillón muestran altas concentraciones oxígeno disuelto en la parte alta de la cuenca, debido a la aireación por turbulencia del flujo y valores constantes a lo largo de la cuenca. Por diversas fuentes de vertimientos, la vegetación aledaña se reduce en algunas estaciones por la oxidación de DBO y procesos de nitrificación.

El modelamiento demuestra que en la parte alta y media de la cuenca los resultados obtenidos con el modelo coinciden con los datos del monitoreo en campo; sin embargo, en la parte baja de la cuenca hay una diferencia marcada, probablemente ocasionada por las descargas directas de efluentes domésticos no monitoreados.

El siguiente parámetro modelado es la demanda bioquímica de oxígeno que representa la cantidad de oxígeno requerida por las bacterias en el proceso de estabilización de la materia orgánica en descomposición bajo condiciones aeróbica.

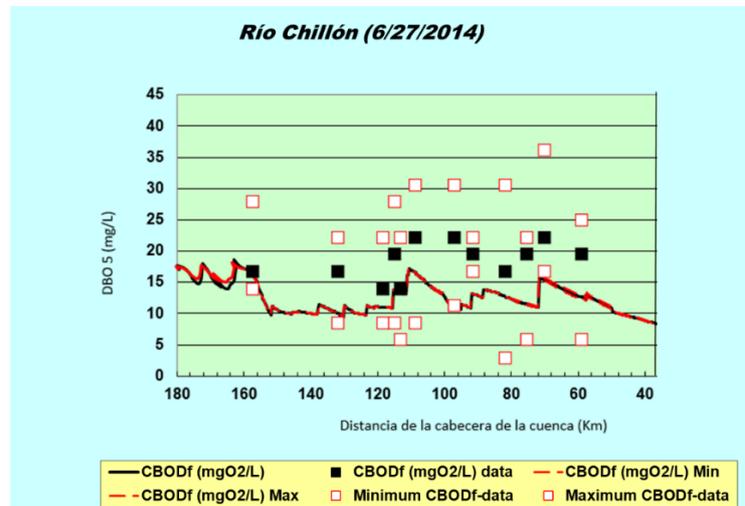


Figura 19: Calibración de DBO5

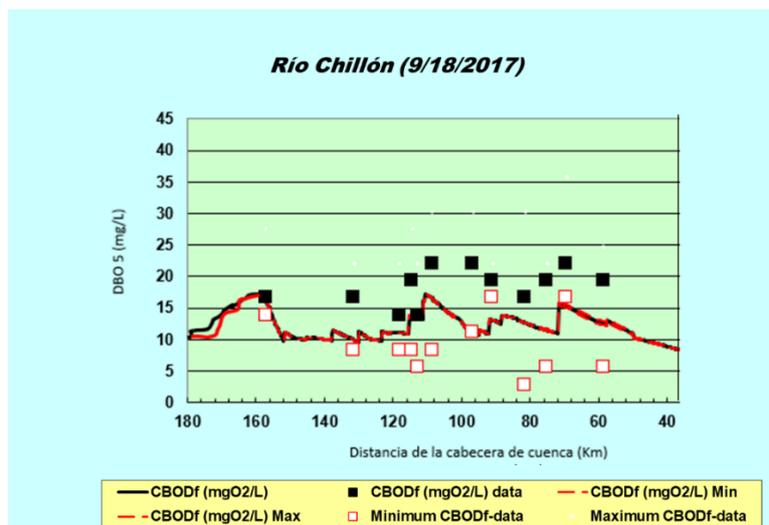


Figura 20: Validación de DBO5

En las figuras 19 y 20 los resultados del modelamiento de DBO₅ muestran en la cabecera de cuenca un valor 10 mg/L, posteriormente se incrementa en las localidades de Canta (Km 160), Obrajillo (Km 140), Arahuy (Km 120) y Santa Rosa de Quives (Km80), de acuerdo con lo señalado en informes de la ANA, en esas mismas localidades se vierten directamente aguas residuales domésticas, que por consecuencia incrementan la concentración de DBO₅.

Para efectos de un buen desarrollo y validación de datos del modelamiento, no se ha considerado el análisis de la parte baja de la cuenca, debido a que los datos no estaban completos.

Los sólidos totales disueltos tienen la capacidad de alterar la calidad del cuerpo de agua en la cuenca del río Chillón. En las figuras 21 y 22 se presentan los resultados de la calibración y validación en el modelamiento.

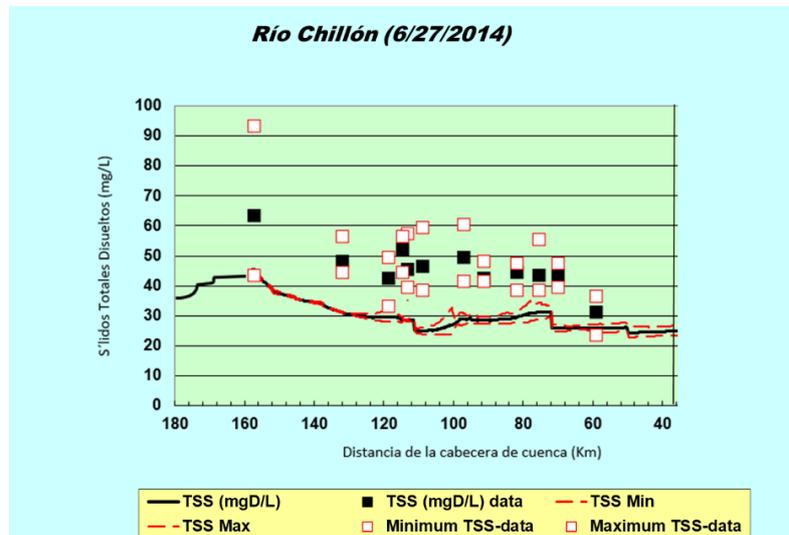


Figura 21: Calibración de sólidos totales disueltos

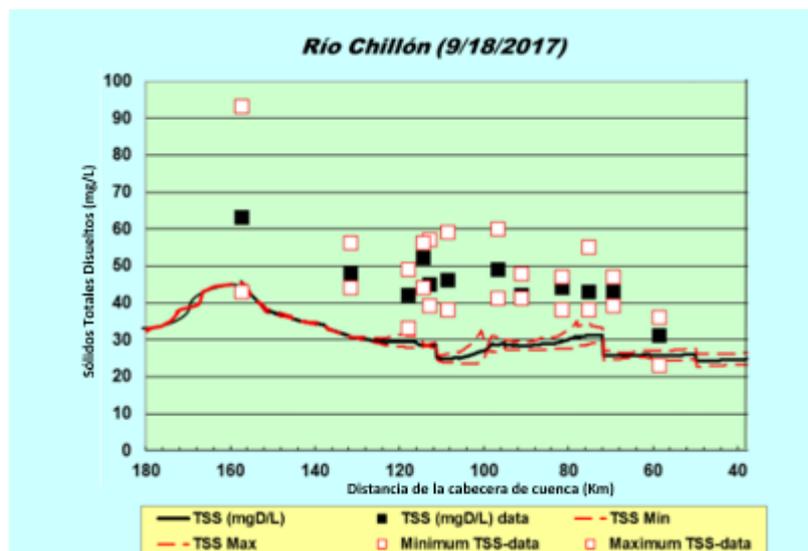


Figura 22: Validación de sólidos totales disueltos

El modelamiento permite registrar datos en todas las estaciones como se presenta en la línea negra continua de las figuras mencionadas, respecto a los cuadrados de color negro, son los datos obtenidos de los monitoreos. Esto permite ajustar las constantes cinéticas de tal forma que se puedan minimizar los errores.

La concentración de sólidos totales disueltos en la cabecera de cuenca durante los monitoreos fue menor a 60 mg/L, posteriormente se incrementó cerca de la localidad de Obrajillo (Km 140), se reduce en la localidad de Arahuay (Km 120), posteriormente se incrementó en la

zona de Santa Rosa de Quives (Km 80) y en adelante en Huamantanga (Km 60) descendió ligeramente hasta mantener una constante, notablemente se evidencian estas variaciones de ascenso y descenso de concentración, debido a la presencia de botaderos en las localidades que presentan de concentraciones altas.

4.4. ESCENARIO DE APLICACIÓN

Se utilizaron dos escenarios de aplicación: 1) con la instalación de una planta de tratamiento en la localidad de Obrajillo (escenario con medida); y, 2) la situación actual (sin medidas de mitigación), cuyos resultados del modelamiento de los parámetros de calidad de agua: DBO₅ y Sólidos suspendidos totales, fueron comparados simultáneamente.

El modelamiento permitió simular y obtener los resultados de los parámetros en la corriente del río, pudiendo evaluar su comportamiento, concordando con lo mencionado por Castillo y Espinoza, en su investigación del año 2005, que afirmaron que el modelamiento tiene la capacidad de simular condiciones ambientales, estímulos externos e impactos determinados.

En la figura 23 se presentan los resultados del modelo para el escenario 2) (sin medidas de mitigación) simulado los parámetros de DBO, con valores superiores a 15 mg/L en la localidad de Obrajillo (Km160) cuando es receptora directa de vertimientos de efluentes domésticos.

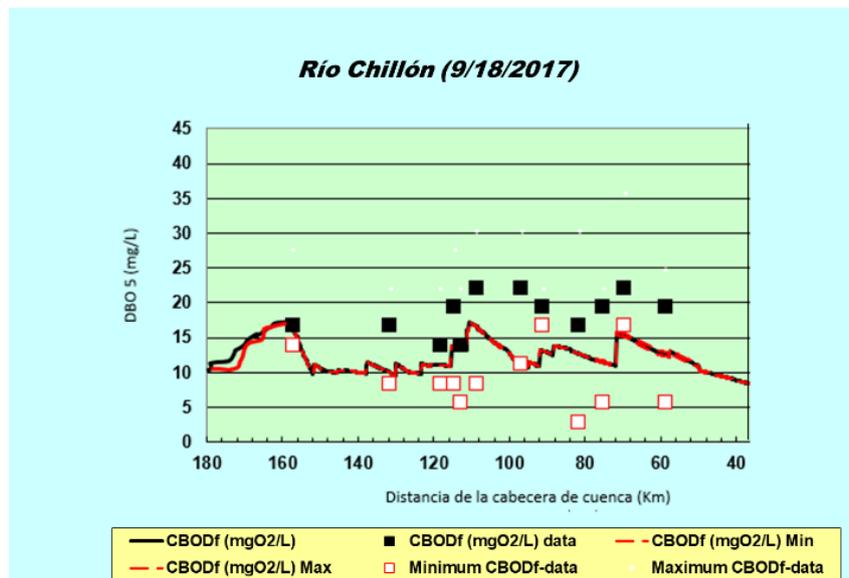


Figura 23: Análisis de modelo y escenario DBO₅ sin medidas de control

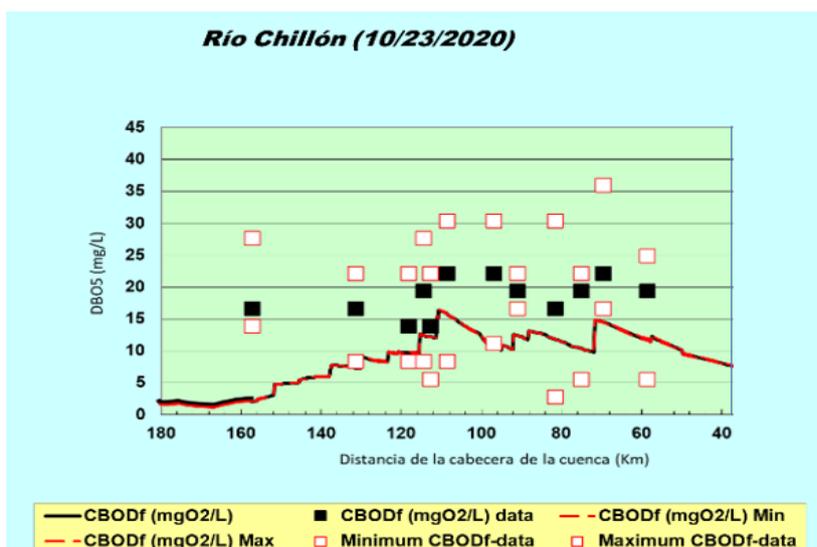


Figura 24: Análisis de modelo y escenario DBO5 con medidas de control

En la figura 24 se muestran los resultados de la validación para el escenario 1); es decir, simulando la implementación de una planta de tratamiento, reduciendo la concentración hasta valores de DBO₅ menores de 5 mg/L, en la zona de Obrajillo (Km160), posteriormente se incrementa en la localidad de Arahuy (Km 120) y Santa Rosa de Quives (Km80), de acuerdo con lo señalado en los informes de la ANA, en esas mismas localidades se vierten directamente aguas residuales domésticas, que por consecuencia incrementan la concentración de DBO₅, lo que lleva a la reflexión sobre la importancia de una gestión integrada y completa en la cuenca del río Chillón, que permitiría mantener valores estables y dentro de lo permitido ambiental y saludablemente.

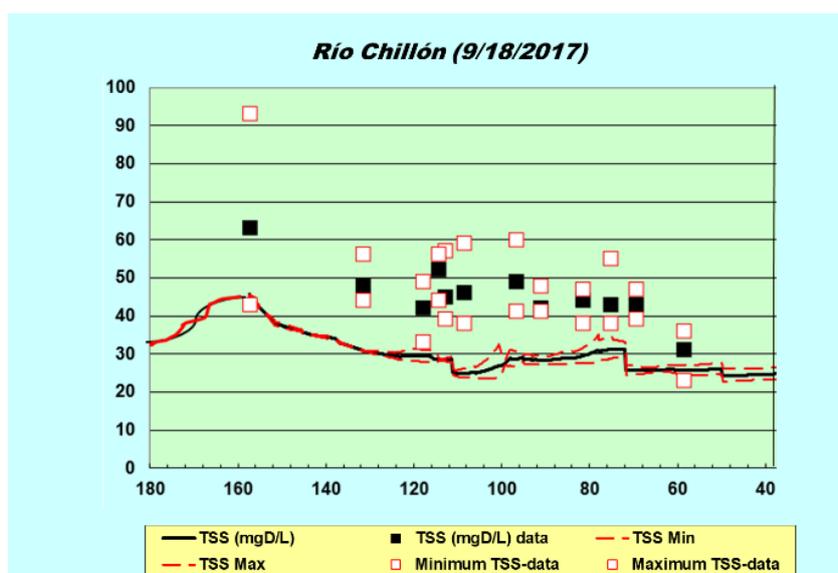


Figura 25: Análisis de modelo y escenario sólidos totales disueltos sin medidas de control

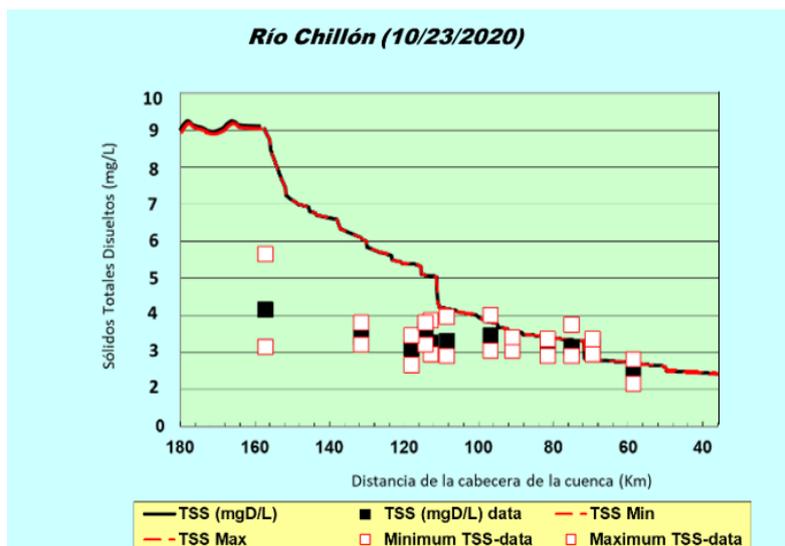


Figura 26: Análisis de modelo y escenario sólidos totales disueltos con medidas de control

En la figura 25 se presenta el modelamiento del parámetro sólidos suspendidos totales (SST) para el escenario 1) (sin medidas de control), alcanzando concentraciones superiores a 30 mg/L en la localidad de Obrajillo (Km 160) y en la figura 26 se dan los resultados para el escenario 2) (simulando la implementación de una planta de tratamiento de aguas residuales), la concentración disminuirá hasta valores cercanos a 9 mg/L en las localidades de Canta (Km 180) y Obrajillo (Km160) respectivamente, a diferencia de los valores presentados en la DBO5 que se incrementaban en algunas localidades, para el caso de los valores de SST la concentraciones se reducen en las localidades de Arahuary (Km120), Huamantanga (Km100) y Santa Rosa de Quives (Km 80), debido a que no se registran botaderos de residuos sólidos.

Es importante mencionar que no se ha considerado el análisis de la parte baja de la cuenca, debido a que los datos no estaban completos e interferían en la adecuada aplicación del modelo sobre la cuenca.

La concentración de los contaminantes en la localidad de Obrajillo (Km 160) disminuirá notablemente, viéndose reflejado en las figuras 25 y 26, puesto que la instalación de la planta de tratamiento recogerá las descargas puntuales que se realizan, canalizarán y conducirán las aguas residuales hasta el sitio donde se construirá la planta de tratamiento. Este resultado corrobora la utilidad predictiva del recurso hídrico sobre escenarios supuestos de desarrollo y control indicado por Castillo y Espinoza en el año 2005, que a través del uso y descarga de efluentes con modelos matemáticos se pueden predecir los efectos asociados.

Al eliminar los vertimientos directos de aguas residuales domésticas sobre el río Chillón se espera que se disminuya en al menos el 70% la concentración de los contaminantes en la corriente del río Chillón en la localidad de Obrajillo (Km 160).

V. CONCLUSIONES

1. El modelamiento del río Chillón pudo ser desarrollado gracias a la información brindada en los monitoreos de campo realizados por la ANA, lo que permitió calibrar, validar y aplicar el modelo QUAL2Kw.
2. Se analizaron, evaluaron y compararon las características de tres modelos existentes QUALK2W, WASP y Streeter Phelps, cuya funcionalidad en común, permite la evaluación de calidad de cuerpos de agua, permitiendo destacar la factibilidad de aplicabilidad para la elección del modelo usado en la presente investigación.
3. Se eligió el modelo QUAL2Kw, por las características que interactúan con la corriente y el flujo permanente no uniforme con variaciones en el recorrido del río Chillón y porque permite identificar la interacción de los sedimentos con el agua, lo que constituye una herramienta nueva para la modelación de la calidad del agua en el país.
4. A través del modelamiento se pudieron detectar partes de la cuenca en estado crítico, aprox. 200 m aguas abajo del vertimiento de la localidad de Obrajillo (Km 160), originando problemas de contaminación proveniente de actividades humanas como agricultura, vertimiento de aguas residuales domésticas, ocasionando que la concentración de todos los contaminantes se incremente considerablemente, si los comparamos con los Estándares de Calidad Ambiental – ECA, el agua del río presenta valores de oxígeno disuelto menores a 4mg/L, a causa del vertimiento de residuos de centros poblados y botaderos; lo cual no permite una adecuada calidad de vida de los organismos acuáticos, respecto a la DBO₅, se encontraron valores superiores a 15 mg/L en DBO₅, ocasionada también por vertimiento de residuos orgánicos de centros poblados, siendo un indicador de contaminación orgánica, que deteriora la calidad del agua del río Chillón.
5. El resultado obtenido en la presente investigación es el punto de partida del modelamiento de la calidad del agua para el río Chillón, dado que no existen

antecedentes de modelamiento matemático, con la misma exactitud y proyección, que se presentan en las líneas continuas de las figuras 14, 16, 18, 20 y 22; así como en las figuras 25 y 26 se muestran escenarios con implementación de medida de control.

6. El modelamiento permite determinar los beneficios sobre la calidad del agua del río Chillón en la localidad de Obrajillo, simulando el escenario de la implementación de la PTAR, lo cual permitiría reducir en más del 70% la concentración del DBO5 y de SST dentro de la misma localidad, lo que devolvería al río una calidad acorde al ECA agua al bajar la DBO de 15 mg/L a 5 mg/L; y los SST de 30 mg/L a 9 mg/L. El análisis económico de beneficio/costo esta fuera del alcance de la investigación, pero desde el punto de vista cualitativo se considera una magnitud significativa.
7. El modelo de calidad del agua QUAL2Kw aplicado al río Chillón puede ser ajustado posteriormente a partir de los datos de monitoreo de campo futuros debido a que representa una herramienta confiable y eficaz que contribuye a la planificación del recurso hídrico.

VI. RECOMENDACIONES

- Se recomienda que en los planes de monitoreo que servirán para la implementación de modelos de calidad del agua, se incluya información detallada de los datos de entrada del modelo, para evitar distorsiones en los resultados del software.
- Se recomienda realizar campañas de monitoreo cinco veces al año, en época de estiaje, aguas medias - bajas, aguas medias, aguas medias – altas y avenidas, para establecer análisis comparativos del comportamiento de la calidad de agua en el software.
- Se recomienda ampliar la investigación hacia el análisis económico para la implementación del escenario con mejoras.
- Se recomienda difundir y crear la cultura del agua en la población aledaña y centros de formación.
- Se recomienda que este trabajo se haga de conocimiento a las instituciones responsables del manejo de la cuenca.
- Se recomienda incrementar el número de puntos de muestreo, ya que no se cuenta con data en muchas estaciones de monitoreo.

VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aliaga Martínez, (2010). *Situación ambiental del recurso hídrico en la cuenca baja del río Chillón y su factibilidad de recuperación para el desarrollo sostenible*. Lima: Universidad Nacional de Ingeniería. Obtenido de <http://cybertesis.uni.edu.pe/handle/uni/645>
- ANA, (2020). *Evaluación de Resultados del IX Monitoreo de la Calidad del Recurso Hídrico Superficial en la Unidad Hidrográfica Chillón 137556 periodo 2020-II*. Lima: ANA.
- ANA, (2019). *Informe Técnico de resultados del monitoreo participativo de la calidad de agua en la cuenca del Río Chillón*. Lima: ANA.
- ANA, (2016 -b). *Resultado del Monitoreo Participativo de la Calidad de Agua de la cuenca del río Chillón*. Lima: Autoridad Nacional del Agua.
- ANA, (2016). *Priorización de Cuencas para la Gestión de los Recursos Hídricos. Lima, Perú*. Autoridad Nacional del Agua. Lima: Autoridad Nacional del Agua.
- ANA, (2018). *Metodología para la Determinación del Índice de Calidad ambiental del agua ICA – PE aplicado a los cuerpos de aguas continentales superficiales*. Lima: Autoridad Nacional del Agua.
- ANA, (2019). *Diagnóstico inicial para el Plan de gestión de recursos hídricos en el ámbito de las cuencas Chillón, Rímac, Lurín y Chilca*. Lima: Autoridad Nacional del Agua.
- Arroyave et al, (2013). Estudio del Modelamiento de la Calidad del agua del río Sinú, Colombia. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 1-12.
- Brito et al, (2011). Papel de la modelación matemática en la formación de los ingenieros. *Ingeniería Mecánica*, 14(2), 129-139.
- Bui et al, (01 de Abril de 2019). Integración de SWAT y QUAL2K para el modelado de la calidad del agua en una cuenca de datos escasos de la cuenca del río Cau en Vietnam. *Open Publications of UTS Scholars - Ecohidrología e hidrobiología*, 2, 210 - 223.
- Castillo y Espinoza, (2005). *Modelo de simulación para la calidad de agua de un río*. Chile: CI51D Contaminación de Recursos Hídricos.
- Castro, M. (2015). *Aplicación del QUAL2Kw en la Modelación de la Calidad del Agua del río Guacaica, departamento de Caldas, Colombia*. Manizales, Colombia: Universidad Nacional de Colombia.

- CENEPRED, (2018). *Informe de Evaluación de Riesgo por Inundación fluvial en el río Chillón Tramo Callao*. Callao: Gobierno Regional del Callao.
- Chapra y Pelletier, (2008). *A modeling framework for simulating river and stream water quality*. India: Department of Ecology Publications Distributions Office. Obtenido de <https://pdfcoffee.com/qual2kw-theory-and-documentation-version-51-pdf-free.html>
- Chapra, (2008). *Surface Water-Quality Modeling*. Illinois: Waveland Pr Inc. Obtenido de <https://www.amazon.es/Surface-Water-Quality-Modeling-Steven-Chapra/dp/1577666054>
- Cubillos Ríos, J. (2013). *Transporte de Contaminantes en Sistemas Fluviales y Evaluación de la Aplicabilidad del Modelo WASP en las Cuencas de los Ríos Elqui y Choapa, Región de Coquimbo, Chile*. Chile: Universidad de la Serena.
- DIGESA, (2011). *Evaluación de la Calidad Sanitaria de las aguas del río Chillón*. Lima, Perú: DIGESA.
- Formica et al, (2015). Modelado de Calidad de Agua en ríos de Montaña con Impacto Antrópico. Caso estudio Sierra Chica de Córdoba, Argentina. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 31, 327-341.
- García et al, (2014). *Dispersión de contaminantes en cuenca Tumaque entre Lara*. Lara, Venezuela: Universidad Centro-Occidental Lisandro Alvarado (UCLA).
- García, (2019). *Modelización de la calidad del agua del estero Guayjì, Cantón Quevedo, Provincia*. Ecuador: Universidad Técnica Estatal de Quevedo.
- García, (2008). *Modelación de la calidad del agua en corrientes naturales mediante sistemas no lineales acoplados*. Bogotá, Colombia: Pontificia Universidad Javeriana.
- Guevara, (2016). *Transporte y Transformación de Contaminantes al Ambiente y Contaminación al Agua* (Primera ed.). Lima: Autoridad Nacional del Agua.
- Guevara, (2013). *Ética y educación ambiental: Una contribución a la cultura del agua*. Lima, Perú: Autoridad Nacional del Agua (ANA).
- Hodali, (2021). *Evaluación de la aplicabilidad del programa computacional WASP en la simulación de la calidad del agua del humedal del río Cruces, cuenca del río Valdivia, Región de Los Ríos, Chile*. Santiago de Chile, Chile: Universidad de Chile.
- Jaramillo et al. (2016). *Integración de los Modelos WEAP y QUAL2K para la simulación de la Calidad agua de fuentes superficiales, Caso de estudio: Cuenca del río La Vieja, Colombia*. Colombia: Aqua-LAC-ORG. Obtenido de <http://aqua-lac.org/index.php/Aqua-LAC/article/view/158>
- Londoño et al. (2016). Los Riesgos de los metales pesados en la salud humana y animal. *Bioteología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*, 145-153.
- MINAM (2017). *Aprueban Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Agua y estableces Disposiciones Complementarias*. Obtenido de

<https://sinia.minam.gob.pe/normas/aprueban-estandares-calidad-ambiental-eca-agua-establecen-disposiciones>

- MINAM, (2010). *Estudio de Línea Base Ambiental de la cuenca del Río Chillón*. Lima: Ministerio del Ambiente. Obtenido de <https://www.yumpu.com/es/document/read/14404194/caratula-chillon-informe-final-consultorias-minam-ministerio-del->
- OEFA, (2014). *La fiscalización ambiental en aguas residuales*. Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental. Lima: Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental.
- Ordoñez, (2020). *Análisis de la Calidad del agua en el río Chili (Distritos de Tiabaya y Uchumayo) antes y después de la puesta en marcha y operación de la Planta de Tratamiento de Agua Residuales "La Enlozada" aplicando un modelo matemático*. Arequipa: Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa.
- Quiñones et al, (2020). Empleo del Modelo Streeter-Phelps para estimar el oxígeno disuelto del Río Utcubamba. *ECUADORIAN SCIENCE JOURNAL*, 12-16.
- Rangel Peraza, (2012). *Desarrollo de un modelo Hidrodinámico y de Calidad del Agua en la Presa de Aguamilpa (Nayarit, México)*. México: Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco, A.C.
- Reyes Cubas, (2012). *Estudio de la contaminación de las aguas del río Chillón*. Lima, Perú: Universidad Nacional de Ingeniería. Obtenido de <http://cybertesis.uni.edu.pe/handle/uni/1082>
- Reyes, (2012). *Estudio de la contaminación de las aguas del río Chillón*. Lima: Universidad Nacional de Ingeniería. Obtenido de <http://cybertesis.uni.edu.pe/handle/uni/1082>
- Rodriguez, (2020). *Implementación del modelo de calidad de agua qual2k, sobre un tramo del río pamplonita, para simulación de escenarios, Bogotá, Colombia*. Bogotá, Colombia: Universidad Católica de Colombia.
- Sierra, (2011). *Calidad del agua. Evaluación y diagnóstico* (Primera ed.). (L. D. Escoba, Ed.) Medellín, Colombia: Universidad de Medellín, Ediciones de la U. Obtenido de https://www.academia.edu/9511155/Calidad_del_agua_evaluaci%C3%B3n_y_diagn%C3%B3stico
- Terrones y Herrera, (2015). *Calidad del agua en la cuenca baja del Río Chillón en época de estiaje y riesgo por el uso directo en riego agrícola*. Callao, Perú: Universidad Nacional del Callao.
- WWAP, (2016). *Informe de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos en el Mundo*. Francia: UNESCO.

VIII. ANEXOS

ANEXO 1: PUNTOS DE MONITOREO DEL 2014

Tabla 10: Puntos de monitoreo de calidad del agua en la cuenca del río Chillón año 2014

NÚMERO	DESCRIPCIÓN	COORDENADAS UTM (WGS 84)		DISTRITO/ PROVINCIA
		ESTE	NORTE	
1	Río Chillón, 50 m. aguas debajo de la confluencia con la quebrada Torococha (procede de la laguna Torococha y Chuchón Km 134.5 carretera Lima Canta)	341300	8741016	Huaros - Canta
2	Río Chillón, Puente Huaros Km 120 carretera Lima Canta, antes de poblado de Huaros aguas arriba	330786	8738406	Huaros - Canta
3	Río Chillón, aprox. 100 m, aguas arriba del puente camino a Obrajillo	323190	8733627	Canta- Canta
4	Río Chillón, aprox. 200 m aguas abajo del vertimiento de la localidad de Obrajillo	323064	8733477	Canta- Canta
5	Río Chillón, aprox. 100 m aguas debajo de la quebrada Putura	322978	8733237	Canta- Canta
6	Río Chillón, 100 m. aguas debajo de la confluencia de la Quebrada Condor Huinco Km 92.5 carretera Lima-Canta	319701	8728155	Canta- Canta

<<Continuación>>

NÚMERO	DESCRIPCIÓN	COORDENADAS UTM (WGS 84)		DISTRITO/ PROVINCIA
		ESTE	NORTE	
7	Río Chillón, 50 m, aguas debajo de la confluencia con la quebrada Moquegua (MD) y del poblado Cocucha	311124	8719774	Santa Rosa de Quives - Canta
8	Río Chillón. 100 m. aguas arriba de la confluencia con la Quebrada Arahuay Km 64.6 carretera Lima-Canta	304715	8710213	Santa Rosa de Quives - Canta
9	Río Chillón, altura del puente Magdalena, Km 57 Carretera Lima – Canta	299751	8706567	Santa Rosa de Quives - Canta
10	Río Chillón, altura canal de regadío antes de la planta SEDAPAL	282380	8694228	Carabayllo - Lima
11	Río Chillón, aprox. 300 m. aguas abajo del botadero de residuos sólidos de Construcción Sector Chaperito	278536	8687258	Carabayllo - Lima
12	Río Chillón, puente peatonal aguas arriba de la intersección con la Av. Panamericana Norte	274544	8682573	Puente Piedra – Comas - Lima
13	Río Chillón, Puente Chillón -Panamericana Norte	274138	8681693	Puente Piedra – Comas - Lima
14	Río Chillón, aprox. 100 m, aguas arriba de la Toma de Captación de agua de la comisión de regantes Chuquitanta	273475	8680227	San Martín de Porres - Lima
15	Río Chillón 700 m. aproximadamente aguas arriba del Puente Néstor Gambeta	268263	8679387	Ventanilla - Callao
16	Desembocadura del río Chillón a la playa	267151	8679309	Ventanilla - Callao

<<Continuación>>

NÚMERO	DESCRIPCIÓN	COORDENADAS UTM (WGS 84)		DISTRITO/ PROVINCIA
		ESTE	NORTE	
	Márquez, después del enrocado			

FUENTE: ANA (2014)

ANEXO 2: PUNTOS DE MONITOREO DEL 2017

Tabla 11: Puntos de monitoreo de calidad del agua en la cuenca del río Chillón año 2017

NÚMERO	DESCRIPCIÓN	COORDENADAS UTM (WGS 84)		ALTURA m.s.n.m.
		ESTE	NORTE	
1	Río Chillón, 50 metros después de la confluencia con la quebrada Torococha que trae las aguas de la Laguna Torococha y Chuchón Km 134.5 carretera Lima Canta	341300	8741016	4019
2	Puente Huaros Km 120 carretera Lima Canta, antes de poblado de Huaros aguas arriba	330786	8738406	3460
3	Río Chillón, aprox. 100 m, aguas arriba del puente camino a Obrajillo	323190	8733627	2662
4	Río Chillón, aprox. 200 m aguas abajo del vertimiento de la localidad de Obrajillo	323064	8733477	2682
5	Río Chillón, aprox. 100 m aguas debajo de la quebrada Putura	322978	8733237	2692

<<Continuación>>

NÚMERO	DESCRIPCIÓN	COORDENADAS UTM (WGS 84)		ALTURA m.s.n.m.
		ESTE	NORTE	
6	100 m. agua abajo en el Río Chillón con la intersección de la Quebrada Condor Huinco Km 92.5 carretera Lima-Canta	319701	8728155	2262
7	Río Chillón, 50 m, aguas abajo de la confluencia con la quebrada Moquegua y 250 m, aguas abajo del poblado Cocucha Km 79 m carretera Lima-Canta	311124	8719774	1600
8	Río Chillón aguas arriba de la confluencia con la Quebrada Arahuay Km 64.6 carretera Lima-Canta	304715	8710213	1144
9	Río Arahuay, antes de la confluencia con el río Chillón	304553	8709997	
10	Río Chillón, altura del Puente Magdalena Km 57 carretera Lima-Canta	299751	8706567	945
11	Río Chillón, aguas abajo después de la descarga de la PTAR del C.P. El Olivar	284879	8700736	
12	Río Chillón, altura canal de regadío antes de la planta SEDAPAL	282380	8694228	372
13	Río Chillón, aprox. 300 m. aguas abajo del botadero de residuos sólidos de Construcción Sector Chaperito	278536	8687258	237

<<Continuación>>

NÚMERO	DESCRIPCIÓN	COORDENADAS UTM (WGS 84)		ALTURA m.s.n.m.
		ESTE	NORTE	
14	Río Chillón, puente peatonal aguas arriba de la intersección con la Av. Panamericana Norte	274544	8682573	135
15	Río Chillón, Puente Chillón - Panamericana Norte	274138	8681693	121
16	Río Chillón, aprox. 100 m, aguas arriba de la Toma de Captación de agua de la comisión de regantes Chuquitanta	273475	8680227	109
17	Río Chillón, aprox. 100 m. aguas abajo del vertimiento municipal de la PTAR Puente Piedra de SEDAPAL	271116	8678176	
18	Río Chillón 700 m. aproximadamente aguas arriba del Puente Néstor Gambeta	268263	8679387	24
19	Desembocadura del río Chillón a la playa Márquez, después del enrocado	267151	8679309	13

FUENTE: ANA (2019)

ANEXO 3: PUNTOS DE MONITOREO DEL 2020

Tabla 12: Puntos de monitoreo de calidad del agua en la cuenca del río Chillón año 2021

NÚMERO	DESCRIPCIÓN	COORDENADAS UTM (WGS 84)		ALTURA m.s.n.m.
		ESTE	NORTE	
1	Río Chillón, aproximadamente 150 m después de la confluencia con la quebrada Torococha que trae las aguas de la Laguna Torococha y Chuchón km 134,5 carretera Lima-Canta	341300	8741016	4019
2	Puente Huaros Km 120 carretera Lima Canta, antes de poblado de Huaros aguas arriba	330786	8738406	3460
3	Río Chillón, aprox. 100 m, aguas arriba del puente camino a Obrajillo	323190	8733627	2662
4	Río Chillón, aprox. 200 m aguas abajo del vertimiento de la localidad de Obrajillo	323064	8733477	2682
5	Río Chillón, aprox. 100 m aguas debajo de la quebrada Putura	322978	8733237	2692
6	Río Chillón, 100 m aguas abajo de la confluencia de la quebrada Chipicono, km 92,5 carretera Lima-Canta	319701	8728155	2267
7	Río Chillón, 50 m aguas abajo de la confluencia de la quebrada Moquegua (MD) y del poblado Cocucha Km. 79 carretera Lima-Canta	311124	8719774	1600
8	Río Chillón, 100 m aguas arriba de la confluencia con el río Quisquichaca, km 64 carretera Lima-Canta	304715	8710213	1144

<<Continuación>>

NÚMERO	DESCRIPCIÓN	COORDENADAS UTM (WGS 84)		ALTURA m.s.n.m.
		ESTE	NORTE	
9	Río Arahuay, antes de la confluencia con el río Chillón	299751	8706567	945
10	Río Chillón, altura canal regadio antes de planta SEDAPAL	282380	8694228	372
11	Río Chillón, aprox. 300 m aguas abajo del botadero de residuos sólidos de construcción sector Chaperito	278536	8687258	237
12	Río Chillón, puente peatonal, aguas arriba de la intersección con la Av. Panamericana Norte	274544	8682573	135
13	Río Chillón, puente Chillón - Panamericana Norte	274138	8681693	121
14	Río Chillón, aprox. 100 m aguas arriba de la captación de agua de la Comisión Regantes Chuquitanta	273475	8680227	109
15	Río Chillón, aprox. 700 m agua arriba del puente Néstor Gambeta	268263	8679387	24
16	Desembocadura del Río Chillón, a la playa Márquez, después del enrocado	267151	8679309	13
17	Río Chillón, aguas abajo de la descarga de la PTAR del C.P El Olivar	284879	8700736	487
18	Río Chillón, aprox. 100 m aguas abajo del vertimiento municipal de la PTAR Puente Piedra	271116	8678176	51
19	Río Quisquichaca, aproximadamente 480 m antes de la confluencia con	304989	8709774	1158

<<Continuación>>

NÚMERO	DESCRIPCIÓN	COORDENADAS UTM (WGS 84)		ALTURA m.s.n.m.
		ESTE	NORTE	
	el río Chillón y a 30 m al NE del puente.			

FUENTE: ANA (2019)