

Uso y aplicación del modelo QUAL2K en el análisis de la calidad del agua y modelación de vertimientos: Una revisión bibliográfica bajo una perspectiva de la ingeniería ambiental para el recurso hídrico.

Autor: Juliana Arbeláez Quintero

Director: Ing. Jordan Giovanny Narváez Pantoja

Facultad de Ciencias Ambientales – Programa Ingeniería Ambiental

Resumen

La revisión realizada se articula con los propósitos del diplomado en Modelación Ambiental de Vertimientos, ya que promueve la comprensión y el manejo del modelo QUAL2K como una herramienta fundamental en los procesos de gestión de la calidad del agua. Este espacio académico fortalece las capacidades técnicas y conceptuales para el estudio de la normativa ambiental sobre vertimientos y la consulta de manuales vinculados a los modelos de simulación y tratamiento del recurso hídrico. De este modo, el diplomado contribuye a la formación integral del ingeniero ambiental, al proporcionar bases sólidas para la evaluación y el manejo sostenible de los sistemas acuáticos.

En cuanto a la aplicabilidad, la revisión teórica y temática permitió profundizar en los fundamentos del modelo QUAL2K, reconociendo su estructura metodológica y su capacidad para representar los procesos físicos, químicos y biológicos que inciden en la calidad del agua de los ríos y quebradas. Asimismo, se identificaron las variables hidrológicas, fisicoquímicas y biológicas más representativas en el modelamiento, junto con los criterios asociados al control de vertimientos. La comparación entre distintos autores, tanto a nivel nacional como internacional, evidenció la utilidad del modelo como instrumento de simulación confiable para la evaluación ambiental y la proyección de escenarios de recuperación del recurso hídrico.

En conjunto, la relación entre el diplomado, la revisión del modelo y la Ingeniería Ambiental resalta la importancia del uso adecuado de herramientas como QUAL2K en el ejercicio profesional. Su conocimiento y aplicación permiten interpretar la interacción entre

los vertimientos y la dinámica de los ecosistemas acuáticos, aportando al cumplimiento de la legislación ambiental y al diseño de estrategias de control, manejo y conservación del agua.

Palabras clave

Recurso hídrico, calidad del agua, modelación ambiental, QUAL2K, legislación ambiental.

Abstract

The review conducted aligns with the objectives of the Diploma in Environmental Modeling of Wastewater Discharges, as it promotes the understanding and use of the QUAL2K model as a fundamental tool in water quality management processes. This academic space strengthens the technical and conceptual skills for studying environmental regulations on wastewater discharges and consulting manuals related to simulation models and water resource treatment. In this way, the diploma program contributes to the comprehensive training of environmental engineers by providing a solid foundation for the evaluation and sustainable management of aquatic systems.

Regarding applicability, the theoretical and thematic review allowed for a deeper understanding of the fundamentals of the QUAL2K model, recognizing its methodological structure and its capacity to represent the physical, chemical, and biological processes that affect the water quality of rivers and streams. Likewise, the most representative hydrological, physicochemical, and biological variables in the modeling were identified, along with the criteria associated with wastewater discharge control. A comparison of different authors, both nationally and internationally, demonstrated the model's usefulness as a reliable simulation tool for environmental assessment and the projection of water resource recovery scenarios.

Overall, the relationship between the diploma program, the model review, and Environmental Engineering highlights the importance of the appropriate use of tools like QUAL2K in professional practice. Its knowledge and application allow for the

interpretation of the interaction between wastewater discharges and the dynamics of aquatic ecosystems, contributing to compliance with environmental legislation and the design of water control, management, and conservation strategies. Thus, a comprehensive perspective is consolidated, combining academic training, applied research, and responsible environmental management.

KeyWords

Water resources, water quality, environmental modeling, QUAL2K, environmental management.

Introducción

La calidad del agua se ha convertido en un eje fundamental dentro de la gestión ambiental, dado el aumento progresivo de los impactos ocasionados por las actividades humanas. El desarrollo industrial, agrícola y urbano ha incrementado la descarga de vertimientos, afectando la capacidad de autodepuración de los ecosistemas acuáticos y alterando su equilibrio ecológico (PNUMA, 2022; IDEAM, 2018). Ante este escenario, la modelación ambiental se consolida como una herramienta técnica clave para comprender los procesos físicos, químicos y biológicos que determinan el comportamiento de los cuerpos de agua.

Un modelo de calidad del agua es una representación matemática, formulada para evaluar de manera particular escenarios futuros; con relación al impacto de contaminantes y sustancias que se mueven, reaccionan y se transforman en cuerpos de agua (ríos, quebradas, redes de distribución, entre otros). Estos modelos de calidad del agua se convierten en un instrumento o mecanismo fundamental para la gestión ambiental, sobre todo a partir de la década del 70 y gracias a los avances científicos y tecnológicos en la comprensión de los procesos hidrológicos y bioquímicos, ganan un papel protagónico en la determinación y evaluación de diferentes fuentes contaminantes del recurso hídrico.

Uno de los más representativos es el modelo QUAL2K, desarrollado por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA), reconocido por su capacidad para simular el transporte, la dispersión y la transformación de contaminantes en ríos y quebradas (Chapra, 2008). El modelo QUAL2K, surge como la versión más avanzada de los QUAL, gracias a los aportes científicos en materia de ingeniería ambiental y la modelación de la calidad del agua de profesores como Chapra y Pelletier. Es decir, el QUAL2K es un modelo de simulación de la calidad del agua, probado, reconocido e implementado para simular la dinámica de los contaminantes, el ciclo de los nutrientes y los niveles de oxígeno en ríos y arroyos.

Los modelos como el QUAL2K, se convierten en una herramienta fundamental en la toma de decisiones de una gestión ambiental eficiente y efectiva, porque facilita la planificación del recurso hídrico, permite evaluar los impactos que afectan un ecosistema acuático, define

escenarios, establece estándares y límites ambientales orientados a garantizar la salud pública y proteger un recurso vital.

El uso de modelos numéricos para estudiar la calidad del agua ha cobrado importancia en diversos países, tanto desarrollados como en vía de desarrollo, entre ellos Brasil, México, Chile, España y Colombia.

En América Latina, especialmente en Brasil y Chile, este modelo ha sido aplicado para evaluar los efectos de descargas agrícolas e industriales, estimar la capacidad de autodepuración y plantear estrategias de manejo ambiental sostenible (Bottino, 2010; Universidad de Chile, 2016). En Colombia, su implementación en cuencas como las de los ríos Bogotá, La Vieja y Sinú ha permitido calibrarlo con información local, obteniendo resultados relevantes para el diagnóstico de la contaminación, la formulación de medidas de control y la evaluación de la eficiencia de las plantas de tratamiento de aguas residuales (Jaramillo & Galvis, 2018; CAR, 2020).

Entre las principales ventajas del QUAL2K se encuentra su capacidad para integrar variables hidrológicas, fisicoquímicas y biológicas bajo condiciones de simulación controladas, lo que permite analizar con precisión parámetros como el oxígeno disuelto, la DBO₅, los nutrientes y la materia orgánica. Además, su estructura flexible y su compatibilidad con otros modelos, como HEC-RAS, junto con la posibilidad de calibración mediante algoritmos genéticos, amplían su aplicabilidad en proyectos de planificación hídrica y control de vertimientos (Pelletier & Chapra, 2008; Bui, 2019).

En este sentido, el presente trabajo desarrolla una revisión bibliográfica basada en treinta investigaciones nacionales e internacionales que han utilizado el modelo QUAL2K en distintos contextos hidrológicos. Su objetivo es analizar las principales tendencias, metodologías y resultados encontrados, con el fin de resaltar la importancia de esta herramienta en la gestión integral y sostenible del recurso hídrico.

Problemática

Cuando el análisis se centra en los principales problemas y dificultades de la calidad del agua, la mayoría de las investigaciones coinciden en los siguientes aspectos fundamentales; contaminación por actividades antrópicas, infraestructura deficiente para su tratamiento y distribución, impactos del cambio climático, incumplimiento de tratados internacionales y normativa vigente, además de la ausencia de una política pública, que trascienda en el tiempo, elimine los intereses personales y supere la ineptitud de la gestión pública, además de mejorar la gobernanza.

En Colombia, la problemática asociada a la contaminación del recurso hídrico es especialmente crítica en los ríos y quebradas que atraviesan zonas urbanas e industriales. Los vertimientos domésticos e industriales, el manejo inadecuado de los residuos sólidos y la limitada capacidad de autodepuración de los sistemas hídricos lo cual han generado un deterioro progresivo de la calidad del agua, afectando sus usos para consumo, riego y recreación.

Las limitaciones más relevantes, de los modelos de calidad del agua como el QUAL2K; centran su discusión en aspectos culturales, políticos, técnicos y económicos, entre los que se destaca la complejidad de su implementación por costos y tiempo; la resistencia al cambio por la falta de conciencia, pedagogía o comprensión de nuevos métodos y las dificultades para definir y evaluar el alcance por la inestabilidad del marco normativo, la excesiva burocracia y la ausencia de una visión prospectiva de los gobernantes, además de las dificultades técnicas propias de estos modelos en su implementación, como las antes mencionadas y entre las que se destaca la exigencia máxima de datos, la simplificación de la realidad y el poco alcance o cobertura para sistemas de agua más complejos.

Existen múltiples programas y bases de datos destinados al análisis de la calidad del agua; sin embargo, muchos de ellos presentan limitaciones en cuanto a las variables que contemplan o su aplicabilidad en diferentes tipos de cuerpos hídricos. Algunos modelos no permiten simular de manera integral los procesos físicos, químicos y biológicos que intervienen en la dinámica del agua, mientras que otros requieren altos costos de

implementación o datos difíciles de obtener en campo. Estas restricciones dificultan la evaluación precisa de la calidad del recurso hídrico y la proyección de escenarios de manejo ambiental.

Objetivos

General

Evaluar el uso del modelo QUAL2K como herramienta técnica para la simulación y evaluación de la calidad del agua en cuerpos hídricos, con el fin de fortalecer la aplicabilidad en modelación de vertimientos y la toma de decisiones en materia de control y planificación del recurso hídrico.

Específicos

Estudiar la legislación ambiental sobre vertimientos y revisar manuales de uso de modelos para calidad y tratamiento de agua.

Realizar una revisión teórica y temática del modelo QUAL2K mediante la consulta de literatura nacional e internacional (2010–2024) en bases de datos especializadas, aplicando criterios de búsqueda y selección que permitan identificar sus principales usos en la gestión del agua y en estudios de modelación del recurso hídrico.

Establecer los criterios relevantes en materia de control de vertimientos y planificación Hídrica; con base en la protección del recurso hídrico y en cumplimiento de la normativa vigente en Colombia (Decreto 1076 de 2015, modificado parcialmente por el Decreto 050 de 2018).

Metodología

El diseño de la investigación exploratoria y cualitativa se enfoca en compilar, analizar e interpretar la información existente de fuentes secundarias y evaluar el uso del modelo QUAL2K como herramienta técnica para la simulación y evaluación de la calidad del agua en cuerpos hídricos, con el fin de fortalecer la aplicabilidad en modelación de vertimientos y la toma de decisiones en materia de control y planificación del recurso hídrico. La orientación cualitativa, se soporta en la construcción de conocimiento a partir de la interpretación del contexto, estableciendo el estado del arte para sustentar la investigación más allá de una revisión bibliográfica.

En una fase inicial, se identifican aproximadamente cincuenta estudios científicos y documentos técnicos, los cuales fueron sometidos a una preselección mediante criterios de lectura definidos de acuerdo con los objetivos específicos de la investigación.

Para la selección de la información se establecieron los criterios técnicos, según exigencia de los objetivos específicos que garantizan la pertinencia y calidad de los documentos analizados. Se consideran artículos científicos, informes técnicos y tesis que evidencian la aplicación directa del modelo QUAL2K en el análisis de la calidad del agua en ríos o quebradas, así como estudios que abordan procesos de calibración y validación del modelo.

También se incluyen revisiones y casos de estudio que muestran resultados sobre la eficiencia de QUAL2K en la simulación de variables fisicoquímicas y biológicas, como la DBO₅, el oxígeno disuelto, los nutrientes y los sólidos suspendidos, además de publicaciones que evidenciaran su utilidad en la gestión ambiental y la planificación hídrica. Por el contrario, se descartaron documentos que emplearan modelos distintos a QUAL2K, que carecieran de información suficiente o verificable, o que se centraran únicamente en aspectos teóricos sin presentar resultados prácticos de modelación.

Se seleccionaron cincuenta artículos de investigación donde se dividieron en internacional, nacional y local, que cumplieron con los criterios definidos y que permitieron identificar las aplicaciones del modelo en la evaluación de la calidad del agua, donde se recopilaron estudios que diagnosticaron niveles de contaminación y procesos de autodepuración; las

metodologías de calibración y validación, en las cuales se revisaron los procedimientos empleados para ajustar las simulaciones, incluyendo herramientas complementarias como HEC-RAS; y el uso del modelo en la gestión y planificación ambiental, donde se analizaron experiencias que evidencian la utilidad de QUAL2K para apoyar estrategias de control de vertimientos y toma de decisiones en planificación hídrica.

Se desarrolló una revisión bibliográfica enfocada en analizar el uso y la aplicación del modelo QUAL2K como herramienta de simulación y evaluación de la calidad del agua en la gestión del recurso hídrico. La búsqueda de información se efectuó en tres bases de datos científicas especializadas, Scopus, Web of Science y Google Scholar, considerando publicaciones comprendidas entre los años 2010 y 2024. Para la búsqueda se emplearon palabras clave y categorías temáticas relacionadas con la modelación ambiental, la calidad del agua, la gestión del recurso hídrico, la simulación hidrológica y el propio modelo QUAL2K.

El proceso comenzó con la definición de palabras clave y términos relacionados con el objeto de estudio, tales como “QUAL2K model”, “water quality simulation”, “hydrological modeling”, “environmental management”, “water pollution” y “resource management, o en español “modelación ambiental de vertimientos”, “QUAL2K”, etc. La búsqueda se efectuó en tres bases de datos académicas especializadas Scopus, Web of Science y Google Scholar reconocidas por su alto nivel de fiabilidad y por reunir publicaciones revisadas por pares. El periodo de búsqueda comprendió los años 2010 a 2024, con el propósito de incluir investigaciones recientes que reflejaran los avances metodológicos y las aplicaciones más relevantes del modelo QUAL2K. Asimismo, se consultaron repositorios institucionales, informes técnicos y tesis universitarias, los cuales aportaron información valiosa para contextualizar el uso del modelo en entornos internacionales, locales y nacionales. Posteriormente, se realizó un proceso de filtrado y depuración mediante la revisión de títulos, resúmenes y palabras clave, seleccionando únicamente los documentos que respondían a los criterios de pertinencia temática, rigurosidad metodológica y relación directa con la implementación de QUAL2K en la simulación de la calidad del agua.

Marco referencial teórico

El presente marco teórico, tiene como referencias relevantes aspectos relacionados con la calidad del agua, la modelación ambiental y la aplicación del modelo QUAL2K.

El modelo QUAL2K se fundamenta en una estructura matemática que describe los procesos de transporte y transformación de sustancias en sistemas lóticos. Su formulación central se basa en la ecuación unidimensional de advección–dispersión, la cual permite representar el movimiento longitudinal de los distintos constituyentes de la calidad del agua. Esta ecuación integra simultáneamente los efectos del transporte por corriente, la mezcla por dispersión y los procesos biogeoquímicos asociados a cada parámetro modelado. (Chapra, 2012)

En términos generales, QUAL2K resuelve la siguiente expresión:

Ecuación unidimensional de advección–dispersión utilizada en QUAL2K.

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -u \frac{\partial C}{\partial x} + E \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + S(C)$$

Autor Chapra, Pelletier y Tao (2012).

donde C corresponde a la concentración del constituyente, u a la velocidad media del flujo, E al coeficiente de dispersión y S(C) al conjunto de reacciones internas que pueden actuar como fuentes o sumideros. (Chapra, 2012)

Las reacciones químicas y biológicas incorporadas en el modelo se describen por medio de cinéticas de primer y segundo orden. Entre ellas destacan el decaimiento de la demanda bioquímica de oxígeno, los procesos de nitrificación, la respiración y fotosíntesis algal, así como otras interacciones que afectan directamente la concentración de oxígeno disuelto. Este último se estima mediante un balance entre procesos de reaireación atmosférica y consumos o aportes biológicos, considerando además la influencia de la temperatura sobre su saturación. (WEAP, s.f.)

Asimismo, QUAL2K incluye ecuaciones específicas para el comportamiento térmico del agua, el crecimiento algal (basado en funciones de tipo Monod), y el ciclo del nitrógeno y del fósforo, integrando procesos de asimilación, sedimentación, mineralización y transformación entre formas orgánicas e inorgánicas. El modelo también contempla intercambios con el sedimento, como la demanda de oxígeno bentónica y la liberación o retención de nutrientes en el fondo. (Ministry of Water Resources, s.f.).

Finalmente, la resolución numérica del modelo se realiza mediante esquemas de discretización espacial de tipo volúmenes finitos, que dividen el curso del río en segmentos. Esta estructura permite integrar temporalmente las ecuaciones diferenciales y obtener una representación estable y coherente del comportamiento de la calidad del agua bajo diferentes condiciones hidrológicas y ambientales. (Chapra, 2012).

Diversos autores coinciden en que la calidad del agua está determinada por la interacción de factores físicos, químicos y biológicos que reflejan las condiciones de los ecosistemas acuáticos. Bajo esta perspectiva, los estudios examinados implementaron el modelo QUAL2K para analizar variables como el oxígeno disuelto (OD), la demanda bioquímica de oxígeno (DBO_5) y la concentración de nutrientes, parámetros esenciales para identificar los niveles de contaminación y los procesos de autodepuración presentes en los cuerpos hídricos.

- Modelamiento

El modelamiento según Loucks y van Beek (2017) señalan que es una herramienta que permite representar y predecir el comportamiento de un fenómeno real mediante ecuaciones y relaciones matemáticas. A través de los modelos, es posible analizar sistemas complejos, simplificarlos y comprender sus respuestas frente a diferentes condiciones.

Un modelo integra variables, parámetros e hipótesis que describen procesos naturales y cuya validez se determina al comparar sus resultados con datos observados.

Modelamiento de calidad del agua

El Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (2018) define el modelamiento de la calidad del agua como la simulación matemática de los procesos de transporte, transformación y degradación de sustancias en cuerpos de agua. Su principal objetivo es

determinar la capacidad de asimilación y autodepuración de un río o quebrada frente a cargas contaminantes.

Estos modelos constituyen instrumentos fundamentales para la planificación y administración del recurso hídrico, ya que permiten evaluar escenarios futuros, priorizar proyectos de saneamiento y definir estrategias de control de la contaminación.

- Modelo QUAL2K

El Departamento de Ecología del Estado de Washington (Washington State Department of Ecology, 2008a) define el modelo (Q2K) como una versión actualizada del modelo QUAL2E, desarrollado originalmente por el Dr. Steven C. Chapra en la Universidad de Tufts y distribuido por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA)

- Temperatura

La temperatura del agua es un factor determinante en la dinámica de los ecosistemas acuáticos, pues regula la solubilidad del oxígeno y la velocidad de las reacciones químicas y biológicas según Boyd (1990) y Caissie (2006). El QUAL2K considera el balance térmico entre la atmósfera y el cuerpo de agua, incluyendo flujos de calor por radiación solar, evaporación, convección y conducción (Chapra, Pelletier, & Tao, 2008).

- Caudal

El caudal del río constituye una de las variables más relevantes en la simulación hidrodinámica y de calidad del agua realizada con el modelo QUAL2K. Según Chapra, Pelletier y Tao (2008), el caudal controla parámetros hidráulicos como la velocidad de flujo, la profundidad y el tiempo de viaje, que a su vez determinan la capacidad de transporte y dispersión de los contaminantes, así como los procesos de reaeración. En la misma línea, Pelletier, Chapra y Tao (2006) destacan que el caudal de cabecera y los aportes laterales conforman la base del balance hídrico del modelo, del cual dependen las condiciones de oxígeno disuelto, nutrientes y temperatura simuladas.

- Velocidad del viento

En QUAL2K, la estimación de la velocidad del viento se utiliza en combinación con parámetros empíricos para calcular los coeficientes de reiteración, permitiendo representar de manera más realista los procesos de autodepuración natural de un río o quebrada (Pelletier & Chapra, 2008). Por ello, contar con datos confiables de velocidad del viento en el área de estudio es esencial para la calibración y validación del modelo.

- Humedad

La humedad relativa es un parámetro climático que influye en los procesos de intercambio de calor y masa entre la atmósfera y los cuerpos de agua superficiales. En modelos de calidad del agua como QUAL2K, esta variable es relevante porque forma parte de los cálculos asociados al balance térmico, especialmente en lo referente a la evaporación y condensación. Estos procesos afectan directamente la temperatura del agua, variable clave en la determinación de la solubilidad del oxígeno disuelto (OD) y en la cinética de las reacciones bioquímicas que ocurren en los ecosistemas acuáticos (Chapra, 1997).

Cuando la humedad relativa es baja, la evaporación se intensifica, favoreciendo la pérdida de calor del agua y alterando su temperatura. En contraste, cuando la humedad relativa es alta, la tasa de evaporación disminuye, lo que puede generar condiciones de menor enfriamiento en el cuerpo de agua.

- Radiación Solar

En QUAL2K, la radiación solar es una de las variables climáticas de entrada fundamentales, utilizada tanto para el submodelo térmico como para el de oxígeno disuelto. Gracias a ella, es posible representar de manera más realista fenómenos como la estratificación térmica, el ciclo diario de oxígeno disuelto y la variabilidad estacional en la calidad del agua (Pelletier & Chapra, 2008). Investigaciones en Latinoamérica también han destacado el papel de la radiación solar en la dinámica de los embalses.

- Nitritos y nitratos

Son compuestos inorgánicos que hacen parte del ciclo del nitrógeno y representan fases intermedias de la oxidación biológica del amoníaco en los ecosistemas acuáticos.

El nitrato constituye la forma más oxidada y estable del nitrógeno en ambientes acuáticos oxigenados. Sin embargo, cuando su concentración es elevada, se convierte en un contaminante de importancia ambiental y sanitaria. Según la World Health Organization (2017), niveles de nitratos superiores a 10 mg/L de N-NO_3^- pueden ocasionar problemas de salud como la metahemoglobinemia en lactantes, además de contribuir al fenómeno de eutrofización, que reduce el oxígeno disuelto y altera la biota acuática.

El modelo QUAL2K representa estos procesos mediante ecuaciones cinéticas que describen la nitrificación y la desnitrificación. La nitrificación es un proceso aeróbico dependiente de la temperatura, el pH y la concentración de oxígeno disuelto; mientras que la desnitrificación es un proceso anaeróbico, donde los nitratos se reducen a gases como N_2 o N_2O , liberados a la atmósfera (Chapra, 1997).

- Fosforo

El fósforo es considerado el principal nutriente limitante en ecosistemas de agua dulce. Cuando se encuentra en exceso, promueve procesos de eutrofización caracterizados por proliferación algal, reducción del oxígeno disuelto y deterioro de la biodiversidad.

En el modelo QUAL2K, el fósforo se incorpora como variable de estado que se divide en fracciones de fósforo disuelto y fósforo particulado. El software simula su transporte, transformación y disponibilidad para el crecimiento de algas, considerando procesos como la sedimentación, la mineralización y la asimilación biológica (Chapra, 2008).

- Metales

Según (Alloway, 2013) dice que los metales en sistemas acuáticos comprenden elementos traza como plomo (Pb), cadmio (Cd), mercurio (Hg), arsénico (As), zinc (Zn) y cobre (Cu), entre otros. Estos pueden encontrarse en formas disueltas, particuladas con materia orgánica y carbonatos. Su presencia proviene tanto de procesos naturales, como la meteorización de

rocas, como de fuentes antrópicas, entre ellas descargas industriales, lixiviados mineros y aguas residuales urbanas.

El modelo QUAL2K fue diseñado principalmente para simular oxígeno, carbono, nutrientes (nitrógeno y fósforo) y algas. Sin embargo, su estructura es flexible y permite la inclusión de otros constituyentes como metales, los cuales pueden representarse como contaminantes conservativos (sin transformación química significativa, solo transporte y dilución) o no conservativos (cuando participan en procesos de sorción y precipitación) (Chapra, 2008).

- Minerales

Desde el punto de vista ambiental, los minerales ejercen un rol regulador en los ecosistemas acuáticos. Por ejemplo, los carbonatos y bicarbonatos controlan la alcalinidad y la capacidad amortiguadora del agua, mientras que el calcio y el magnesio inciden en la dureza y en la disponibilidad de nutrientes para organismos acuáticos. (Chapra, 1997).

El modelo QUAL2K, aunque fue diseñado principalmente para simular oxígeno disuelto, materia orgánica y nutrientes (nitrógeno y fósforo), también permite representar minerales en la fracción de sólidos disueltos o como constituyentes conservativos, que se transportan y diluyen en el sistema sin sufrir transformaciones químicas significativas (Chapra, 2008).

- Tiempo de retención

El tiempo de retención hidráulico (o tiempo de residencia) es un parámetro fundamental en la hidrodinámica y la calidad del agua, ya que describe el período promedio que una masa de agua permanece en un tramo de río antes de salir del sistema. Se calcula generalmente como el cociente entre el volumen de agua del sistema y el caudal de salida, lo que refleja la capacidad del cuerpo de agua para renovar o diluir contaminantes (Wetzel, 2001).

El modelo QUAL2K incorpora el tiempo de retención mediante la formulación de sus ecuaciones de transporte basadas en el esquema de advección–dispersión. Este modelo matemático integra dos procesos hidrodinámicos fundamentales en ríos: la advección, asociada al transporte del constituyente por la corriente, y la dispersión longitudinal, responsable de la mezcla a través del gradiente de velocidades. La combinación de estos

procesos permite representar el tiempo de retención y la evolución espacial de las concentraciones a lo largo del tramo modelado.

En QUAL2K, cada reach o segmento del río se conceptualiza como un reactor hidráulico de mezcla completa (CSTR), lo cual facilita la aproximación del comportamiento del flujo y de las sustancias presentes en él. Bajo esta representación, el tiempo de retención se obtiene a partir de la relación entre la longitud del tramo, el caudal y la velocidad media del flujo. Este parámetro es fundamental para cuantificar la escala temporal de los procesos de autodepuración y para evaluar su influencia en la dinámica del oxígeno, los nutrientes y los contaminantes conservativos y no conservativos (Chapra, 2008).

- Dispersión

El modelo de dispersión en QUAL2K describe cómo los contaminantes y demás sustancias se mezclan y se distribuyen longitudinalmente a lo largo de un río. Al ser un modelo unidimensional, asume que cada tramo está completamente mezclado en sentido lateral y vertical, de modo que las variaciones relevantes ocurren únicamente a lo largo del eje longitudinal del cauce (Chapra et al., 2008). Dentro de este esquema, la dispersión longitudinal se integra con la advección el transporte generado por la velocidad media del flujo para conformar la ecuación general de advección–dispersión, que constituye la base del modelo y que se expresa como:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} = D_L \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + S$$

Donde, C indica la concentración del constituyente, u corresponde a la velocidad promedio del flujo, D_L se refiere al coeficiente de dispersión longitudinal, y S engloba las fuentes y sumideros asociados con procesos físicos, químicos y biológicos (Chapra, 2008).

El coeficiente de dispersión longitudinal D_L resume los efectos combinados de la turbulencia, las variaciones de velocidad y la geometría del canal, determinando la rapidez con la que un contaminante se atenúa y a medida que avanza río abajo (Sukhodolov, 2012). QUAL2K permite especificar este coeficiente directamente en cada tramo o estimarlo mediante

ecuaciones empíricas basadas en variables hidráulicas como la velocidad, el ancho y la profundidad del flujo. Una formulación común, empleada como aproximación inicial en estudios de campo, es:

$$D_L = \alpha u H$$

En este contexto, H representa la profundidad hidráulica y α es un coeficiente empírico ajustable que depende de las características del canal (Chapra, 2008).

Sin embargo, estos métodos proporcionan únicamente estimaciones preliminares; en la práctica, la dispersión se calibra ajustando D_L hasta reproducir datos observados, siendo los ensayos con trazadores la referencia más confiable (Chapra, 2008).

La aplicación del coeficiente de dispersión se realiza entre cada par de segmentos, por lo que la longitud asignada a los reaches influye directamente en el valor efectivo requerido: tramos extensos suelen exigir coeficientes mayores para reproducir la mezcla real del sistema fluvial (Chapra et al., 2008). Además, debido a que QUAL2K trabaja bajo condiciones hidráulicas estacionarias (*steady-state*), la dispersión estimada representa condiciones promedio de caudal, no eventos transitorios rápidos en consecuencia, suele ajustarse para diferentes estados hidrológicos relevantes (Chapra, 2008).

En los cuerpos lóticos, la dispersión describe el proceso mediante el cual una sustancia deja de concentrarse en un punto y se distribuye progresivamente río abajo. Este fenómeno resulta de la interacción entre la advección del flujo y la mezcla turbulenta generada por gradientes de velocidad, rugosidad, y variaciones en la geometría del cauce (Sukhodolov, 2012). QUAL2K incorpora este comportamiento mediante el coeficiente de dispersión longitudinal, el cual determina el intercambio de masa entre tramos consecutivos, valores altos indican una mezcla rápida y una mayor atenuación, mientras que valores bajos generarán nubes de contaminante más definidas y persistentes.

- Pendiente Hidráulica

Según el autor (Chow, 1959) la pendiente del cauce es un parámetro hidrológico e hidráulico esencial en el análisis de ríos y arroyos, ya que determina la energía disponible para el flujo, la velocidad del agua y, en consecuencia, la capacidad de transporte de sedimentos y contaminantes. Su magnitud condiciona el régimen hidráulico del río: cauces con alta pendiente presentan corrientes rápidas y turbulentas, mientras que en tramos de baja pendiente predominan flujos más lentos y con mayor retención.

En términos de calidad de agua, la pendiente influye en la oxigenación natural, la dispersión y el tiempo de retención de los constituyentes. Ríos con pendientes pronunciadas suelen tener mayor capacidad de reaeración debido a la turbulencia generada, lo que favorece el aumento del oxígeno disuelto (Thomann & Mueller, 1987).

Para el modelo QUAL2K, la pendiente constituye un parámetro clave, ya que, junto con la rugosidad del cauce y el caudal, permite calcular la velocidad del flujo mediante ecuaciones como la de Manning. Esta velocidad, a su vez, es determinante en la representación de procesos de transporte (advección y dispersión) y en el cálculo del tiempo de retención en cada tramo del río (Chapra, 2008).

- Criterios de desempeño

Cuando se habla de criterios de desempeño en el modelado de calidad del agua; se hace referencia a la capacidad del modelo para representar la realidad, y en este sentido resulta fundamental tener en cuenta el contexto, es decir, el tipo de problema a resolver, la incertidumbre, como criterio que orienta la confiabilidad y reduce la duda de lo pronosticado, además, de la disponibilidad de datos para definir la capacidad de simulación.

El reconocido científico Daniel Moriasi, especializado en hidrología y calidad del agua; ampliamente citado en el campo de la evaluación de modelos hidrológicos por sus métodos e investigaciones, establece que, los criterios de desempeño en el modelado de calidad de agua se refieren a los indicadores utilizados para evaluar la capacidad del modelo de reproducir adecuadamente las condiciones observadas en un sistema fluvial. Estos criterios

permiten medir la confiabilidad del modelo QUAL2K en términos de ajuste estadístico, estabilidad numérica y utilidad en la toma de decisiones ambientales (Moriasi et al., 2007). Para el QUAL2K, estos criterios se aplican durante las fases de calibración y validación para garantizar que las simulaciones representen adecuadamente la dinámica de variables clave como oxígeno disuelto, demanda bioquímica de oxígeno, nitrógeno y fósforo (Chapra, 2008).

- Funcionamiento y programas similares de modelación

Los modelos de calidad del agua similares a QUAL2K como QUAL2E, WASP, MIKE 11, CE-QUAL-W2 y HEC-RAS QW. Se basan en los mismos principios hidrodinámicos y biogeoquímicos para simular cómo el agua y los contaminantes se mueven, se mezclan y reaccionan dentro de un río.

Estos programas incluyen un módulo hidrodinámico que representa el caudal, la velocidad, la profundidad y, en algunos casos, la temperatura del flujo, utilizando aproximaciones unidimensionales (QUAL2K, QUAL2E, MIKE 11, HEC-RAS QW) o multidimensionales en 2D o 3D (WASP acoplado con hidrodinámica o CE-QUAL-W2). También incorporan el transporte por advección y dispersión, donde la advección moviliza los constituyentes siguiendo la velocidad del flujo y la dispersión representa la mezcla longitudinal generada por turbulencia, rugosidad y variaciones geométricas del cauce; este proceso se describe mediante la ecuación general de advección–dispersión–reacción

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_L \frac{\partial C}{\partial x} \right) + R(C)$$

Que todos estos modelos resuelven con variaciones metodológicas según su complejidad (Chapra, 2008; Chapra et al., 2008, 2012). Los programas integran además módulos de calidad del agua que simulan procesos como degradación de materia orgánica, oxigenación, fotosíntesis, nitrificación, dinámica de nutrientes, sedimentos y tóxicos, siendo WASP y MIKE 11 los más avanzados en este tipo de cinéticas, mientras que QUAL2K mantiene un enfoque más simple orientado a ríos en estado cuasi estacionario con variación diel. Finalmente, todos permiten incorporar cargas puntuales y difusas, así como dividir el río en segmentos donde se calcula el intercambio hidráulico y las reacciones internas, lo que hace

que estos modelos compartan una estructura conceptual común para predecir la calidad del agua bajo diferentes escenarios naturales o de contaminación (EPA, s. f.; Pelletier et al., 2006; HEC-RAS, s. f.).

- Configuración del modelo QUAL2K

En la pestaña Configuración del modelo, QUAL2K reúne los modelos de advección, dispersión, reacción que permiten comprender y simular cómo se comportan los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos a lo largo del río. Estos modelos constituyen la base matemática del software y hacen posible representar, de manera simplificada pero precisa, cómo se mueven y transforman los contaminantes en un sistema fluvial.

Estos modelos parten del principio de conservación de la masa e incorporan tres procesos clave. El primero es la advección, que explica el desplazamiento de las sustancias siguiendo la corriente del río, siendo el mecanismo principal que arrastra los contaminantes aguas abajo. El segundo es la dispersión, que refleja la mezcla natural que ocurre debido a la turbulencia y a las variaciones del cauce. Por último, la reacción agrupa todos los procesos fisicoquímicos y biológicos que modifican internamente la concentración de los parámetros evaluados.

Desde esta pestaña, el usuario puede ajustar parámetros hidráulicos fundamentales como el caudal, la velocidad del flujo, la forma de la sección transversal y el coeficiente de dispersión y también definir las constantes cinéticas y tasas de reacción asociadas a cada variable.

Análisis de datos

Finalmente, se sintetizaron los principales hallazgos con el propósito de destacar los aportes más relevantes del uso y manejo del modelo QUAL2K en la modelación ambiental de vertimientos en cuerpos de agua. En esta etapa se recopilaron diversos estudios que evidencian las aplicaciones prácticas del modelo en procesos de simulación de la calidad del agua, resaltando su utilidad para el monitoreo, la evaluación de impactos y la formulación de medidas preventivas que contribuyen a la gestión sostenible de los ecosistemas acuáticos.

El análisis de los artículos seleccionados permitió identificar las diferentes herramientas y enfoques empleados para la simulación de vertimientos en cuerpos de agua, destacándose la modelación hidrodinámica y la evaluación de la calidad del agua como métodos fundamentales para predecir y gestionar los impactos ambientales derivados de dichos vertimientos. Asimismo, se evidencia la importancia de las fuentes consultadas al mostrar cómo las tecnologías de modelación contribuyen al incremento de la eficiencia en la gestión de vertimientos, la reducción de riesgos de contaminación y la mitigación de los impactos ambientales sobre los ecosistemas acuáticos.

- En el marco del estudio *Using QUAL2Kw as a Decision Support Tool: Considerations for Data Collection, Calibration, and Numeric Nutrient Criteria*, evaluó el uso de QUAL2Kw como herramienta de apoyo a la toma de decisiones en cursos de agua sometidos a variaciones espaciales y temporales significativas, caracterizados por fluctuaciones de caudal y la presencia simultánea de aportes difusos y puntuales de nutrientes. En estos sistemas se analizaron parámetros clave como oxígeno disuelto, demanda bioquímica de oxígeno, nitrógeno total, fósforo total y temperatura, expresados en sus respectivas concentraciones para identificar los patrones de calidad del agua. Los resultados mostraron que los cuerpos de agua presentaban concentraciones elevadas de nutrientes y aumentos en la DBO, acompañados de episodios de reducción del OD, evidenciando condiciones de eutrofización moderada asociadas principalmente a fuentes urbanas y agrícolas. Asimismo, uno de los desafíos más relevantes identificados por Hobson fue la

limitada disponibilidad y calidad de los datos hidrológicos y fisicoquímicos, lo que dificultó la calibración del modelo y aumentó la incertidumbre en las simulaciones. Por ello, el autor resaltó la necesidad de implementar protocolos rigurosos de monitoreo y de emplear algoritmos genéticos para optimizar parámetros, con el fin de reducir la subjetividad del modelador y mejorar la robustez del proceso de calibración. Hobson (2013).

- En el estudio *Integration of SWAT and QUAL2K for Water Quality Modeling in a Data-Scarce Basin of the Cau River Basin in Vietnam*, aplicaron el modelo QUAL2K al río Cau, un cuerpo de agua sometido a una intensa presión antropogénica derivada de descargas domésticas, actividades agrícolas e industrias de procesamiento de alimentos. El sistema fue representado mediante 46 segmentos hidrológicos, en los cuales se monitorearon parámetros como temperatura, oxígeno disuelto, DBO, nitrógeno y fósforo totales, con el objetivo de evaluar la dinámica de la calidad del agua. Los resultados evidenciaron un estado ambiental deteriorado caracterizado por concentraciones elevadas de nutrientes y valores altos de DBO, acompañados de episodios recurrentes de bajo oxígeno disuelto, condiciones directamente asociadas a las principales fuentes de contaminación identificadas. El desafío más relevante del estudio fue la marcada escasez de datos hidrológicos y fisicoquímicos, lo que llevó a integrar el modelo SWAT para generar caudales y cargas contaminantes, reduciendo parcialmente la incertidumbre, pero demostrando la necesidad de fortalecer los sistemas locales de monitoreo. Bui al. (2019).
- En el estudio *Application of QUAL2Kw for Water Quality Modelling in the Tunggak River, Kuantan, Pahang, Malaysia*, aplicaron el modelo QUAL2Kw al río Tunggak, un sistema fuertemente influenciado por actividades industriales, agrícolas y residenciales que afectan de manera significativa su calidad del agua. Para caracterizar su comportamiento, se realizaron campañas de monitoreo en temporada seca y húmeda, midiendo parámetros como oxígeno disuelto, DBO, COD y nutrientes totales, información utilizada para calibrar y validar el modelo bajo diferentes condiciones hidrológicas. Los resultados mostraron un estado

ambiental crítico, con concentraciones persistentemente bajas de oxígeno disuelto y valores elevados de DBO y COD que superaban los estándares ambientales, especialmente en los tramos cercanos a descargas industriales y asentamientos humanos. Entre los desafíos principales se destacó la marcada variabilidad hidrológica estacional y la necesidad de integrar datos provenientes de múltiples fuentes para lograr una calibración confiable, pese a la limitada disponibilidad de información. Aun con estas dificultades, la modelación permitió identificar los sectores más afectados y proporcionar insumos técnicos clave para orientar medidas de mitigación y fortalecer la planificación ambiental. Hossain, Sujaul y Nasly (2014).

- En la investigación titulada Simulation of Water Environmental Capacity Río Hongqi (China) se analizó un tramo de 1,5 km de un afluente somero y de bajo caudal dentro de una cuenca altamente eutrofizada, cuyas características físicas pequeñas profundidades, velocidades reducidas y mezcla prácticamente completa en la sección favorecen la acumulación y persistencia de nutrientes. La calidad del agua se encuentra comprometida por descargas domésticas, contaminación agrícola difusa y escorrentía urbana, fuentes que elevan parámetros como COD_{cr}, NH₃-N, TN y TP por encima de los estándares ambientales (NH₃-N > 1 mg/L, TN > 3 mg/L, COD_{cr} > 30 mg/L). Para caracterizar el sistema, se evaluaron temperatura, oxígeno disuelto, COD_{cr}, NH₃-N, NO₃-N, nitrógeno y fósforo totales en cinco estaciones distribuidas a lo largo del cauce. El estudio aplicó el modelo QUAL2K, sustentado en la ecuación general de advección–dispersión–reacción:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \sum R(C)$$

donde los términos de reacción incluyen la oxidación de materia orgánica, nitrificación, desnitrificación, procesos de sedimentación y transformaciones biogeoquímicas del fósforo. Durante la calibración se ajustaron parámetros como la tasa de oxidación, nitrificación, desnitrificación, reaeración, deposición de fósforo y el coeficiente de dispersión; mientras que la validación empleó un conjunto independiente de datos para comparar las concentraciones simuladas y observadas de

oxígeno disuelto, NH₃-N, COD_{Cr} y nutrientes. Los resultados mostraron un desempeño adecuado del modelo en la mayoría de los parámetros, salvo para el fósforo total, cuya dinámica compleja generó un ajuste menos preciso.

- En el estudio Surface Water Assessment with QUAL2KW – Cuenca Maroon–Jarahi (Irán) se evaluó un sistema fluvial de gran extensión ($\approx 3\,824\text{ km}^2$) caracterizado por marcadas variaciones estacionales, caudales reducidos durante la época seca y la influencia de múltiples descargas puntuales y difusas que deterioran la calidad del agua, especialmente en los sectores cercanos a zonas urbanas y drenajes agrícolas. Las actividades humanas efluentes municipales, descargas industriales y retornos de riego incrementan sustancialmente parámetros como la demanda bioquímica de oxígeno (BOD), con picos superiores a 110 mg/L en descargas directas, la conductividad eléctrica (EC), con valores mayores a 1500 $\mu\text{S/cm}$ en drenajes agrícolas, así como las concentraciones de nutrientes y sólidos disueltos totales. En el modelado se incluyeron variables como temperatura del agua, oxígeno disuelto (DO), demanda bioquímica de oxígeno (BOD), nutrientes (N y P) y conductividad eléctrica (EC), cuantificadas por tramo y estación.

QUAL2KW aplica la formulación general de advección–dispersión–reacción bajo condiciones casi estacionarias, resolviendo balances de masa y energía para simular los procesos de transporte y transformación de los constituyentes. La calibración combinó ajustes manuales con algoritmos genéticos, optimizando parámetros como las tasas de oxidación de BOD, procesos del ciclo del nitrógeno, reaeración, así como aspectos hidráulicos como rugosidad, geometría de la sección y coeficiente de dispersión longitudinal. La validación utilizó indicadores estadísticos como el coeficiente de eficiencia NASH (0.82–0.96), RMSE y R² (superiores a 0.95 en varios puntos), evidenciando un comportamiento predictivo robusto y una adecuada capacidad del modelo para representar la calidad del agua en esta cuenca semiárida.

- En la investigación Application of QUAL2K in the Lower Diyala River (Irak) se modelaron 16.9 km del río Diyala dentro de Bagdad, un cuerpo de agua con baja capacidad de dilución en época seca y afectado por vertimientos urbanos. Las

principales presiones antrópicas provienen de las plantas de Rustimiyah, el Army Canal y múltiples descargas domésticas que elevan el CBOD (hasta 25 mg/L) y reducen el DO a niveles críticos (<4 mg/L), comprometiendo la autodepuración. Los parámetros analizados fueron oxígeno disuelto (DO), demanda bioquímica de oxígeno a 5 días convertida a CBODu (BOD5–CBODu), temperatura y características hidráulicas. QUAL2K se aplicó mediante la ecuación de advección–dispersión–reacción, simulando oxidación de CBODu, reaeración, sedimentación y mezcla unidimensional. La calibración por ensayo error ajustó tasas de oxidación, coeficientes de reaeración, dispersión y parámetros hidráulicos; mientras que la validación comparó concentraciones observadas y simuladas en distintos caudales. Los indicadores MAE y RMSE se ubicaron cerca de 0.3–0.5 mg/L para DO y 3–6 mg/L para CBODu, evidenciando un ajuste adecuado para un río urbano altamente variable.

- Simulation of Water Quality in Hilla River (Iraq) analiza un tramo urbano de 6.8 km del río Hilla, con anchos de 40–60 m y profundidades de 7–15 m, que recibe descargas domésticas y puntuales que incrementan el CBODu y modifican el DO. Aunque el caudal relativamente alto (90–150 m³/s) mantiene valores de DO entre 9.7 y 10.4 mg/L, las actividades humanas elevan localmente el CBODu (1.5–2.7 mg/L). El modelo QUAL2K se aplicó para simular las concentraciones de DO y CBODu mediante la ecuación de advección–dispersión–reacción, representando oxidación orgánica, dispersión longitudinal y reaeración. La calibración ajustó tasas de oxidación, coeficientes de dispersión y parámetros hidráulicos con un paso numérico reducido para estabilidad, y la validación empleó MAE y RMS (≈0.33–0.43 mg/L), mostrando concordancia entre valores observados y simulados, aunque restringida por datos disponibles solo para un mes.
- Assessment of Water Quality – Río Yamuna (India) aborda un tramo altamente contaminado del Yamuna en Delhi, un río con baja capacidad de dilución debido a caudales reducidos y fuerte presión urbana. La calidad se ve afectada por descargas domésticas, industriales y drenajes urbanos que elevan las concentraciones de BOD

por encima de los límites (en algunos puntos > 30 mg/L) y reducen el DO a valores mínimos, mostrando una autodepuración insuficiente. Se modelaron parámetros como DO, BOD, temperatura y pH, expresados en concentración para cada estación del tramo. El modelo QUAL2K se aplicó mediante la ecuación de advección–dispersión–reacción, simulando la oxidación rápida del BOD, la reaeración, la dispersión longitudinal y la mezcla completa. La sensibilidad resaltó la influencia de la tasa de oxidación del BOD y el volumen de las descargas, mientras que la calibración y validación se realizaron comparando directamente las concentraciones simuladas con las observadas, lo que permitió identificar los segmentos más críticos y comprobar la consistencia del modelo en escenarios de contaminación severa.

- Modelado de calidad de agua en ríos de montaña con impacto antrópico. Caso de estudio: Sierra Chica de Córdoba, Argentina (Formica, 2015) presenta la caracterización de los ríos Ceballos y Salsipuedes, sistemas serranos con caudales variables, fuerte pendiente y bajas concentraciones naturales de solutos dominados por bicarbonatos, calcio y magnesio derivados de la meteorización. Estas condiciones se ven alteradas por descargas domésticas sin tratamiento, aportes difusos y actividades recreativas, que elevan de forma significativa las concentraciones de materia orgánica y coliformes fecales. Se evaluaron parámetros como pH, conductividad, sólidos disueltos, alcalinidad, nutrientes y coliformes fecales utilizando QUAL2Kw. La calibración y validación requirieron ajustar el coeficiente de dispersión longitudinal, las constantes de decaimiento de coliformes, las tasas de degradación de materia orgánica y los coeficientes de aireación, hasta obtener una correspondencia adecuada entre los valores simulados y los medidos en campo. Los resultados evidenciaron aumentos abruptos de coliformes fecales y materia orgánica atribuibles a la influencia antrópica en estos ríos de montaña.
- En el estudio Integración de modelos hidrológicos y de calidad de agua para la gestión y optimización de cuencas mediterráneas (Blanco, 2010, Universidad Politécnica de Madrid CEIGRAM) analiza el acoplamiento entre modelos hidrológicos y herramientas de calidad del agua, entre ellas QUAL2K, como apoyo al análisis y la

planificación de cuencas mediterráneas. En los casos estudiados se identificó deterioro de la calidad del agua asociado a actividades humanas, evidenciado en concentraciones elevadas de nutrientes, incrementos de la DBO y episodios de bajos niveles de oxígeno, especialmente en zonas agrícolas intensivas, sectores urbanos y tramos con fuertes variaciones estacionales del caudal. La investigación también examinó los requerimientos de información, así como los procedimientos de calibración y optimización necesarios para representar adecuadamente diferentes escenarios de gestión. Como resultado, se estableció una metodología de integración aplicada a varios tramos hídricos, donde QUAL2K mostró buen desempeño en cursos de agua con dinámicas relativamente simples, aunque reveló limitaciones en sistemas más complejos y altamente variables.

- Aplicación del modelo de calidad de agua QUAL2K sobre un tramo del Río Seco en Paraíso, Tabasco (López Ortiz & Escobar, 2015) describe la implementación del modelo en un río de caudal bajo a medio con marcada influencia antrópica debido a descargas domésticas, actividades agrícolas y asentamientos cercanos que alteran su calidad. En este sistema se analizaron concentraciones de oxígeno disuelto, demanda bioquímica de oxígeno, nitrógeno y fósforo totales, parámetros que permitieron caracterizar su dinámica física y biogeoquímica. Los resultados mostraron un estado de calidad del agua comprometido, reflejado en valores reducidos de oxígeno disuelto y aumentos en la DBO y los nutrientes, especialmente en los puntos próximos a descargas locales, confirmando la presencia de focos de contaminación antropogénica. Aunque el modelo reprodujo adecuadamente las concentraciones observadas, se presentaron desafíos por la disponibilidad limitada de datos hidrológicos y de calidad del agua, además de la variabilidad temporal del sistema, factores que dificultaron la calibración fina de algunos parámetros. La modelación permitió identificar tramos críticos y generó insumos técnicos valiosos para orientar acciones de control y gestión ambiental en la zona.
- En el marco de Aplicación del modelo QUAL2K para el análisis del oxígeno disuelto y la autodepuración en el río Ubaté, Cundinamarca (Santamaría, 2017) analiza un

cuerpo de agua sometido a fuerte presión por vertimientos domésticos y actividades agropecuarias, factores que alteran su calidad y dificultan su capacidad natural de recuperación. Los parámetros evaluados incluyeron oxígeno disuelto, DBO₅, carga orgánica y variables hidrológicas básicas, fundamentales para comprender la respuesta del sistema frente a los aportes contaminantes. Los resultados evidenciaron un estado comprometido del río: el oxígeno disuelto disminuye notablemente en los tramos más impactados y, aunque se observa cierto proceso de autodepuración aguas abajo, este resulta insuficiente frente a las cargas actuales. Los principales desafíos del estudio estuvieron relacionados con la disponibilidad y consistencia de los datos de campo, la identificación precisa de las fuentes de contaminación y la calibración del modelo en un río con alta variabilidad, lo que exigió ajustes técnicos para obtener una representación confiable de la dinámica real.

- En el estudio Calibración e implementación del modelo QUAL2K para el diagnóstico y saneamiento ambiental en la microcuenca del río Bahamón, Cundinamarca (Gaitán, 2016) describe al río Bahamón como un cuerpo de agua rural con caudales bajos, alta susceptibilidad a la contaminación y una marcada influencia de actividades domésticas, agropecuarias y de mataderos. Se analizaron parámetros como oxígeno disuelto, DBO₅, nutrientes (nitrógeno y fósforo), sólidos suspendidos y variables hidrológicas asociadas al caudal y la velocidad del flujo, lo que permitió caracterizar el estado del sistema. Los resultados evidenciaron un deterioro significativo, especialmente en la quebrada Ocotá, donde las cargas orgánicas y los nutrientes superaron ampliamente los niveles aceptables, demostrando una capacidad de autodepuración limitada. Entre los principales desafíos se encontraron la variabilidad espacial de los vertimientos, la disponibilidad insuficiente de datos continuos para la calibración, las dificultades para caracterizar fuentes puntuales y difusas y la complejidad de ajustar el modelo en una microcuenca con presiones antrópicas heterogéneas.

- En Reutilización de las aguas residuales municipales como estrategia de prevención y control de la contaminación hídrica. Caso de estudio: Cuencas de los ríos Bolo y Frayle (Jaramillo & Cardona, 2019), los ríos Bolo y Frayle se caracterizan como cuerpos de agua sometidos a una fuerte presión antrópica, con caudales variables y presencia de descargas domésticas e industriales que afectan su capacidad de dilución. En estos sistemas se analizaron parámetros como oxígeno disuelto, DBO₅, caudal y cargas contaminantes, fundamentales para evaluar su comportamiento y determinar los tramos más impactados. Los resultados mostraron un estado ambiental deteriorado, evidenciado por valores elevados de DBO₅ y disminuciones significativas del oxígeno disuelto, especialmente en sectores con aportes sin tratamiento. Entre los principales desafíos del estudio se destacaron la variabilidad espacial y temporal de los vertimientos, la limitada disponibilidad de información de calidad del agua para la calibración y la complejidad de representar escenarios de reúso agrícola en un sistema con presiones antrópicas heterogéneas. Pese a ello, el modelo permitió identificar áreas críticas y evidenció que los escenarios de tratamiento y reúso podrían reducir sustancialmente la carga orgánica del sistema.
- En el contexto de la gestión de grandes ríos urbanos, Cely (2021) desarrolló un estudio para simular el comportamiento del río Magdalena en Barrancabermeja, un cuerpo de agua de gran caudal y alta capacidad de dilución. El análisis se centró en los parámetros de oxígeno disuelto (OD) y demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅), con el fin de evaluar el efecto de los vertimientos urbanos sobre su calidad. Los resultados muestran que, debido al caudal elevado, el río presenta condiciones favorables para la recuperación natural: el OD aumenta de 5,10 mg/L a 7,66 mg/L, y la DBO₅ disminuye desde 27,8 mg/L hasta valores cercanos a los iniciales. El estudio evidencia que el estado del cuerpo de agua se mantiene estable frente a las cargas contaminantes, aunque uno de los principales desafíos identificados fue representar adecuadamente la dinámica de un sistema fluvial de gran magnitud, donde la capacidad de mezcla y transporte influye fuertemente en la respuesta del modelo. Este aporte reafirma la utilidad de QUAL2K para analizar procesos de calidad en ríos de gran escala y apoyar la gestión ambiental urbana.

- En el estudio de análisis de ríos de montaña, Virgilio (2015) evaluó el comportamiento de la cuenca alta del río Chinchiná, un cuerpo de agua caracterizado por su pendiente pronunciada y alta capacidad de recambio. El estudio se centró en los parámetros de oxígeno disuelto (OD) y demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅) para analizar la cinética de oxidación y la remoción de materia orgánica mediante QUAL2K. Los resultados muestran que el modelo reprodujo adecuadamente la dinámica de autodepuración: el OD aumentó progresivamente aguas abajo y la DBO₅ disminuyó después de los puntos de vertimiento. Con base en estos valores, el estado del cuerpo de agua refleja una buena capacidad de recuperación natural; sin embargo, algunos tramos no alcanzaron los niveles mínimos de OD exigidos por la normativa, lo que evidencia vulnerabilidad frente a cargas contaminantes elevadas. Entre los desafíos del estudio, se destaca la representación de los procesos cinéticos en un sistema de montaña, donde la variabilidad hidráulica influye en la respuesta del modelo. Esta evaluación aporta elementos útiles para comprender la autodepuración y orientar acciones de gestión en ríos de alta pendiente.
- En el marco de la planificación del recurso hídrico, Castro Huertas (2015) analizó el río Guacaica, un cuerpo de agua que atraviesa una zona rural–urbana y que presenta afectaciones desde su nacimiento debido a actividades humanas. La aplicación de QUAL2Kw se centró en los parámetros de calidad del agua asociados a la presencia de contaminantes, especialmente aquellos reflejados en los tramos con mayores cargas provenientes de vertimientos locales y de un afluente con alta carga contaminante. De acuerdo con los resultados, el estado del río muestra un tramo crítico con niveles elevados de contaminación desde la parte alta y un incremento significativo en la zona donde recibe el afluente más degradado. Entre los desafíos del estudio se incluyen la identificación precisa de estos puntos críticos y la necesidad de evaluar cómo los diferentes escenarios de saneamiento influyen en la respuesta del sistema. La modelación permitió visualizar las variaciones de calidad y apoyar la definición de medidas de manejo.

- En el análisis realizado por Atencia y Verbel (2021), el río Sinú se caracteriza como un sistema de gran extensión y dinámica variable, influenciado por vertimientos domésticos y actividades informales que afectan su calidad. La aplicación conjunta de QUAL2K y EFDC Explorer se enfocó en los parámetros vinculados al oxígeno disuelto y a la presencia de contaminantes asociados a vertimientos, considerando además la variación del caudal en diferentes escenarios. De acuerdo con los resultados, el estado del agua muestra que, aunque el río posee capacidad natural de autodepuración, esta se ve comprometida en condiciones críticas, donde los niveles de oxígeno disuelto pueden superar los límites permitidos. Entre los desafíos del estudio se destacan la calibración de ambos modelos con datos de campo en un sistema hidrodinámicamente complejo y la simulación de escenarios con variaciones de caudal y descargas, lo que requirió un abordaje técnico detallado para representar adecuadamente la respuesta del río.

- En el trabajo de Salinas Tapia. (2019), el curso alto del río Lerma se describe como un sistema fluvial afectado por actividades agrícolas e industriales que influyen en la composición química del agua. Los parámetros analizados se centraron en las concentraciones de nitrógeno amoniacal (NH_4^+), nitritos y nitratos ($\text{NO}_2^- + \text{NO}_3^-$), evaluados para identificar la magnitud e impacto de las fuentes antrópicas presentes en distintos tramos del río. Los resultados mostraron que el estado del agua se ve comprometido en sectores específicos, donde el aumento de compuestos nitrogenados refleja la presión de descargas externas, confirmando la presencia de zonas con mayor vulnerabilidad a la contaminación. Entre los desafíos del estudio, se destacó la dependencia del modelo respecto a la precisión de los datos de entrada: las discrepancias entre valores simulados y observados en algunos puntos se atribuyeron a información tributaria limitada o poco precisa, lo que dificultó la calibración fina y evidenció la necesidad de contar con mediciones más completas para mejorar la representación del sistema.

- En el trabajo desarrollado por la Universidad de Chile (2016), el río Mapocho Alto se caracteriza como un sistema de alta montaña con fuerte variabilidad hidráulica y

térmica, donde las pendientes pronunciadas y los cambios en el régimen de caudales influyen directamente en la calidad del agua. Los parámetros analizados incluyeron principalmente el oxígeno disuelto y la temperatura, evaluados para entender cómo responde el río frente a descargas puntuales y variaciones hidrológicas. Los resultados mostraron que el estado del agua presenta sensibilidad ante cambios en las condiciones de caudal y en las cargas externas, evidenciándose variaciones notables en la concentración de oxígeno disuelto en tramos específicos del sistema. Entre los desafíos del estudio, se destacaron la necesidad de integrar adecuadamente la información hidráulica de HEC-RAS dentro de QUAL2Kw y la disponibilidad limitada de datos de campo para calibrar el comportamiento térmico e hidráulico del río, lo que exigió un ajuste cuidadoso para lograr representaciones confiables de la dinámica del Mapocho Alto.

- El estudio Integración de los modelos WEAP y QUAL2K para la simulación de cantidad y calidad de agua en la cuenca del río La Vieja, Colombia (Jaramillo y Galvis, 2018) evaluó el impacto de vertimientos domésticos y agroindustriales en este cuerpo de agua. El río La Vieja se caracteriza por una alta presión agrícola y urbana, y los autores analizaron parámetros como DBO₅, oxígeno disuelto, nutrientes, sólidos suspendidos y caudales. Los resultados mostraron que, en condiciones de referencia, el río cumplía con la normatividad colombiana, aunque se identificaron aumentos de DBO₅ y disminuciones de oxígeno disuelto aguas abajo de los vertimientos de Armenia y Pereira. El estudio evidenció zonas críticas en la cuenca y enfrentó desafíos como la disponibilidad de datos y la calibración conjunta de ambos modelos. Aun así, la integración WEAP–QUAL2K permitió una representación más completa del estado del río y apoyó la toma de decisiones para su gestión.
- El estudio Aplicación del modelo QUAL2K para la evaluación de la autodepuración del río Algodonal, Colombia (Angarita, 2019) evaluó la capacidad del río para recuperarse tras recibir vertimientos domésticos y agrícolas. El cuerpo de agua presenta disminuciones de oxígeno disuelto y aumentos de materia orgánica en varios tramos, lo que evidenció un deterioro inicial de su calidad. Los principales parámetros analizados fueron DBO₅, oxígeno disuelto y otros indicadores de carga orgánica. Tras

la calibración del modelo, QUAL2K reprodujo adecuadamente la dinámica del río y permitió simular escenarios de contaminación y recuperación. Los resultados mostraron aumentos de DBO₅ que incluso superan los límites normativos y reducciones importantes de oxígeno, indicando una autodepuración limitada frente a las cargas actuales. El estudio resalta el valor de QUAL2K como herramienta para diagnosticar el estado del río y orientar decisiones de gestión en cuencas con información restringida.

- El estudio Análisis de calidad de agua del río Chípalo por el vertimiento Santa Ana 1 y 2 utilizando el modelo QUAL2K (Cuellar & Lezama, 2017) evaluó el impacto de estos vertimientos sobre la calidad del agua en el tramo urbano del río. Los principales parámetros analizados fueron oxígeno disuelto y DBO, evidenciándose un deterioro progresivo: el oxígeno disminuyó de cerca de 7 mg/L a menos de 4 mg/L, mientras que la DBO alcanzó valores cercanos a 120 mg/L, reflejando alta carga orgánica. Las simulaciones mostraron que mayores caudales favorecen la dilución, mientras que en épocas de estiaje la contaminación se intensifica. El estudio destaca la utilidad de QUAL2K para comprender la dinámica de contaminación en ríos urbanos y orientar medidas de manejo como el control de vertimientos y el tratamiento de aguas residuales.
- La aplicación de técnicas de optimización mediante algoritmos genéticos para la calibración del modelo QUAL2K como aproximación a la modelación de la calidad del agua en los principales ríos de la zona urbana de Bogotá D. C. (Vera, 2017) tuvo como finalidad utilizar el algoritmo genético PIKAIA para optimizar la calibración de QUAL2K en los ríos Fucha, Salitre y Torca. Estos ríos presentan un fuerte deterioro ambiental, con bajos niveles de oxígeno disuelto y altas concentraciones de DBO y nutrientes como resultado de vertimientos domésticos e industriales. El uso de algoritmos genéticos permitió reducir los errores entre los datos simulados y observados, mejorando notablemente el desempeño del modelo. Este trabajo demuestra que QUAL2K puede adaptarse a contextos urbanos complejos y que su

integración con técnicas de inteligencia computacional fortalece su utilidad en la planificación y gestión del recurso hídrico.

- El modelo de calidad del agua para la descarga de aguas domésticas en aguas superficiales del canal Torca (Ángel, 2024) aplicó QUAL2K para evaluar el impacto de las descargas residuales y analizar la capacidad de autodepuración del río Bogotá frente a estas cargas. QUAL2K reprodujo adecuadamente el comportamiento del oxígeno disuelto y la DBO₅, evidenciando descensos críticos de OD en algunos puntos por debajo de 2 mg/L y aumentos de DBO₅ superiores a los límites normativos. Aunque se observaron procesos parciales de recuperación, estos resultaron insuficientes frente a la magnitud de las descargas. Este trabajo demuestra la utilidad de QUAL2K para proyectar escenarios de saneamiento, evaluar medidas de control de contaminación y priorizar acciones de gestión ambiental en ríos urbanos altamente impactados.
- La determinación de la capacidad de oxigenación y desoxigenación del río Fucha, Bogotá (Spitia, 2017) aplicó QUAL2K para evaluar estos procesos utilizando datos históricos y de campo de caudal, oxígeno disuelto y DBO₅. En el tramo alto, el río mantiene buenas condiciones de oxigenación por la pendiente y la reaeración; sin embargo, en los tramos medio y bajo el oxígeno disuelto cae a valores cercanos a 0 mg/L y la DBO₅ supera los 200 mg/L, reflejando una capacidad de recuperación limitada frente a vertimientos domésticos e industriales. Este trabajo evidencia la utilidad de QUAL2K para identificar puntos críticos de contaminación y aportar insumos técnicos para la gestión ambiental y la recuperación de ríos urbanos altamente degradados.
- La modelación de la calidad del agua del Humedal Córdoba mediante el uso de QUAL2K y su potencial para la mejora del ecosistema (Beltrán, 2019) aplicó QUAL2K para evaluar la calidad del agua del humedal y de sus canales aferentes, un sistema urbano altamente presionado por conexiones erradas al alcantarillado. Se analizaron parámetros como oxígeno disuelto, DBO y cargas orgánicas, esenciales para caracterizar su estado ecológico. Los resultados mostraron que el humedal

presenta condiciones deterioradas en escenarios de baja corrección del sistema, mientras que implementar el PICCE en un 60 % mejora el oxígeno disuelto por encima de 4,5 mg/L y reduce la DBO, indicando una recuperación parcial del cuerpo de agua. La simulación del 100 % de correcciones proyecta condiciones óptimas, aunque con altos requerimientos técnicos y financieros. El trabajo evidencia la utilidad de QUAL2K para identificar puntos críticos, evaluar escenarios de saneamiento y apoyar decisiones de gestión en humedales urbanos.

- El estado del recurso hídrico en la cuenca del río Bogotá, en términos de calidad y cantidad (CAR, 2020) aplicó QUAL2Kw para evaluar los nueve tramos de la cuenca, un sistema fuertemente presionado por descargas urbanas, industriales y aportes de afluentes contaminados. Se analizaron parámetros como DBO₅, oxígeno disuelto y sólidos suspendidos totales (SST), fundamentales para caracterizar la condición del río. Los resultados evidenciaron que varios sectores, especialmente en la cuenca media, presentan altos niveles de DBO₅ y SST, reflejando un estado crítico del cuerpo hídrico. Los escenarios proyectados considerando la operación de PTAR mostraron disminuciones significativas de DBO₅ y SST y una recuperación parcial del oxígeno disuelto, aunque tramos como Tibitoc–Soacha continúan sin cumplir los estándares de calidad. Entre los desafíos del estudio se destacó la integración de información hidrológica y de calidad para toda la cuenca y la calibración de un modelo extenso y heterogéneo. El trabajo confirma la utilidad de QUAL2Kw para evaluar tendencias, definir metas de reducción de cargas y apoyar la planificación hídrica regional.

- La modelación dinámica de la calidad del agua del río Bogotá (González & Forero, 2019) aplicó QUAL2K para analizar la evolución espacial y temporal de parámetros como oxígeno disuelto, DBO₅ y SST en un sistema altamente intervenido por descargas urbanas e industriales. El río muestra buenas condiciones en la cuenca alta; sin embargo, en la cuenca media (Bogotá–Soacha) se registran aumentos de DBO₅ y SST y descensos críticos de oxígeno disuelto, evidenciando un estado degradado del cuerpo hídrico. Los escenarios que consideraron la entrada en operación de las PTAR Salitre y Canoas mostraron mejoras importantes, aunque algunos tramos, como el río

Tunjuelo, continúan sin cumplir los estándares de calidad. Entre los desafíos se destacó la representación de la alta variabilidad espacial y temporal del río y la calibración de múltiples puntos de descarga. Este trabajo demuestra la utilidad de QUAL2K para identificar zonas críticas y apoyar la planificación ambiental regional.

- La determinación de la influencia de los factores hidrodinámicos y de calidad del agua en la demanda béntica de la cuenca del río Bogotá (Mateus, 2019) implementó y calibró QUAL2K para analizar la dinámica del oxígeno disuelto, la DBO y la capacidad de autodepuración en un sistema altamente afectado por vertimientos domésticos e industriales. El río presentó varios tramos con OD por debajo de los valores normativos y DBO por encima de los límites, mostrando un estado crítico y una capacidad natural de recuperación insuficiente frente a las cargas actuales. Los escenarios simulados indicaron que reducir vertimientos y ampliar el tratamiento de aguas residuales es esencial para mejorar la calidad del agua. Entre los desafíos del estudio se destacó la representación de procesos hidrodinámicos complejos y la calibración en una cuenca con múltiples fuentes de contaminación. El trabajo evidencia la utilidad de QUAL2K para diagnosticar el estado de la cuenca y orientar decisiones de manejo y recuperación del río Bogotá.
- La implementación de modelos de calidad del agua en 1D y 2D con determinantes convencionales de contaminación en un tramo de la subcuenca alta del río Bogotá (Alvarado, 2022) comparó el desempeño de modelos unidimensionales (WASP) y bidimensionales (IBER) para simular la dinámica de contaminantes en un tramo del río, caracterizado por variaciones de caudal y aportes locales de carga orgánica. Se analizaron parámetros como oxígeno disuelto, DBO y nutrientes, esenciales para evaluar el estado del cuerpo hídrico. WASP mostró un buen ajuste en los perfiles longitudinales, similar a QUAL2K, siendo adecuado para diagnósticos regionales; mientras que IBER permitió identificar variaciones transversales y zonas de acumulación de contaminantes gracias a su mayor detalle espacial. El estudio evidenció que los modelos 1D requieren menos datos y recursos, pero los 2D ofrecen mayor precisión en tramos complejos. Entre los desafíos se destacó la integración de

información hidrodinámica detallada. Este trabajo confirma que QUAL2K sigue siendo una herramienta estratégica para la planificación hídrica.

- El estudio Evaluación de la afectación del río Bogotá causada por el vertimiento generado en un proceso de curtido de pieles, tramo Villapinzón Río Tejar (Soto Moya, 2018) evaluó el impacto de los vertimientos industriales mediante QUAL2K. El tramo analizado corresponde a un curso de agua con caudal medio y alta presión industrial. Se monitorearon quince variables, destacando OD, DBO5, fósforo, nitratos, sulfuros, cromo y SST. Se evidenciaron en los resultados mostraron un estado crítico del cuerpo de agua el OD presentó descensos severos y varios parámetros superaron ampliamente los límites normativos, especialmente nitratos (474 %) y DBO5 (200 %). La presencia de cromo y sulfuros evidenció afectación directa a la biota.

Entre los desafíos del estudio estuvieron la variabilidad de los vertimientos de curtiembres y la dificultad para caracterizar sustancias químicas complejas. En mi opinión, el trabajo confirma que QUAL2K es útil para evaluar impactos industriales y apoyar la toma de decisiones en gestión ambiental.

- El estudio Acompañamiento al área técnica de campo en la implementación del software QUAL2K para el laboratorio Quimicontrol Ltda. (Aldana, 2017) aplicó QUAL2K para evaluar la calidad del agua del río Fucha, un cuerpo de agua urbano con caudal moderado y alta presión por descargas domésticas e industriales. Se recopilaron datos de DBO5, oxígeno disuelto (OD), SST y nutrientes para calibrar el modelo. Los resultados mostraron un estado crítico, con DBO5 por encima de la norma y OD reducido en varios tramos, lo que evidencia baja capacidad de autodepuración. La simulación de escenarios con reducción de vertimientos indicó mejoras parciales en el OD y la carga orgánica. Entre los desafíos del estudio estuvieron la variabilidad de los vertimientos y la disponibilidad limitada de datos continuos. En mi opinión, QUAL2K demostró ser una herramienta útil para identificar tramos críticos y proyectar acciones de recuperación del río Fucha.

- Se evaluó la calidad del agua en el tramo urbano del río Yamuna en Delhi (entre Wazirabad y Okhla), un sector fuertemente presionado por descargas domésticas e industriales. Se analizaron parámetros clave como temperatura, oxígeno disuelto (DO), demanda bioquímica de oxígeno (BOD) y pH, considerando el caudal reducido y las múltiples descargas puntuales que caracterizan este cuerpo de agua. Los resultados mostraron un estado severamente degradado, con BOD muy por encima de los límites permitidos y DO en niveles críticos, evidenciando que la autodepuración natural es insuficiente para enfrentar la carga orgánica acumulada. El trabajo también identificó factores sensibles del sistema como la tasa de oxidación del BOD, el volumen de los vertimientos y la baja capacidad hidráulica del tramo que complicaron la modelación y explican la persistencia de la contaminación. En conjunto, los hallazgos resaltan la utilidad de QUAL2K para diagnosticar puntos críticos y orientar estrategias de manejo, especialmente en ríos urbanos altamente impactados.
- El estudio analiza la calidad del agua del río Keelung, un cuerpo de agua influenciado por mareas y afectado por descargas urbanas e industriales, empleando una integración entre QUAL2K y HEC-RAS para representar adecuadamente su dinámica hidráulica. Se evaluaron parámetros como BOD, oxígeno disuelto (DO), amonio, fósforo total y demanda de oxígeno en sedimentos (SOD), con el fin de caracterizar los procesos de degradación asociados a las cargas orgánicas y nutrientes. Los resultados mostraron un estado deteriorado, donde el BOD fue el parámetro más determinante en la disminución del DO, afectando la calidad del agua en varios tramos. También se identificaron limitaciones derivadas del uso de QUAL2K en condiciones de marea, ya que su estructura unidimensional y en estado estacionario no representa completamente la variabilidad hidrodinámica del sistema, por lo que fue necesario complementarlo con HEC-RAS para mejorar la representación del flujo. En conjunto, el estudio evidencia la utilidad de integrar modelos para ríos con comportamientos complejos y la necesidad de contar con datos hidrológicos y fisicoquímicos de mayor resolución temporal.

- Se aplicó QUAL2K para simular la calidad del agua en el Hongqi, un afluente altamente contaminado de la cuenca del lago Taihu en China, caracterizado por fuertes presiones antrópicas y descargas urbanas e industriales asociadas al rápido desarrollo socioeconómico de la región. Se analizaron parámetros clave de calidad del agua como demanda bioquímica de oxígeno (BOD), amonio ($\text{NH}_3\text{-N}$), nitrógeno total (TN) y fósforo total (TP), fundamentales para evaluar la carga orgánica y de nutrientes en el río. Los resultados indicaron un estado degradado del cuerpo de agua bajo condiciones actuales y mostraron que diferentes combinaciones de tecnologías de tratamiento (oxidación biológica, camas flotantes ecológicas y eco-beds móviles) pueden reducir significativamente BOD, $\text{NH}_3\text{-N}$, TN y TP, destacando un escenario óptimo que alcanzó reducciones de 49,5 %, 32,8 %, 35,9 % y 45,3 %, respectivamente, para estos parámetros. Entre los desafíos del estudio se incluyeron la calibración del modelo mediante ensayo y error con datos escasos y la necesidad de evaluar múltiples escenarios de gestión para seleccionar opciones eficientes que cumplan objetivos de calidad. En conjunto, el trabajo demuestra que QUAL2K es una herramienta eficaz para comparar y seleccionar programas de mejora de la calidad del agua en cuencas con presiones contaminantes significativas.
- Se evaluó la calidad del agua del río Buriganga, un cuerpo de agua urbano altamente presionado que atraviesa Dhaka y recibe descargas industriales, residuos domésticos, efluentes de curtidurías, mataderos y drenajes mixtos, lo que ha reducido drásticamente su capacidad de autodepuración. Se analizaron parámetros fisicoquímicos críticos como oxígeno disuelto (DO), demanda bioquímica de oxígeno (BOD5), demanda química de oxígeno (COD), nitrógeno amoniacal, pH y sólidos suspendidos, que permiten caracterizar la carga orgánica y la presión contaminante sobre el río. Los resultados mostraron un estado severamente degradado, con DO entre 0.5 y 3.5 mg/L y BOD5 entre 27.5 y 129.7 mg/L, valores muy por encima de los límites normativos y que evidencian un ecosistema colapsado. La aplicación de QUAL2K permitió simular la distribución longitudinal de los contaminantes, identificar los tramos más afectados y estimar la contribución relativa de las distintas

fuentes de vertimiento. Entre los desafíos del estudio destacaron la representación de múltiples cargas puntuales y difusas en un río altamente variable, así como la calibración del modelo con datos espaciales limitados. Los hallazgos confirmaron que la calidad del agua del Buriganga es crítica y que QUAL2K resulta útil para diagnosticar puntos críticos y apoyar la formulación de estrategias de control y saneamiento.

- Se evaluó la calidad del agua del río Langat, un cuerpo de agua afectado por descargas domésticas, industriales y agrícolas que reducen su capacidad de autodepuración. Se analizaron parámetros clave como DO, BOD, COD, $\text{NH}_3\text{-N}$, TSS y pH en tres estaciones, mostrando un estado de contaminación moderada a alta, con WQI en rangos de Clase III y IV. Con estos datos se calibró QUAL2K, identificando los tramos más degradados y simulando la incorporación de una planta de tratamiento, que evidenció mejoras potenciales en la calidad del agua. El estudio enfrentó desafíos por la variabilidad de las fuentes contaminantes y la disponibilidad limitada de datos, pero confirmó la utilidad de QUAL2K para diagnosticar condiciones críticas y apoyar la planificación de medidas de saneamiento en el río Langat.
- El documento describe a QUAL2K como un modelo unidimensional para ríos que divide el cauce en segmentos con mezcla completa vertical y lateral, permitiendo representar condiciones hidráulicas básicas como caudal, velocidad y profundidad. El sistema simula parámetros esenciales de calidad del agua, incluyendo oxígeno disuelto, BOD rápido y lento, nutrientes (amonio, nitratos y fósforo), algas, temperatura, pH y sedimentos, integrando procesos biogeoquímicos y meteorológicos que determinan la dinámica del río. Aunque el modelo facilita evaluar el efecto de distintas cargas contaminantes y diagnosticar la respuesta del cuerpo de agua, enfrenta desafíos importantes: requiere datos de entrada detallados para cada tramo, asume flujo estacionario que no captura eventos transitorios, y su desempeño depende de una calibración rigurosa, lo que limita su precisión cuando la información de campo es escasa.

- El estudio analiza la calidad del agua en los ríos Tocuy, Maracas y Calenturitas afluentes del río Cesar en Colombia afectados por actividades urbanas, agrícolas y mineras. Se realizaron campañas de muestreo para medir parámetros como oxígeno disuelto, DBO, sólidos y nutrientes, información usada para calibrar QUAL2K en cada subcuenca. El modelo reprodujo razonablemente los patrones observados y permitió localizar los tramos más deteriorados, donde la carga orgánica y los sólidos suspendidos superan los niveles deseables. Entre las principales dificultades se identificaron la escasa disponibilidad de datos hidrológicos, la estacionalidad marcada y la presencia de múltiples vertimientos dispersos. Aun así, QUAL2K mostró ser útil para evaluar escenarios de manejo, evidenciando dónde se requieren mejoras en tratamiento, control de descargas y fortalecimiento del monitoreo ambiental.

- El artículo evalúa la calidad del agua y la capacidad de asimilación del río Citarum en Karawang mediante muestreos en seis estaciones y modelación con QUAL2K. Los resultados evidencian concentraciones de BOD por encima del estándar (Clase II), con tramos puntualmente muy contaminados debido a descargas domésticas, industriales y agrícolas. Tras calibrar el modelo, se estimaron las cargas máximas diarias, mostrando que el río soporta 4 416,6 kg/día de BOD en condiciones actuales, pero solo 545,3 kg/día bajo caudal mínimo, lo que revela una capacidad asimilativa limitada en épocas de estiaje. El estudio identifica los segmentos más críticos y resalta dificultades comunes: datos hidrológicos escasos, fuentes difusas y variabilidad del caudal. Aun así, QUAL2K permitió cuantificar reducciones necesarias y orientar medidas como el control de descargas puntuales, mejoras en tratamiento y un monitoreo más robusto.

- El trabajo aplica QUAL2K para evaluar la calidad del agua del río Kine-Vars, un curso pequeño y de caudal limitado en una cuenca agrícola del noroeste de Irán, caracterizado por aportes difusos de nutrientes, ausencia de tratamiento de aguas residuales y descargas domésticas rurales. Se analizaron parámetros clave DO, BOD, nitrógeno total, fósforo total y sus fracciones en siete estaciones durante épocas húmedas y secas. Los resultados mostraron un estado eutrófico, con el río saturado

en nitrógeno y fósforo y con valores de DO que en varios tramos no cumplen el mínimo de 4 mg/L. El estudio enfrentó desafíos asociados a la escasez de datos hidrológicos, la alta incertidumbre en la estimación de fuentes difusas agrícolas y la sensibilidad del sistema a la variación estacional del caudal. Aun así, el modelo permitió estimar reducciones necesarias de carga (76 % de N y 93 % de P) y evidenciar que la autodepuración es insuficiente sin medidas adicionales de control.

- Se compararon los modelos QUAL2E y QUAL2K para evaluar la calidad del agua en la cuenca del río Iguaçu, un sistema con múltiples vertimientos urbanos e industriales y presiones sobre su régimen hidrológico. El análisis consideró variables típicas de calidad del agua y las diferencias conceptuales entre ambos modelos, destacando cómo QUAL2K incorpora procesos más detallados de degradación de materia orgánica que pueden reflejar mejores escenarios de contaminación sostenida. Los autores advierten que, aunque QUAL2E y QUAL2K comparten fundamentos, sus supuestos y alcances difieren, lo que puede generar variaciones significativas en la estimación de cargas contaminantes y en la representación de la capacidad de autodepuración de las aguas. Entre las limitaciones del estudio se mencionan la necesidad de datos precisos y calibración cuidadosa, así como la incertidumbre al aplicar modelos desarrollados para climas templados en contextos tropicales o altamente modificados. En conjunto, el artículo invita a usar modelos actualizados como QUAL2K con cautela, considerando las particularidades del sistema evaluado y las limitaciones de datos.

- El estudio analiza la calidad del agua del canal Mahmoudia en Egipto mediante el modelo QUAL2K y el índice de contaminación RPI para evaluar su estado estacional y simular escenarios de manejo. Los autores realizaron muestreos mensuales en seis estaciones durante 2010–2011, midiendo DO, BOD₅, TSS, amonio y conductividad, parámetros que luego se usaron para calibrar el modelo. Los resultados muestran que el canal recibe agua de baja calidad desde el brazo Rosetta y aportes adicionales del drenaje Rahawy y del canal El-Khandak El-Sharki, generando incrementos de BOD₅ y NH₄ en otoño e invierno y clasificando el agua como moderadamente contaminada

en varias plantas de tratamiento. Las simulaciones evidenciaron que reactivar la estación de bombeo Edko empeora la calidad, mientras que controlar o tratar las cargas del drenaje Rahawy mejora significativamente los parámetros, especialmente DO, y reduce el RPI a categorías de agua no contaminada o levemente contaminada en la mayor parte del canal. En conjunto, el trabajo demuestra que QUAL2K permite evaluar las variaciones estacionales, identificar los tramos críticos y apoyar decisiones para el manejo hídrico en el canal Mahmoudia.

- El estudio Waste Water Discharge Impact Modeling with QUAL2K aplicó el modelo QUAL2K para evaluar el impacto de descargas de aguas residuales sobre la calidad del agua en una cuenca urbana, utilizando datos de caudal y parámetros de calidad como oxígeno disuelto, DBO y nutrientes para calibrar el modelo. Los resultados permitieron identificar tramos críticos con deterioro ambiental y simular escenarios de manejo que reducen las cargas contaminantes, evidenciando mejoras en los parámetros de calidad del agua. El trabajo demuestra que QUAL2K es una herramienta útil para la planificación ambiental y la toma de decisiones en cuencas urbanas, ya que facilita diagnosticar el estado actual, evaluar alternativas de gestión y cuantificar los beneficios de estrategias de saneamiento, aunque su precisión depende de datos de entrada detallados y calibración rigurosa, y puede estar limitada por la suposición de flujo estacionario.
- El estudio sobre la calibración del modelo QUAL2K versión 2.07 evaluó cómo las descargas domésticas de los municipios de Bucaramanga, Floridablanca y Girón afectan la calidad del agua del río Frío, en Santander, Colombia. Para ello se utilizaron datos hidrogeométricos, caudales, oxígeno disuelto, carbono, nitrógeno y variables meteorológicas, y se realizó la calibración del modelo mediante algoritmos Monte Carlo y el método GLUE para minimizar errores en los parámetros. Los resultados mostraron que las cargas orgánicas incrementan los niveles de carbono y nitrógeno, afectando el oxígeno disuelto y evidenciando un deterioro en la calidad del agua. El trabajo demuestra que QUAL2K, correctamente calibrado, constituye una herramienta confiable para diagnosticar impactos de vertimientos domésticos y

apoyar la planificación y gestión ambiental en cuencas con cargas orgánicas significativas (Ávila Angulo, Rivera, & Amaya, 2014).

- El marco de investigación de Gallegos Coria (2024) modeló la calidad del agua del Río Querétaro en el municipio de El Marqués (Querétaro, México) aplicando el modelo QUAL2K, calibrado y validado con datos de campo de temporadas de lluvia y poslluvia para parámetros como oxígeno disuelto, sólidos suspendidos, DBO, DQO, amonio, nitrato, fosfato, E. coli, conductividad, pH y temperatura; los resultados permitieron simular escenarios favorables y desfavorables de calidad del agua, evidenciando que el incremento de concentraciones contaminantes tiene un impacto negativo que el río no puede asimilar, mientras que la implementación de un escenario de saneamiento mejora la calidad del recurso hídrico, lo que demuestra la utilidad de QUAL2K como herramienta para evaluar impactos de fuentes antropogénicas y apoyar la gestión ambiental en cuencas con múltiples presiones contaminantes (Gallegos Coria, 2024).
- En su estudio, López Adriano (2025) empleó el modelo QUAL2K para simular la calidad del agua en la parte baja del río Maguazo con el fin de generar insumos técnicos que permitan una gestión sostenible del recurso hídrico; para ello integró datos de campo de variables fisicoquímicas y fluviales para calibrar y validar el modelo, identificando tramos críticos afectados por cargas orgánicas y otros contaminantes, y evaluando escenarios de manejo que evidenciaron mejoras potenciales en los indicadores de calidad del agua, demostrando así que QUAL2K es una herramienta útil para diagnosticar condiciones actuales y apoyar la planificación ambiental en cuencas con presiones antropogénicas (López Adriano, 2025).
- En su trabajo, Fonseca (2008) ajustó el modelo QUAL2K para simular y analizar la calidad del agua del Ribeirão Claro (Brasil), calibrándolo principalmente con variables como oxígeno disuelto (OD) y demanda bioquímica de oxígeno (DBO) a partir de datos observados y utilizados para evaluar diferentes escenarios, entre ellos la hipotética implementación de una planta de tratamiento, cambios en captaciones y variaciones en las descargas de efluentes; los resultados mostraron que el modelo

logró un buen ajuste para OD y uno razonable para DBO, lo que permitió reproducir condiciones de calidad del agua bajo distintos escenarios y evidenciar la utilidad de QUAL2K como herramienta para apoyar la gestión de recursos hídricos y la toma de decisiones ambientales en cuencas con presiones antropogénicas (Fonseca, 2008).

- En el estudio sobre la calidad del río Zarrinehroud (Irán), Jalalzadeh, Rabieifar, Vosoughifar, Razmkhah y Fataei (2020) utilizaron el modelo QUAL2K para evaluar las condiciones del agua a lo largo de un tramo de 57,5 km, calibrando el modelo con datos de caudal, oxígeno disuelto y demanda bioquímica de oxígeno, y demostraron que las descargas provenientes de mataderos, fábricas de azúcar y drenajes urbanos, rurales y agrícolas modifican significativamente los parámetros de calidad aguas abajo del embalse regulador; aunque el río mostró una buena capacidad de auto-purificación con niveles de oxígeno disuelto y BOD en rangos adecuados, el modelo tuvo un ajuste sólido para la mayoría de los parámetros, revelando cómo los vertimientos antropogénicos afectan la calidad del agua y subrayando la utilidad de QUAL2K para diagnosticar condiciones ambientales y apoyar la gestión hídrica en cuencas influenciadas por múltiples fuentes de contaminación (Jalalzadeh et al., 2020).

Conclusión

La revisión bibliográfica desarrollada permitió evidenciar que el modelo QUAL2K se consolida como una herramienta esencial en la evaluación y gestión de la calidad del recurso hídrico, debido a su capacidad para integrar de manera coherente los procesos físicos, químicos y biológicos que influyen en el comportamiento de los contaminantes presentes en los cuerpos de agua. Su estructura metodológica y numérica facilita el análisis de la dinámica hídrica, brindando una base científica sólida para el diseño de estrategias orientadas a la conservación, control de vertimientos y recuperación de ecosistemas acuáticos.

Del mismo modo, el examen de las investigaciones revisadas demuestra que QUAL2K ha sido aplicado con éxito en diversos contextos nacionales e internacionales, obteniendo resultados favorables en la simulación de escenarios de contaminación, así como en la evaluación del oxígeno disuelto, la demanda bioquímica de oxígeno y los nutrientes. Dichas aplicaciones confirman su efectividad como herramienta de apoyo para la toma de decisiones ambientales, al permitir comparar alternativas de manejo y analizar los efectos de diferentes estrategias de tratamiento y mitigación de impactos.

Los modelos como el QUAL2K, se convierten en una herramienta fundamental en la toma de decisiones de una gestión ambiental eficiente y efectiva, porque facilita la planificación del recurso hídrico, permite evaluar los impactos que afectan un ecosistema acuático, define escenarios, establece estándares y límites ambientales orientados a garantizar la salud pública y proteger un recurso vital.

No obstante, se identificaron limitaciones técnicas y operativas asociadas al uso del modelo. Su desempeño depende en gran medida de la disponibilidad y calidad de los datos de entrada, así como de la correcta calibración y validación de los parámetros involucrados. Además, su enfoque unidimensional restringe su aplicabilidad en cuerpos de agua con comportamientos más complejos, lo que plantea la necesidad de complementar su implementación con modelos hidrodinámicos o sistemas de simulación de mayor resolución espacial.

Las limitaciones más relevantes, de los modelos de calidad del agua como el QUAL2K; centran su discusión en aspectos culturales, políticos, técnicos y económicos, entre los que se destaca la complejidad de su implementación por costos y tiempo; la resistencia al cambio por la falta de conciencia, pedagogía o comprensión de nuevos métodos y las dificultades para definir y evaluar el alcance por la inestabilidad del marco normativo, la excesiva burocracia y la ausencia de una visión prospectiva de los gobernantes.

En el caso colombiano, el modelo QUAL2K ha mostrado resultados consistentes y confiables, consolidándose como una herramienta práctica y accesible para la gestión integral del recurso hídrico. Su uso en cuencas como la del río Bogotá, La Vieja y otras de condiciones similares ha fortalecido los procesos de monitoreo, control y planificación ambiental. En este sentido, su incorporación en los estudios de modelación constituye un aporte significativo para el desarrollo de estrategias sostenibles orientadas a la recuperación, preservación y uso racional de los cuerpos de agua en el país.

Referencias

Aldana Cárdenas, Y. N. (2017). Modelación de la calidad del agua del río Fucha mediante QUAL2K [Trabajo de grado, Universidad Distrital Francisco José de Caldas]. Repositorio Institucional Universidad Distrital.

Alvarado Alfonso, C. A. (2022). Implementación de modelos de calidad del agua en 1D y 2D para un tramo del río Bogotá [Trabajo de grado, Universidad Santo Tomás]. Repositorio Institucional Universidad Santo Tomás.

Ángel, D. (2024). Modelo de calidad del agua para la descarga de aguas residuales en el río Bogotá mediante el uso del programa QUAL2K [Trabajo de grado, Universidad de América]. Repositorio Institucional Universidad de América de Colombia.

Angarita, W. (2019). Determinación del grado de autodepuración del río Algodonal mediante la utilización del modelo QUAL2K [Trabajo de grado, Universidad de Manizales]. Repositorio Institucional Universidad de Manizales.

Atencia Osorio, M. C., & Verbel Escobar, M. (2021). Modelación hidrodinámica y de la calidad del agua para evaluar la capacidad de asimilación de vertimientos del río Sinú (tramo Sierra Chiquita – Universidad de Córdoba) [Trabajo de grado, Universidad de Córdoba]. Universidad de Córdoba.

Al-Maliki, L. A., & Al-Fatlawi, A. M. (2023). Application of QUAL2K model for simulating water quality in Hilla River, Iraq. *Iraqi Journal of Civil Engineering*, 17(2), 1–12.

Al-Sudani, A. H., & Al-Zubaidi, A. S. (2019). Application of QUAL2K for water quality modeling and management in the lower reach of the Diyala River. *Journal of Engineering*, 25(3), 78–95.

Ashrafi, S., Kamgar, S., & Kiani, A. (2022). Quality management of Zarrineh Rud river for agricultural irrigation using QUAL2K simulation model. *Journal of Environmental Engineering and Landscape Management*, 30(2), 305–318. <https://doi.org/10.3846/jeelm.2022.16442>

Ávila Angulo, M. A., Rivera, J. V., & Amaya, C. A. (2014). Calibración del modelo Qual2K V2.07 en la evaluación del impacto de cargas orgánicas en el río Frío, Santander, Colombia. Proceedings of the 12th Latin American and Caribbean Conference for Engineering and Technology (LACCEI'2014), Guayaquil, Ecuador. <https://www.laccei.org/LACCEI2014-Guayaquil/RefereedPapers/RP139.pdf>

Beltrán Rodríguez, N. A. (2019). Modelación de la calidad del agua del humedal Córdoba y sus canales aferentes mediante la aplicación del programa QUAL2K [Trabajo de grado, Universidad Santo Tomás]. Repositorio Institucional Universidad Santo Tomás.

Bidault, O. (2016). WaterLogic. ¿Qué factores determinan la calidad del agua? <https://www.waterlogic.es/blog/que-factores-determinan-la-calidad-del-agua/>

Blanco, I. (2010). Integración de modelos hidrológicos y de calidad de agua para la gestión y optimización de cuencas mediterráneas [Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Madrid]. CEIGRAM. https://ceigram.upm.es/wp-content/uploads/2024/12/2010_TD_Blanco_I.pdf

Boyd, C. E. (2020). *Water quality: An introduction* (3rd ed.). Springer.

Bracho Vargas, L., Angulo Argote, L., & Díaz Muegue, L. (2016). Evaluación del software QUAL2K en fuentes receptoras de vertimientos de residuos líquidos en algunos puntos del río Cesar (Colombia) impactados por actividad minera. *Multiciencias*, 16(1), 5–13

Brown, L. C., & Barnwell, T. O. (1987). *The enhanced stream water quality models QUAL2E and QUAL2E-UNCAS: Documentation and user manual*. U.S. Environmental Protection Agency.

Bui, H. H., Ha, N. H., Nguyen, T. N. D., Nguyen, A. T., Pham, T. T. H., Kandasamy, J., & Nguyen, T. V. (2019). Integration of SWAT and QUAL2K for water quality modeling in a data scarce basin of Cau River basin in Vietnam. *Ecohydrology & Hydrobiology*, 19(2), 210–223. <https://doi.org/10.1016/j.ecohyd.2019.03.005>

Caissie, D. (2006). The thermal regime of rivers: A review. *Freshwater Biology*, 51(8), 1389–1406. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2427.2006.01597.x>

Castro Huertas, M. A. (2015). Aplicación del QUAL2Kw en la modelación de la calidad del agua del río Guacaica, departamento de Caldas, Colombia [Trabajo de grado, Universidad Nacional de Colombia].

Cely, N. (2021). Un modelo matemático para la simulación del río Magdalena en el tramo urbano de Barrancabermeja mediante el programa QUAL2K [Trabajo de grado, Universidad Industrial de Santander]. Repositorio Institucional Universidad Industrial de Santander.

Chapra, S. C. (1997). *Surface water-quality modeling*. Waveland Press.

Chang W. (2024). A study on water quality from Langat River Selangor using QUAL2K. *Journal of Technology and Life*, 8(1), 219–230.

Chapra, S. C., Pelletier, G. J., & Tao, H. (2008). *QUAL2K: A modeling framework for simulating river and stream water quality (Version 2.11)*. U.S. Environmental Protection Agency.

Chapra, S. C., Pelletier, G. J., & Tao, H. (2008). *QUAL2K: A modeling framework for simulating river and stream water quality (Version 2.11): Documentation and user's manual*. Civil and Environmental Engineering Dept., Tufts University.

Chapra, S. C., Pelletier, G. J., & Tao, H. (2012). *QUAL2K: A modeling framework for simulating river and stream water quality (Version 2.12): Documentation and user's manual*. Tufts University.

Chow, V. T. (1959). *Open-channel hydraulics*. McGraw-Hill.

Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca – CAR. (2020). Estado del recurso hídrico en la cuenca del río Bogotá en términos de calidad y cantidad. Montaje del modelo QUAL2Kw [Informe técnico]. Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca.

Cuéllar, A. F., & Lezama, J. F. (2022). Análisis de calidad de agua del río Chipalo por el vertimiento Santa Ana 1 y 2 utilizando el modelo QUAL2K. *Iteckne*, 19(1). <https://doi.org/10.15332/iteckne.v19i1.2630>

Elsayed, E. A. (2014). Using QUAL2K Model and river pollution index for water quality management in Mahmoudia canal, Egypt. *Journal of Natural Resources and Development*, 4, 54–63. <https://doi.org/10.5027/jnrd.v4i0.08>

Formica, S. M. (2015). Modelado de calidad de agua en ríos de montaña con impacto antrópico. Universidad Nacional de Córdoba.

Fischer, H. B., List, E. J., Koh, R. C. Y., Imberger, J., & Brooks, N. H. (1979). *Mixing in inland and coastal waters*. Academic Press.

Fan, C., Ko, C., & Wang, W. (2009). An innovative modeling approach using QUAL2K and HEC-RAS integration to assess the impact of tidal effect on river water quality simulation. *Journal of Environmental Management*, 90(5), 1824–1832. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2008.11.011>

Fonseca, W. C. (2008). Ajuste do modelo QUAL2K e simulação de cenários para o Ribeirão Claro (Trabalho de conclusão de curso). Universidade Estadual Paulista, Instituto de Geociências e Ciências Exatas. <https://repositorio.unesp.br/bitstreams/c631bf19-7ebe-4e44-99f4-8f6997ceb84c/download>

Gallegos Coria, A. d. C. (2024). Modelación de la calidad del agua en el Río Querétaro en el municipio de El Marqués utilizando QUAL2K (Tesis de maestría). Universidad Autónoma de Querétaro. <https://ri-ng.uaq.mx/bitstream/123456789/10928/1/IGMAC-311339%20%28PDF-A%29.pdf>

Gaitán, M. (2016). Modelación de la calidad del agua de la microcuenca del río Bahamón con el programa de la Agencia de Protección Ambiental (EPA) QUAL2K [Trabajo de grado, Universidad El Bosque]. Repositorio Institucional Universidad El Bosque.

González López, J. C., & Forero Forero, L. F. (2019). Dinámica de calidad del agua del río Bogotá mediante simulación con el modelo QUAL2K [Trabajo de grado, Universidad Distrital Francisco José de Caldas]. Repositorio Institucional Universidad Distrital.

IDEAM. (2018). Protocolo de modelación hidrológica e hidráulica. <https://doi.org/978-958-5489-09-7>

HEC-RAS, Water Quality User's Manual. U.S. Army Corps of Engineers. (s. f.). Documentación del modelo hidráulico y de calidad de agua. Recuperado de <https://www.hec.usace.army.mil/software/hecras/documentation.aspx/documentation/documentation/HEC-RAS%20User%27s%20Manual-v6.4.1.pdf>

Hajjigholizadeh, M., Melesse, A. M., & Ghorbani, B. (2016). Surface water resources assessment and planning with the QUAL2KW model: A case study of the Maroon and Jarahi Basin, Iran. *Water*, 8(5), 206. <https://doi.org/10.3390/w8050206>

Jaramillo, M. F., Galvis, A., Escobar, M., Forni, L., Purkey, D., Siebel, J., Lozano, G., Rodríguez, C., Castaño, J., & Sabas, C. (2018). 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. *Aqua-LAC*, 8(2), 14–24.

Jalalzadeh, A., Rabieifar, H., Vosoughifar, H., Razmkhah, A., & Fataei, E. (2020). *Quality assessment of Zarrinehroud River using Qual2k simulation model. Journal of Health*, 11(3), 384–396. <https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/93305012/article-1-2239-en-libre.pdf?1667121202>

Jaramillo, J., & Cardona, L. (2019). Reutilización de las aguas residuales municipales como estrategia de prevención y control de la contaminación hídrica: Caso de estudio: Cuencas de los ríos Bolo y Frayle (Colombia). *Revista de Ingeniería Ambiental*, 12(3), 45-58. <https://doi.org/xxxx>

Ji, Z. G. (2008). *Hydrodynamics and water quality: Modeling rivers, lakes, and estuaries*. Wiley-Interscience. <https://doi.org/10.1002/9780470241066>

Kim, B., & Kim, Y. (2006). Application of a water quality model to the Geum River, Korea. *Water Science and Technology*. <https://doi.org/10.2166/wst.2006.0023>

Knapik, H. G., Scapulatempo Fernandes, C. V., Pickbrenner, K., & Porto, M. F. A. do (2011). Qualidade da água da bacia do rio Iguaçú: Diferenças conceituais entre os modelos QUAL2E e QUAL2K. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 16(2), 75–88. <http://dx.doi.org/10.21168/rbrh.v16n2.p75-88>

Ledesma, C., Bonansea, M., Rodríguez, C., & Sánchez, A. (2013). Calidad del agua en el embalse Río Tercero (Argentina) utilizando sistemas de información geográfica y modelos lineales de regresión. *Revista Ambiente & Agua*, 8, 67–76. <https://doi.org/10.4136/1980-993X>

Loucks, D., & van Beek, E. (2017). *Water resource systems planning and management*. UNESCO. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-44234-1>

López Ortiz, A., & Escobar, M. (2015). *Aplicación del modelo de calidad de agua QUAL2K sobre un tramo del Río Seco en el municipio de Paraíso, Tabasco*. Instituto Tecnológico de la Zona Olmeca.

López Adriano, K. P. (2025). Modelación de la calidad de agua en la parte baja del río Maguazo aplicando el software QUAL2K para una gestión sostenible del recurso hídrico (Trabajo de grado). Universidad Nacional de Chimborazo. <https://dspace.unach.edu.ec/handle/51000/14758>

Mateus García, S. I. (2019). Determinación de la influencia de los factores hidrodinámicos y de calidad del agua en la demanda béntica de la Cuenca alta del río Bogotá (Tesis de Maestría). Universidad Nacional de Colombia. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/10235>

Mehrasbi, M. R., & Farahmand Kia, Z. (2015). Water quality modeling and evaluation of nutrient control strategies using QUAL2K in the small rivers: A case study of the Kine-Vars River, Iran. *Journal of Human, Environment and Health Promotion*, 1(1), 1–11.

Metcalf & Eddy. (2014). *Wastewater engineering: Treatment and resource recovery* (5th ed.). McGraw-Hill Education.

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2018). *Guía nacional de modelación del recurso hídrico para aguas superficiales continentales*.

Nakhaei, N., Yazdi, M. S., & Ahmad, R. (2010). Waste Water Discharge Impact Modeling with QUAL2K, Application to Environmental Planning in an Urban Watershed. *International Congress on Environmental Modelling and Software (iEMSs)*. <https://scholarsarchive.byu.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=2220&context=iemssconference>

Omer, N. H. (2019). *Water quality parameters – Science, assessments and policy*. IntechOpen. <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.89657>

Park, S. S., & Lee, Y. S. (2002). A water quality modeling study of the Nakdong River, Korea. *Ecological Modelling*, 152(1), 65–75. [https://doi.org/10.1016/S0304-3800\(01\)00443-5](https://doi.org/10.1016/S0304-3800(01)00443-5)

Pelletier, G. J., & Chapra, S. C. (2008). *QUAL2K: A modeling framework for simulating river and stream water quality, Version 2.11. Documentation and user manual*. Civil and Environmental Engineering Dept., Tufts University & U.S. EPA.

Pelletier, G. J., Chapra, S. C., & Tao, H. (2006). QUAL2Kw – A framework for modeling water quality in streams and rivers using a genetic algorithm for calibration. *Environmental Modelling & Software*, 21(3), 419–425. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2005.07.002>

Permana, R. P., & Supriatna, J. (2022). *Kajian beban pencemaran harian di Sungai Citarum menggunakan pemodelan QUAL2K: Studi kasus Sungai Citarum segmen Kota Karawang*. *Jurnal Teknologi Lingkungan*, 23(2), 108–119.

PNUMA. (2023). Informe Anual 2022. Nairobi: Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente. Recuperado de <https://www.unep.org/es/resources/informe-anual-2022>

Rojas, H. A. (2021). La radiación solar y la calidad del agua en el embalse de Yacretá. Reportes Científicos De La FACEN.

Salinas Tapia, H., Flores Gutiérrez, L., García Aragón, J. A., Tejeda, S., & López Rebollar, B. (2019). Modelación del curso alto del río Lerma (CARL) utilizando QUAL2Kw. *Aqua-LAC*, 11(1), 76–91. <https://aqua-lac.org/index.php/Aqua-LAC/article/view/151>

Santamaría, F. (2017). Análisis simplificado de oxígeno disuelto en el río Ubaté por el modelo QUAL2K [Trabajo de grado, Escuela de Ingeniería]. Repositorio Institucional Escuela de Ingeniería.

Saha, S., Rahman, M. M., & Rahman, M. S. (2023). Water quality modelling and assessment of the Buriganga River using QUAL2K. *Environmental Engineering Journal*, 5(1), 51–60.

Soto Moya, S. M. (2018). Evaluación de la afectación del río Bogotá causada por el vertimiento generado en un proceso de curtido de pieles [Trabajo de grado, Universidad Santo Tomás]. Repositorio Institucional Universidad Santo Tomás.

Sukhodolov, A. (2012). Hydrodynamic modeling of mixing and transport in rivers: A review. *River Research and Applications*, 28(2), 163–185.

Espítia, S. P. (2017). Determinación de la capacidad de oxigenación y desoxigenación del Río Fucha, Bogotá (Trabajo de grado). Universidad Piloto de Colombia

Thomann, R. V., & Mueller, J. A. (1987). Principles of surface water quality modeling and control. Harper & Row.

Universidad de Chile. (2016). Modelación numérica de calidad de aguas en un río de alta montaña (Mapocho Alto) usando QUAL2Kw y acoplamiento con HEC-RAS [Tesis de maestría]. Repositorio Universidad de Chile. <http://repositorio.uchile.cl/>

Use of Qual2K Water Quality Model. (s.f.). WRDMAP – Ministry of Water Resources. https://assets.publishing.service.gov.uk/media/57ab01a9e5274a0f6c000058/AN1.5-Use_of_Qual2K_WQ_Model_rev02FINAL.pdf

Vera Puerto, I. L., & Lara Borrero, J. A. (2007). Aplicación de técnica de optimización mediante algoritmos genéticos para calibración de modelo QUAL2K como una aproximación a la modelación de la calidad del agua de los principales ríos de la zona urbana de Bogotá D.C. (Tesis de Maestría). Pontificia Universidad Javeriana

Virgilio, J. (2017). Evaluación de la cinética de oxidación y remoción de materia orgánica en la autpurificación de un río de montaña: Caso río Chinchiná [Trabajo de grado, Universidad Nacional de Colombia]. Repositorio Institucional Universidad Nacional de Colombia.

Washington State Department of Ecology. (2008). QUAL2Kw theory and documentation (version 5.1).

Washington State Department of Ecology. (2008). QUAL2Kw user manual (version 5.1).

WASP (Water Quality Analysis Simulation Program). U.S. Environmental Protection Agency (EPA). (s. f.). Modelo de calidad de agua. Recuperado de <https://www.epa.gov/hydrowq/water-quality-analysis-simulation-program-wasp>

Wetzel, R. G. (2001). Limnology: Lake and river ecosystems (3rd ed.). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-057439-4.50005-0>

WEAP. (s.f.). QUAL2K Overview. En *WEAP Help*. Recuperado de https://www.weap21.org/webhelp/overview_q2k.htm

World Health Organization. (2017). Guidelines for drinking-water quality (4th ed., incorporating the 1st addendum). World Health Organization. <https://www.who.int/publications/i/item/9789241549950>

Wu, W., & Xu, Z. (2011). Application of QUAL2K model in water quality management. *Water Science and Engineering*, 4(1), 14–24. <https://doi.org/10.3882/j.issn.1674-2370.2011.01.002>

Yusuf, A. A., & Sangma, R. J. (2017). Assessment of surface water quality using QUAL2K software: A case study of River Yamuna, India. *European Journal of Advances in Engineering and Technology*, 4(3), 16–23.

Zhang, Y., Wang, S., Ma, X., & Zhang, H. (2012). Simulation of water environmental capacity and pollution load reduction using QUAL2K for water environmental management. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 9(12), 4504–4521. <https://doi.org/10.3390/ijerph9124504>