



UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
PRIMER CLAUSTRO UNIVERSITARIO DE COLOMBIA

Revisión bibliográfica del uso del software QUAL2K como herramienta de apoyo en la toma de decisiones para la gestión de la calidad del agua

Facultad de Ciencias Ambientales - Ingeniería Ambiental - Universidad Santo Tomás - Sede Bogotá

L. E. Ramírez Romero J. D. Velandia Duarte

Resumen

La gestión hídrica requiere herramientas que relacionen las cargas contaminantes con la dinámica hidráulica para que tenga la respuesta del cuerpo receptor. El objetivo de esta revisión fue analizar el uso de QUAL2K como soporte para decisiones de calidad del agua con lo que esta manera tenga el énfasis en su desempeño cuantitativo, sus procesos cinéticos y sus limitaciones. Se realizó una revisión bibliográfica estructurada de publicaciones entre 2007 y 2024, cuya búsqueda y selección finalizaron en 2026. Se identificaron 45 registros. Después de eliminar 3 duplicados, descartar 7 documentos por título y resumen, excluir 3 textos completos por incumplimiento de criterios y retirar 2 documentos durante la evaluación de calidad, se obtuvo una muestra final de 30 estudios. Los resultados evidencian que QUAL2K se aplica con mayor frecuencia en cuerpos de agua afectados por vertimientos domésticos y municipales, aunque también se ha usado en escenarios industriales, agrícolas, mineros y de saneamiento ambiental. La literatura revisada muestra que el modelo ayuda a diagnosticar condiciones actuales, ubicar tramos críticos, estimar el efecto de las descargas, calcular reducciones de carga contaminante y contrastar alternativas de recuperación o tratamiento. En Colombia, su uso resulta pertinente para sustentar permisos de vertimiento, planes de saneamiento, gestión de aguas residuales y evaluaciones ambientales. Aun así, la confiabilidad de sus resultados depende de la calidad de los datos de campo, la segmentación adecuada del río, la calibración, la validación y el análisis de incertidumbre. Se concluye que QUAL2K no reemplaza el monitoreo ambiental, pero sí fortalece la toma de decisiones porque transforma información dispersa en escenarios interpretables y comparables.

Palabras clave. QUAL2K, calidad del agua, modelación matemática, análisis de sensibilidad, incertidumbre, vertimientos, toma de decisiones.

Abstract

Water management requires tools that relate pollutant loads to hydraulic dynamics to determine the response of the receiving water body. The objective of this review was to analyze the use of QUAL2K as a support tool for water quality decisions, emphasizing its quantitative performance, kinetic processes, and limitations. A structured literature review of publications between 2007 and 2024 was conducted, with the search and selection process concluding in 2026. Forty-five records were identified. After removing three duplicates, discarding seven documents based on title and abstract, excluding three full texts for failing to meet criteria, and removing two documents during the quality assessment, a final sample of 30 studies was obtained. The results show that QUAL2K is most frequently applied in water bodies affected by domestic and municipal wastewater discharges, although it has also been used in industrial, agricultural, mining, and environmental sanitation settings. The reviewed literature shows that the model helps diagnose current conditions, locate critical sections, estimate the effect of discharges, calculate pollutant load reductions, and compare recovery or treatment alternatives. In Colombia, its use is relevant for supporting discharge permits, sanitation plans, wastewater management, and environmental assessments. However, the reliability of its results depends on the quality of field data, proper river segmentation, calibration, validation, and uncertainty analysis. It is concluded that QUAL2K does not replace environmental monitoring, but it does strengthen decision-making by transforming dispersed information into interpretable and comparable scenarios.

Keywords. QUAL2K, water quality, mathematical modeling, sensitivity analysis, uncertainty, wastewater discharges, decision-making.

Introducción

La calidad del agua ocupa un lugar central en la gestión ambiental porque se relaciona con actividades agrícolas, mineras, urbanas y de planificación territorial. En los estudios revisados, los ríos aparecen como receptores de descargas asociadas al abastecimiento, el riego y distintos usos ecológicos. En ese contexto, las autoridades y las comunidades deben decidir dónde intervenir, qué cargas contaminantes reducir y qué tan efectiva puede ser una alternativa de saneamiento antes de ejecutarla. A la fecha de cierre de esta revisión, en 2026, esta necesidad es especialmente relevante porque las decisiones sobre saneamiento y priorización de inversiones deben justificarse antes de ejecutar obras o imponer metas de reducción. La modelación de calidad del agua adquiere importancia porque conecta el monitoreo con la toma de decisiones públicas (Jaramillo et al., 2020) (Jaramillo et al., 2020; Zhang et al., 2012). El deterioro de los cuerpos hídricos es un problema ambiental global, sobre todo en regiones en desarrollo, donde las aguas residuales domésticas, industriales y agrícolas suelen llegar a los ríos sin tratamiento suficiente y generan impactos sobre los ecosistemas acuáticos, la salud pública y la disponibilidad del recurso (Cuellar & Lezama, 2022; Kalburgi et al., 2015). En estos sistemas, el aumento de la DBO reduce con frecuencia el oxígeno disuelto, afecta la biodiversidad y limita usos como el suministro de agua y el riego. Los modelos matemáticos, entre ellos QUAL2K, permiten representar el comportamiento de los contaminantes y evaluar escenarios futuros bajo diferentes condiciones de carga, caudal y manejo (Zhang et al., 2012). Este modelo ha sido utilizado para estudiar el comportamiento de corrientes y variables como oxígeno disuelto, DBO, nitrógeno, fósforo, sólidos en suspensión, temperatura, pH y conductividad.

QUAL2K representan ríos y corrientes mediante balances unidimensionales de flujo, calor y masa. El modelo integra transporte, dispersión, reaireación, oxidación de materia orgánica, nitrificación, desnitrificación, sedimentación, demanda béntica, fotosíntesis y respiración. Esta estructura permite analizar la interacción entre oxígeno disuelto, demanda bioquímica de oxígeno carbonácea, nutrientes, temperatura, pH, sólidos suspendidos y patógenos. No obstante, el nivel de detalle del software no elimina la dependencia de los datos: una mayor cantidad de parámetros puede aumentar la flexibilidad del ajuste, pero también generar problemas de identificabilidad y múltiples combinaciones igualmente plausibles (Arroyave Gómez et al., 2013; Kannel et al., 2007).

El problema que orienta esta revisión es la dificultad de convertir los datos de monitoreo en decisiones de gestión ambiental, especialmente cuando se busca comprender la relación entre una descarga puntual y el deterioro observado aguas abajo. En el país, esta dificultad se acentúa porque muchos cuerpos de agua reciben presiones de zonas urbanas, actividades productivas, infraestructura vial, agricultura, minería, plantas de tratamiento y vertimientos de aguas residuales. La presencia de aguas residuales urbanas que no alcanzan un tratamiento completo refuerza la necesidad de herramientas que permitan priorizar tramos, fuentes de contaminación y medidas de intervención (Superintendencia de Servicios Públicos, 2023).

Esta revisión bibliográfica analiza la manera en que QUAL2K ha sido utilizado para estudiar parámetros de calidad del agua, evaluar descargas y simular escenarios de gestión. Más que describir el software, el propósito es comprender cómo aporta a la toma de decisiones en contextos ambientales reales.

Metodología de la revisión

Se desarrolló una revisión bibliográfica estructurada con síntesis narrativa y comparativa. La ventana temporal incluyó publicaciones entre 2007 y 2024, y el proceso de búsqueda, depuración y análisis finalizó en 2026. Se consultaron Scopus, Web of Science, SciELO y Google Scholar, además de repositorios universitarios y documentos técnicos disponibles en texto completo. Las ecuaciones de búsqueda combinaron los términos ("QUAL2K" Y "aguas residuales"), ("QUAL2K" Y "calidad del agua"), ("río" Y "modelado" O "QUAL2K"), ("QUAL2K" AND "wastewater") y ("QUAL2K" AND "water quality").

Se incluyeron artículos científicos, trabajos de grado, informes técnicos y documentos de congreso que:

- Aplicaran directamente QUAL2K en un cuerpo de agua superficial.
- Describieran al menos la configuración hidráulica y una variable de calidad.
- Presentaran calibración y comparación con datos observados o simulación de escenarios.
- Se aceptaron estudios de contaminación doméstica, municipal, industrial, agrícola o minera.

Se excluyeron registros duplicados, documentos que solo mencionaban el software, aplicaciones sin relación con cuerpos de agua superficiales, textos incompletos y trabajos sin información suficiente sobre variables, configuración o resultados. En una segunda evaluación de calidad se retiraron documentos que no permitían valorar la confiabilidad de las predicciones o que duplicaban resultados ya informados en una fuente primaria.

Etapa	n	Descripción o motivo
Registros identificados	45	Resultados iniciales de todas las fuentes consultadas.
Duplicados eliminados	3	Coincidencia de título, autores y contenido.
Registros evaluados por título y resumen	42	Base de cribado inicial.
Textos completos evaluados	40	Documentos potencialmente elegibles.
Textos completos excluidos	7	Sin aplicación directa (2), detalle metodológico insuficiente (2), fuera del enfoque de gestión (2) y texto incompleto (1).
Estudios preseleccionados	33	Pasaron los criterios de elegibilidad.
Excluidos en evaluación de calidad	3	Sin validación o métrica de desempeño (2), sin resultados cuantitativos de escenarios (1) y reporte secundario con datos superpuestos (1).
Muestra final	30	Estudios incluidos en la síntesis cualitativa y cuantitativa.

Tabla 1. Balance del proceso de identificación, selección y evaluación de calidad de los estudios.

Los resultados se presentan de manera comparativa, con énfasis en las ventajas, limitaciones y patrones de uso del modelo. Se prestó especial atención a la necesidad de calibración adecuada y al riesgo de incertidumbre cuando existen pocos registros fisicoquímicos o hidráulicos.

Descripción del modelo QUAL2K

QUAL2K se creó en el año 2003, desarrollado por la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos. QUAL2K se propuso como una versión actualizada para simular la calidad del agua en ríos y corrientes mediante un enfoque unidimensional. De acuerdo con los estudios revisados, Park y Lee desarrollaron QUAL2K como una modificación de QUAL2E e incorporaron mejoras en la estructura computacional, la desnitrificación y los cambios de oxígeno disuelto asociados con plantas fijas. Más adelante, Pelletier y Chapra desarrollaron QUAL2Kw, una versión ajustada que amplió la representación de DBO rápida y lenta, algas de fondo, flujos sedimento-agua y calidad del agua intersticial (Kalburgi et al., 2015; Zhang et al., 2012).

El propósito del modelo es representar procesos de calidad del agua bajo condiciones de flujo no uniforme, estacionario y unidimensional. Frente a versiones anteriores, QUAL2K incorporó mejoras relacionadas con la representación de formas rápidas y lentas de DBO, la simulación de algas de fondo, la desnitrificación, el intercambio sedimento-agua y el trabajo con múltiples fuentes puntuales y difusas (Kannel et al., 2007; Zhang et al., 2012).

El modelo representa el río como una secuencia de tramos que pueden dividirse en elementos computacionales. En cada elemento se resuelven balances de flujo y de masa para los componentes de calidad del agua. La premisa central es que la corriente se encuentra bien mezclada en las direcciones vertical y lateral. Esta simplificación reduce las exigencias computacionales y facilita su aplicación en estudios de gestión, aunque limita su uso en sistemas con mezcla lateral marcada, influencia de mareas

o flujos altamente transitorios (Kalburgi et al., 2015; Hasham y Ramal, 2022). Los datos de entrada suelen incluir caudal, velocidad, profundidad, pendiente, ancho del canal, coeficiente de Manning, elevación, temperatura del aire, velocidad del viento, punto de rocío, nubosidad, sombra, calidad del agua de cabecera, afluentes, descargas puntuales, fuentes difusas y concentraciones observadas. Según el objetivo del estudio, el modelo puede simular oxígeno disuelto, DBO rápida y lenta, nitrógeno orgánico, amonio, nitratos, fósforo orgánico e inorgánico, sólidos en suspensión, fitoplancton, algas bentónicas, patógenos, pH, alcalinidad, temperatura y conductividad. Esta variedad de parámetros es una ventaja frente a herramientas más simples, sobre todo cuando se busca interpretar la relación entre materia orgánica, nutrientes y oxígeno (Hadgu et al., 2014; Jitolis et al., 2021; Ashwani et al., 2017).

Los estudios revisados muestran que el ajuste del oxígeno disuelto y la DBO suele ser prioritario, aunque la calidad del modelo mejora cuando también se calibra el caudal. La validación con una campaña independiente permite comprobar si el modelo reproduce patrones diferentes a los utilizados durante la calibración.

Fundamentos de la modelación de calidad del agua

La calidad del agua no debe entenderse como una condición aislada, sino como el resultado de propiedades físicas, químicas y biológicas que determinan el uso posible de un cuerpo hídrico. Entre las variables físicas, la temperatura, los sólidos en suspensión, la turbidez y la conductividad inciden en la mezcla y en el transporte de partículas. Desde el componente químico, el oxígeno disuelto, la DBO, la DQO, el pH, la alcalinidad, el nitrógeno y el fósforo permiten reconocer contaminación orgánica, procesos de eutrofización y cambios de acidez. En el componente biológico, los coliformes, patógenos, fitoplancton, algas bentónicas y materia orgánica particulada ayudan a interpretar riesgos sanitarios y respuestas ecológicas (Salinas Tapia et al., 2016; Vargas Eslava y Lucero Rosero, 2020).

En los estudios revisados, los indicadores más recurrentes son el OD y la DBO, debido a que expresan la relación entre la carga orgánica y la disponibilidad de oxígeno para la vida acuática. Cuando la DBO aumenta, los microorganismos demandan más oxígeno para degradar la materia orgánica, lo que puede disminuir el oxígeno disuelto y generar condiciones críticas para peces e invertebrados. Los nutrientes, especialmente nitrógeno amoniacal, nitratos, nitrógeno total, fósforo total y fósforo inorgánico, se asocian con eutrofización y deterioro progresivo de la calidad del agua. En varios casos, estos parámetros se analizan junto con sólidos en suspensión, temperatura, pH y conductividad para construir diagnósticos más completos (Kannel et al., 2007; Kalburgi et al., 2015).

En los ríos colombianos, la literatura muestra que la calidad del agua suele estar influenciada por aguas residuales domésticas sin tratamiento, descargas industriales, actividades agrícolas, minería y expansión urbana. La quebrada Chapal, el río Chipalo y el río Fonce ilustran impactos asociados a vertimientos urbanos. El río Aburrá evidencia efectos relacionados con una curtiembre, mientras que algunos afluentes del río Cesar muestran presiones vinculadas con actividad minera (Cárdenas Calvachi et al., 2009; Bracho Vargas et al., 2016). Por su parte, los ríos Bolo y Frayle permiten estudiar el reúso agrícola como estrategia para reducir cargas contaminantes. Estas aplicaciones indican que la calidad del agua no se limita a medir concentraciones, sino que exige interpretar la relación entre la presión antrópica, la capacidad de respuesta del río y los objetivos de uso del recurso (Cárdenas Calvachi et al., 2009; Cuesta-Parra et al., 2018; Bracho Vargas et al., 2016).

Normas principales relacionadas con QUAL2K

Parámetro	Norma colombiana de referencia	¿QUAL2K lo modela de forma activa?	Definición de las variables	Ecuación representativa
Caudal, velocidad, profundidad y geometría del cauce	Decreto 1076 de 2015; Resoluciones 751 y 958 de 2018 (marco de PORH y modelación/ordenamiento). Referencias metodológicas o de gestión, no límites de calidad.	SÍ – variables hidráulicas de soporte	Q: caudal. n: rugosidad de Manning. A: área de la sección transversal. P: perímetro mojado. So: pendiente del cauce.	$Q_i = Q_{i-1} + Q_{\text{entrada},i} - Q_{\text{extracción},i}$ $Q = (1/n) \cdot A^{5/3} \cdot P^{-2/3} \cdot S_o^{1/2}$
Temperatura del agua	Resolución 631 de 2015; Decreto 1076 de 2015; Resolución 0565 de 2026 (vigencia a partir del 21 de mayo de 2027).	SÍ – balance térmico	T: temperatura del agua. Jcalor: flujo neto de calor. ρ : densidad del agua. Cp: calor específico. V: volumen del tramo. k20: constante a 20 °C. θ : factor de corrección por temperatura.	$dT/dt = \text{transporte} + J_{\text{calor}}/(\rho \cdot C_p \cdot V)$ $k(T) = k_{20} \cdot \theta^{(T-20)}$
Oxígeno disuelto (OD)	Decreto 1076 contiene criterios de calidad para OD. Por ejemplo, para preservación de flora y fauna, pero no para vertimientos.	SÍ – constituyente central	OD: oxígeno disuelto. ODsat: concentración de saturación. k _a : tasa de reaeración. Los demás términos representan consumo por DBO, nitrificación, respiración y sedimentos.	$dOD/dt = k_a(OD_{\text{sat}} - OD) + P - R - k_{\text{DBO}} \cdot L - k_N \cdot NH_4 - SOD/H$
DBOs / DBO carbonácea (CBOD rápida y lenta)	Resolución 631 de 2015; Resolución 1433 de 2004; Resolución 0565 de 2026 (vigencia 2027); Decreto 1076 de 2015 según uso/criterio de calidad.	SÍ – dos fracciones biodegradables	L: concentración de DBO carbonácea. k _d : tasa de desoxigenación o degradación. t: tiempo. La fracción rápida se degrada más fácilmente que la lenta.	$dL/dt = -k_d \cdot L$ $L(t) = L_0 \cdot e^{(-k_d \cdot t)}$
Demanda química de oxígeno (DQO)	Resolución 631 de 2015; Resolución 0565 de 2026.	NO – no es un estado cinético estándar	No aplica una ecuación cinética propia. La DQO se usa como variable de caracterización de la materia oxidable y puede relacionarse con la DBO mediante factores obtenidos experimentalmente.	<i>Sin ecuación cinética propia.</i> Relación opcional: $DBO = f \cdot DQO$

Parámetro	Norma colombiana de referencia	¿QUAL2K lo modela de forma activa?	Definición de las variables	Ecuación representativa
Nitrógeno orgánico, amonio, nitritos, nitratos y nitrógeno total	Nitrógeno orgánico: Resolución 0565 de 2026 / marco QUAL2K. Amonio: Decreto 1076 según uso; Resolución 0565 de 2026. Nitratos y nitritos: Decreto 1076 según uso; Resolución 631 de 2015; Resolución 1256 de 2021 cuando corresponda a reúso agrícola. Nitrógeno total: Resolución 631 de 2015 y Resolución 0565 de 2026.	SÍ – ciclo del nitrógeno	Norg: nitrógeno orgánico. NH ₄ ⁺ : amonio. NO ₂ ⁻ : nitrito. NO ₃ ⁻ : nitrato. k: constantes de mineralización, nitrificación y desnitrificación. t: tiempo.	$dNorg/dt = -k_{min} \cdot Norg$ $dNH_4/dt = k_{min} \cdot Norg - k_{nit} \cdot NH_4$ $dNO_3/dt = k_{nit} \cdot NH_4 - k_{den} \cdot NO_3$
Fósforo orgánico, ortofosfato y fósforo total	Resolución 631 de 2015; Decreto 1076 de 2015 según uso; Resolución 0565 de 2026 (vigencia 2027).	SÍ – ciclo del fósforo	Porg: fósforo orgánico. PO ₄ ³⁻ : ortofosfato. k: constantes de mineralización y asimilación. A: biomasa de algas o fitoplancton. t: tiempo.	$dPorg/dt = -k_{min,P} \cdot Porg$ $dPO_4/dt = k_{min,P} \cdot Porg - k_{abs} \cdot PO_4$
pH, alcalinidad y carbono inorgánico	pH -Resolución 631 de 2015; Decreto 1076 de 2015; Resolución 0565 de 2026. Alcalinidad y carbono inorgánico son variables químicas usadas por QUAL2K	SÍ – equilibrio químico acoplado	pH: medida de acidez. Alk: alcalinidad. CT: carbono inorgánico total. CO ₂ , HCO ₃ ⁻ y CO ₃ ²⁻ : especies del sistema carbonato.	$CT = [CO_2^*] + [HCO_3^-] + [CO_3^{2-}]$ $pH = -\log_{10}[H^+]$
Sólidos suspendidos totales (SST), sólidos inorgánicos y detritos	Resolución 631 de 2015; Resolución 0565 de 2026; Resolución 1433 de 2004 (metas de saneamiento).	PARCIAL – fracciones modelables	S: concentración de sólidos. v _s : velocidad de sedimentación. H: profundidad del tramo. las cargas representan aportes externos y la resuspensión devuelve sólidos a la columna de agua.	$dS/dt = \text{transporte} + W/V - (v_s/H) \cdot S + \text{resuspensión}$
Sólidos sedimentables (SSED)	Resolución 631 de 2015.	NO – variable de control del vertimiento	No aplica una ecuación propia. SSED corresponde al volumen de sólidos que sedimentan en un tiempo determinado y se usa para control del vertimiento.	<i>Sin ecuación propia en QUAL2K.</i>

Parámetro	Norma colombiana de referencia	¿QUAL2K lo modela de forma activa?	Definición de las variables	Ecuación representativa
Patógenos, coliformes y Escherichia coli	Decreto 1076 de 2015 según uso; Resolución 2115 de 2007 para agua de consumo humano; Resolución 0565 de 2026 (vigencia 2027).	SÍ – indicador microbiológico genérico	X: concentración del microorganismo indicador. k_b : tasa de decaimiento o mortalidad. t: tiempo.	$\frac{dX}{dt} = -k_b \cdot X$ $X(t) = X_0 \cdot e^{(-k_b \cdot t)}$
Fitoplancton, algas bentónicas y clorofila a	Clorofila a: Resolución 0565 de 2026 (vigencia 2027). Fitoplancton y algas bentónicas: variables ecológicas representadas por QUAL2K.	SÍ – biomasa y procesos ecológicos	A: biomasa de algas o fitoplancton. μ : tasa de crecimiento. I: disponibilidad de luz. N y P: nutrientes. los términos de pérdida representan respiración, mortalidad y sedimentación.	$\frac{dA}{dt} = \mu(T,I,N,P) \cdot A - k_{resp} \cdot A - k_{mort} \cdot A - k_{sed} \cdot A$
Grasas y aceites	Resolución 631 de 2015.	NO – caracterización y control	No aplica una ecuación cinética propia. Se mide directamente como parámetro de caracterización y control del vertimiento.	<i>Sin ecuación propia en QUAL2K.</i>
Hidrocarburos, fenoles, cianuros, metales y plaguicidas	Resolución 631 de 2015 según actividad de vertimiento; Decreto 1076/Resolución 2115 según el uso del agua; Resolución 1256 de 2021 únicamente en escenarios de reúso.	NO – fuera del alcance estándar	No aplica una ecuación estándar en QUAL2K. Son variables de control que requieren monitoreo o modelos complementarios.	<i>Sin ecuación propia en QUAL2K.</i>
Turbiedad y color	Resolución 2115 de 2007; Resolución 0565 de 2026, según el uso del agua.	NO DIRECTO – indicadores derivados	No aplica una ecuación directa. Se interpretan a partir de mediciones de campo y, de forma indirecta, mediante sólidos, algas y detritos.	<i>Sin ecuación propia en QUAL2K.</i>

Tabla 2. Relación normativa y conceptual de parámetros QUAL2K - Colombia

Modelos matemáticos en la gestión hídrica

Los modelos matemáticos de calidad del agua representan procesos de transporte, mezcla, transformación y degradación de contaminantes. Su utilidad principal es anticipar cómo podría cambiar una corriente si se modifican el caudal, las cargas o las condiciones de manejo. En lugar de depender únicamente de campañas extensas y costosas, la modelación aprovecha los datos disponibles para construir escenarios y comparar alternativas. Esto no elimina el monitoreo, pero sí mejora el uso de la información y ayuda a decidir qué medir, dónde intervenir y qué acciones pueden generar mayor beneficio (Zhang et al., 2012; Xin et al., 2019). QUAL2K se alimenta con información hidráulica,

geográfica, meteorológica y de calidad del agua. Los datos hidráulicos incluyen caudal, velocidad, profundidad, ancho, pendiente, rugosidad de Manning, longitud del tramo y extracciones. Los datos meteorológicos consideran temperatura del aire, viento, nubosidad y punto de rocío. La información de calidad incorpora condiciones de cabecera, afluentes, fuentes puntuales, fuentes difusas y mediciones de campo de variables como oxígeno disuelto, DBO, temperatura, pH, nutrientes, sólidos y coliformes. Con esta estructura, los datos de campo y laboratorio se transforman en una representación longitudinal del río (Hadgu et al., 2014; Jitolis et al., 2021).

El funcionamiento general del modelo parte de la segmentación del río en tramos. Luego se define el balance hidráulico, con entradas, salidas y extracciones. Después se incorporan las cargas contaminantes y las condiciones ambientales. El modelo se calibra mediante la comparación entre resultados simulados y datos observados, posteriormente se validan los resultados y se formulan escenarios de gestión. De esta manera, el modelo no solo calcula concentraciones, sino que también permite interpretar cómo responde el río ante cambios en la carga, el caudal o el tratamiento (Kannel et al., 2007; Hasham y Ramal, 2022).

La literatura revisada muestra que QUAL2K se ha utilizado en contextos muy diversos. Aparece en ríos extensos con varios afluentes, como el Zayandeh-rood en Irán y el Aburrá-Medellín en Colombia. También se aplica en arroyos urbanos con alta presión doméstica, como el Bagmati en Nepal, el Winongo en Indonesia y el Chipalo en Colombia. Además, se ha empleado en pequeñas cuencas rurales, como el Dengsha en China y el Kine-Vars en Irán, así como en tramos con datos limitados, entre ellos el Guacaica y el Fonce en Colombia, el Likas en Malasia y el Hilla en Irak. Su capacidad para trabajar por segmentos lo convierte en una alternativa práctica cuando se necesita representar un sistema fluvial sin acudir a modelos tridimensionales más complejos (Nakhaei y Etemad Shahidi, 2010; Giraldo-B. et al., 2015; Hadgu et al., 2014; Jitolis et al., 2021). Un modelo calibrado puede explorar, por ejemplo, una reducción del 20 % de la DBO por mejoras en una planta de tratamiento o por control de descargas industriales. Esta posibilidad es especialmente valiosa en regiones con limitaciones de equipos y campañas de campo (Hasham y Ramal, 2022).

Rol en la toma de decisiones

La toma de decisiones ambientales exige elegir entre alternativas con efectos técnicos, sociales y económicos. Los estudios en los ríos Bagmati en Nepal, Éufrates en Irak, Zayandeh-rood en Irán y Winongo en Indonesia evaluaron escenarios de modificación de carga, aumento de caudal y oxigenación local. En los ríos Bolo y Frayle en Colombia se analizó el reúso agrícola como estrategia de prevención. En el río Guacaica se propuso un escenario de saneamiento y en el río Hongqi se calculó la capacidad ambiental junto con la reducción necesaria de nutrientes. En todos estos casos, la modelación aportó argumentos para priorizar decisiones y justificar medidas de manejo (Kannel et al., 2007; Zhang et al., 2012; Hasham y Ramal, 2022).

En Colombia, la modelación se relaciona con instrumentos de planificación como los planes de gestión del recurso hídrico. Los estudios revisados indican que el modelo puede respaldar la identificación de zonas críticas y la proyección de escenarios de mediano y largo plazo. Su aporte más claro consiste en convertir diagnósticos dispersos en una base técnica útil para el diálogo entre autoridades, consultores y comunidades (Castro Huertas, 2015; Cuesta-Parra et al., 2018).

Ventajas y limitaciones

Entre las ventajas de QUAL2K se encuentran su disponibilidad gratuita, una interfaz relativamente accesible y la facilidad para construir escenarios. Estas características explican su uso frecuente en trabajos académicos y en estudios aplicados para autoridades ambientales. Además, el modelo permite organizar información y hacer visibles relaciones que no siempre se observan en una campaña de muestreo, como el efecto acumulado de varias descargas o la distancia necesaria para la recuperación del oxígeno disuelto aguas abajo (Mehrasbi & Farahmand Kia, 2015; Al-Dalimy & Al-Zubaidi, 2023).

Sus limitaciones también deben considerarse. Al ser un modelo unidimensional y de flujo permanente, puede no representar de forma adecuada ríos con dinámica transitoria o problemas de contaminación por metales pesados que no estén incluidos en su estructura. Varios estudios advierten que la falta de datos hidráulicos, meteorológicos o de calidad del agua puede producir calibraciones débiles. El caso del río Sinú muestra que diferentes combinaciones de parámetros pueden generar soluciones aparentemente aceptables, lo cual exige análisis de sensibilidad e incertidumbre. El caso del estero Aguas Claras evidencia que, cuando la información disponible no cumple los requerimientos del modelo, un esquema más simple puede ajustarse mejor a ciertas variables (Pazmiño-Rodríguez et al., 2018; Arroyave Gómez et al., 2013).

Por esta razón, QUAL2K debe entenderse como una herramienta de apoyo y no como una verdad técnica absoluta. Su mayor aporte aparece cuando se combina con monitoreo, conocimiento local, revisión normativa y participación de actores. Su mayor riesgo surge cuando se usa de forma mecánica, con calibración insuficiente o sin explicar los supuestos de cada escenario.

Resultados de la revisión bibliográfica

La evidencia revisada permite reconocer varios hallazgos generales. En primer lugar, QUAL2K aparece con mayor frecuencia en estudios donde el OD y la DBO son los indicadores centrales. Esto se observa en Bagmati, Ghataprabha, Hilla, Éufrates, Winongo, Pamba, Aburrá-Medellín, Guacaica, Frío, Fonce, Chipalo y Chapal (Cárdenas Calvachi et al., 2009; Kalburgi et al., 2015; Al-Dalimy y Al-Zubaidi, 2023; Nakhaei y Etemad Shahidi, 2010). La explicación es directa, ya que la relación DBO-OD resume el impacto de la materia orgánica y ayuda a valorar riesgos ecológicos y sanitarios. Desde una perspectiva de gestión, una curva de OD o DBO facilita ubicar tramos críticos y estimar si una reducción de carga podría generar mejoras reales (Al-Dalimy y Al-Zubaidi, 2023; Nakhaei y Etemad Shahidi, 2010).

Las aplicaciones colombianas muestran una tendencia clara hacia el uso de QUAL2K como soporte de la planificación ambiental. Los estudios no se limitan a describir contaminación, sino que buscan respaldar permisos, programas de saneamiento y decisiones de manejo. La presencia de casos en Santander, Caldas, Antioquia, Valle del Cauca, Tolima, Nariño, Cesar y Córdoba indica que el modelo se ha adoptado en distintas regiones y frente a diversos tipos de vertimientos (Castro Huertas, 2015; Cuellar y Lezama, 2022; Bracho Vargas et al., 2016).

El análisis de recurrencia muestra que las aguas residuales domésticas o municipales son la presión más común en los documentos revisados. También se identifican descargas industriales, fuentes agrícolas o rurales y, en menor proporción, contextos mineros. Esta distribución confirma que QUAL2K se utiliza sobre todo para interpretar contaminación orgánica y sanitaria, aunque también

puede apoyar análisis de nutrientes, sedimentos, escorrentía agrícola e impactos de actividades productivas. Algunos estudios integran SIG, DEM, Google Earth, HEC-RAS, WEAP, coeficientes de exportación y métodos de incertidumbre para fortalecer el modelo. Estas integraciones son relevantes porque QUAL2K, por sí solo, no resuelve todos los problemas asociados con la disponibilidad de datos. Su combinación con herramientas hidrológicas y geográficas permite representar mejor la cuenca y no únicamente el tramo del río (Jaramillo et al., 2016; Xin et al., 2019; Hadgu et al., 2014).

La limitación más repetida en la literatura es la disponibilidad de datos. En muchos casos, la calibración se realiza con pocas campañas de muestreo. Esto no invalida el uso del modelo, pero obliga a presentar los resultados como escenarios condicionados por la información disponible. Los estudios más detallados reconocen que una calibración sólida requiere campañas adicionales, ajuste de constantes cinéticas, validación independiente y evaluación de incertidumbre. Por ello, el uso responsable de QUAL2K exige comunicar los resultados junto con su nivel de confianza (Jitolis et al., 2021; Herrera Carrascal, 2024).

Cuerpo de agua	País	Escenario evaluado	Aporte a la toma de decisiones	Citación APA 7
Río Hongqi	China	Cálculo de la capacidad ambiental y de las reducciones necesarias de nutrientes.	Definir metas cuantitativas de reducción de cargas contaminantes para alcanzar los objetivos de calidad.	Zhang et al. (2012)
Río Bagmati	Nepal	Modificación de cargas, aumento de caudal y oxigenación local.	Comparar medidas individuales y combinadas para elevar el oxígeno disuelto y recuperar el río.	Kannel et al. (2007)
Río Zayandeh-rood	Irán	Modificación de cargas contaminantes y uso de estructuras para incrementar la oxigenación.	Evaluar estrategias para mejorar el oxígeno disuelto aguas abajo de zonas industriales.	Nakhaei y Etemad Shahidi (2010)
Río Winongo	Indonesia	Cambios en las cargas, aumento de caudal y oxigenación local.	Seleccionar alternativas capaces de aumentar el OD y disminuir la DBO.	Rahmi et al. (2022)
Ríos Bolo y Frayle	Colombia	Reúso agrícola de aguas residuales proyectado en un horizonte de veinte años.	Valorar el reúso como medida preventiva para disminuir las cargas vertidas y mejorar la calidad del agua.	Jaramillo et al. (2020)
Río Guacaica	Colombia	Escenario de saneamiento mediante colectores y tratamiento de aguas residuales.	Estimar la respuesta del río ante mejoras en la recolección y el tratamiento de los vertimientos.	Castro Huertas (2015)
Río Tianlai	China	Integración de QUAL2K con tecnologías de purificación ecológica.	Determinar condiciones de diseño y operación necesarias para alcanzar objetivos de calidad.	Zhu et al. (2015)

Tabla 3. Aplicaciones del modelo para comparar alternativas futuras de gestión de la calidad del agua.

Síntesis comparativa de los estudios incluidos

La Tabla 3 concentra los casos de estudio para evitar su repetición en la introducción y la metodología. Los detalles cuantitativos se presentan únicamente cuando fueron verificables en los documentos analizados.

Estudio	Sistema	Enfoque	Hallazgo analítico o limitación
Fernández et al. (2018)	Colombia, río Lenguazaque	Integración hidrológica y calidad de agua en minería de carbón.	Propone escenarios de riesgo y saneamiento; requiere articulación entre información de cuenca y tramo.
Salinas Tapia et al. (2016)	México, curso alto del río Lerma	NH ₄ -N, nitratos, OD y temperatura; calibración y validación.	NH ₄ -N mostró mejor ajuste que OD y nitratos; baja nitrificación bajo condiciones anóxicas.
Elsayed (2014)	Egipto, canal Mahmoudia	QUAL2K e índice de contaminación en cuatro estaciones.	Compara bombeo, control de drenajes y protección de captaciones.
Mehrasbi & Farahmand Kia (2015)	Irán, río Kine-Vars	Nutrientes y estrategias de control.	Estima reducciones de N y P para cumplir objetivos; dependiente de parámetros cinéticos.
Jitolis et al. (2021)	Malasia, río Likas	DEM, hidráulica, BOD, DO, pH y SST.	Identifica fuentes urbanas e industriales y propone filtración pluvial; datos limitados.
Xin et al. (2019)	China, cuenca Dengsha	Coeficientes de exportación y QUAL2K.	Amplía el análisis desde el tramo hacia fuentes rurales, agrícolas e industriales.
Al-Dalimy & Al-Zubaidi (2023)	Iraq, río Hilla	CBOD y OD con información limitada.	Muestra aplicabilidad operativa, pero la escasez de datos restringe la generalización.
Vargas Eslava & Lucero Rosero (2020)	Colombia, río Fonce	SST, pH, OD, DBO ₅ y coliformes.	Guía de parametrización; utilidad condicionada a la calidad de campañas de campo.
Cárdenas Calvachi et al. (2009)	Colombia, quebrada Chapal	Simulación académica de calidad de agua.	Destaca requerimientos de datos y calibración antes de usar resultados en gestión.
Jaramillo et al. (2020)	Colombia, ríos Bolo y Frayle	Reúso agrícola y planificación a 20 años.	OD +5 y +2,5 mg/L; reducción de carga de 94% y 62%, respectivamente.
Herrera Carrascal (2024)	Colombia, quebrada Chimiadó	Escenarios con/sin tratamiento y caudales medio y mínimo.	Compara impacto de vertimiento doméstico bajo condiciones hidrológicas críticas.
Jaramillo et al. (2016)	Colombia, río La Vieja	Integración WEAP-QUAL2K.	Vincula población, agroindustria y variabilidad climática; mejora la representación de cuenca.

Estudio	Sistema	Enfoque	Hallazgo analítico o limitación
Rivera Gutiérrez (2016)	Colombia, río Frío	Reaireación, desoxigenación, nitrificación y sedimentación.	Amplias diferencias entre fórmulas; asimilación estimada de solo 10% de la carga orgánica.
Cuellar & Lezama (2022)	Colombia, río Chipalo	Caudal, temperatura, OD, DBO, NH ₄ , nitratos y pH.	Evalúa dos vertimientos; utilidad para comparar condiciones aguas arriba y abajo.
Cuesta-Parra et al. (2018)	Colombia, río Aburrá	pH, conductividad, DBO, caudal y temperatura.	Verifica afectación de curtiembre; requiere distinguir variables activas de diagnósticas.
Ávila Angulo et al. (2014)	Colombia, río Frío	Monte Carlo y GLUE para carga orgánica.	Cuantifica incertidumbre y acumulación; muestra necesidad de rangos de predicción.
Castro Huertas (2015)	Colombia, río Guacaica	Calibración, confirmación y saneamiento.	Construye línea base para ordenamiento; condicionado por disponibilidad de información.
Giraldo-B. et al. (2015)	Colombia, río Aburrá-Medellín	50 km y escenarios a 2, 5 y 10 años.	PTAR Bello reduce DBO y mejora OD; sólidos responden menos por erosión y minería.
Pazmiño-Rodríguez et al. (2018)	Ecuador, estero Aguas Claras	Streeter-Phelps frente a QUAL2K; GLUE y Monte Carlo.	Errores de DBO de 35,5%-84,8% en QUAL2K por información insuficiente.
Arroyave Gómez et al. (2013)	Colombia, río Sinú	QUAL2Kw, PIKAIA y 1.300 simulaciones Monte Carlo.	Equifinalidad; alta sensibilidad a nitrificación e hidrólisis de N orgánico; calibración no única.
Bracho Vargas et al. (2016)	Colombia, afluentes del río Cesar	Tres ríos en zona minera.	Evalúa vertimientos; la transferencia entre ríos exige calibración independiente.
Kalburgi et al. (2015)	India, río Ghataprabha	Modelo BOD-DO con SIG y validación.	Predice efecto de descargas domésticas; concentra la evaluación en materia orgánica.
Hadgu et al. (2014)	Kenia, río Ndarugu	Q, temperatura, velocidad, BOD, DO y nitratos.	Recomienda control de vertimientos y manejo de cuenca con calibración y validación.
Nakhaei & Etemad Shahidi (2010)	Irán, Zayandeh-rood	OD, BOD y vertederos para oxigenación.	La reaireación local mejora OD, pero depende del diseño hidráulico de estructuras.
Zhang et al. (2012)	China, río Hongqi	Capacidad ambiental y reducción de cargas.	Metas: NH ₃ -N 50,96%, TN 44,11% y TP 22,92%.
Rahmi et al. (2022)	Indonesia, río Winongo	Carga, aumento de caudal y oxigenación local.	Reducción de BOD de 20% fue eficaz; aumento de cabecera no mejoró todo el perfil de OD.

Estudio	Sistema	Enfoque	Hallazgo analítico o limitación
Hasham & Ramal (2022)	Iraq, Éufrates en Fallujah	DO-CBOD y tres estrategias.	RE de 3,79%-10,51%; reducir carga fue más eficaz que aumentar caudal.
Kannel et al. (2007)	Nepal, río Bagmati	Control de OD mediante carga, flujo y vertederos.	La combinación mejora el OD, pero persiste un punto de 2,4 mg/L; BOD validó con 33% de error.
Ashwani et al. (2017)	India, río Pamba	BOD, SST, TN, TP y alcalinidad.	Verifica calidad en un punto de abastecimiento; alcance limitado a condiciones simuladas.
Zhu et al. (2015)	China, río Tianlai	QUAL2K y purificación ecológica.	Dimensiona densidad y tiempo de retención; integra proceso ecológico con objetivo de calidad.

Tabla 4. Síntesis de los 30 estudios incluidos en la revisión.

Discusión

La revisión muestra que el valor de QUAL2K no depende de que el programa tenga una eficiencia propia, sino de su capacidad para comparar distintas decisiones bajo condiciones específicas. Las mayores mejoras se observaron cuando las medidas redujeron directamente la entrada de contaminantes al río, por ejemplo, mediante tratamiento del agua.

En cambio, aumentar el caudal o diluir la contaminación produjo resultados menos constantes, porque también influyen la calidad del agua añadida, la forma del cauce, la profundidad y el tiempo que tarda el agua en recorrer el tramo. Por esta razón, una medida que en principio parece positiva puede incluso reducir el oxígeno disuelto en algunas zonas.

Los resultados también permiten reconocer distintos niveles de confianza. Los escenarios que cuentan con una calibración y una validación realizadas con datos independientes son más confiables que aquellos ajustados con la misma información utilizada después para simular. Sin embargo, un buen resultado general puede ocultar errores importantes en algunas variables (Kannel et al., 2007; Pazmiño-Rodríguez et al., 2018). En el río Bagmati, el oxígeno disuelto presentó errores moderados, mientras que la DBO llegó a un error del 33 % durante la validación (Kannel et al., 2007). En Aguas Claras, el oxígeno disuelto tuvo un comportamiento aceptable en algunos meses, pero la DBO superó el 80 % de error en ciertos tramos (Pazmiño-Rodríguez et al., 2018). Por lo tanto, no basta con afirmar que un modelo fue validado, sino que también debe indicarse para cuáles variables, estaciones y condiciones de caudal se obtuvo un ajuste adecuado (Kannel et al., 2007; Pazmiño-Rodríguez et al., 2018).

La forma en que se ajustan las constantes del modelo también puede cambiar directamente las decisiones. Si se supone que el río recibe más oxígeno del aire del que realmente recibe, el modelo puede mostrar como aceptable una carga contaminante que en la realidad provocaría falta de oxígeno. Si se exagera la velocidad de la nitrificación, podría parecer que el amonio desaparece con rapidez, sin representar correctamente el oxígeno consumido durante ese proceso. Del mismo modo, si se subestima la degradación de la materia orgánica, el punto más crítico del río puede aparecer más lejos de lo real o incluso no aparecer en la simulación (Arroyave Gómez et al., 2013; Pazmiño-Rodríguez

et al., 2018; Rivera Gutiérrez, 2016). Las diferencias encontradas entre los métodos utilizados en los ríos Frío y Aguas Claras muestran que estas constantes deberían medirse o comprobarse en cada lugar, especialmente en ríos de montaña, poco profundos y con mucha turbulencia (Pazmiño-Rodríguez et al., 2018; Rivera Gutiérrez, 2016).

En Colombia, el uso de QUAL2K adquiere relevancia porque la gestión de la calidad del agua está vinculada con el control de vertimientos, el ordenamiento del recurso hídrico y la evaluación de impactos sobre fuentes receptoras. A diferencia de contextos donde la modelación se usa principalmente con fines académicos, en el país puede funcionar como soporte técnico para estudios ambientales asociados a permisos de vertimiento, planes de saneamiento y manejo de descargas (Giraldo-B. et al., 2015; Jaramillo et al., 2020; Rivera Gutiérrez, 2016). En este marco, QUAL2K representa el comportamiento longitudinal de variables como oxígeno disuelto, DBO, nutrientes, sólidos y temperatura, lo que facilita analizar la capacidad de asimilación del cuerpo hídrico e identificar tramos sensibles frente a descargas domésticas, industriales y mineras (Bracho Vargas et al., 2016; Cuesta-Parra et al., 2018; Giraldo-B. et al., 2015; Rivera Gutiérrez, 2016).

Por ende, QUAL2K resulta más útil como una herramienta para analizar y comparar decisiones que como un programa destinado únicamente a verificar el cumplimiento normativo. Permite organizar la información disponible, entender cómo se relacionan las cargas contaminantes con los procesos del río y evaluar distintas medidas antes de realizar inversiones. Sin embargo, su aplicación responsable requiere explicar los supuestos de cada escenario, presentar los resultados por variable, reconocer los rangos de incertidumbre y señalar claramente cuáles procesos o contaminantes no están incluidos en el modelo.

Desde una perspectiva de la ingeniería ambiental, consideramos que el principal valor de QUAL2K no radica únicamente en su capacidad para reproducir las concentraciones de calidad del agua, sino en la posibilidad de transformar los resultados de la modelación en criterios técnicos para orientar intervenciones sobre el recurso hídrico. La revisión muestra que una reducción de cargas contaminantes mediante tratamiento puede generar respuestas más consistentes que estrategias basadas únicamente en dilución o aumento de caudal, lo que evidencia que las decisiones de manejo deben considerar de manera integral las condiciones hidráulicas, la capacidad de autodepuración y los procesos físicoquímicos y biológicos del cuerpo receptor. En este sentido, consideramos que un modelo como QUAL2K adquiere verdadero valor cuando se utiliza como parte de un proceso de gestión que integre monitoreo, conocimiento del territorio, evaluación de normativa y análisis de incertidumbre, y no cuando se emplea como una herramienta aislada para justificar una decisión previamente definida. Desde el ejercicio profesional, esto implica que los resultados deben interpretarse como escenarios condicionados por la información disponible y que la selección de alternativas de saneamiento debe considerar no solo el comportamiento simulado del contaminante, sino también la incertidumbre asociada a la calibración, las características particulares del río y las limitaciones propias del modelo.

Limitaciones del modelo y de la evidencia disponible

- El enfoque unidimensional y de flujo permanente no representa adecuadamente sistemas con cambios rápidos de caudal, estratificación, mareas, mezcla lateral marcada o pulsos intermitentes de vertimiento.
- La reaireación en tramos con alta turbulencia depende de ecuaciones empíricas cuyos resultados pueden diferir por más de un orden de magnitud. La calibración local es indispensable.
- QUAL2K está orientado a constituyentes convencionales. Grasas y aceites, sólidos sedimentables, metales pesados y numerosos contaminantes emergentes no se simulan como variables cinéticas específicas.
- La representación de SST exige separar sólidos inorgánicos y materia orgánica particulada. Usar el valor total sin partición puede alterar la sedimentación, la demanda de oxígeno y el balance de materia.
- La calibración automática optimiza una función objetivo, pero no garantiza plausibilidad física. Los pesos asignados a cada variable pueden favorecer un buen ajuste del OD a costa de nutrientes o sólidos.

En La falta de información suficiente puede reducir la capacidad del modelo para predecir correctamente el comportamiento de un río. Esto ocurre de tres formas principales.

1. Sin mediciones confiables de caudal, forma del cauce y tiempo de recorrido del agua, el modelo puede utilizar valores que no reflejan las características reales del tramo estudiado.
2. Hace más difícil identificar la causa exacta de los cambios en la calidad del agua. Por ejemplo, una disminución del oxígeno disuelto puede deberse al aumento de la materia orgánica, a los procesos relacionados con el nitrógeno o al consumo de oxígeno en el fondo del río.
3. Al utilizar una sola campaña de muestreo no permite comprobar si los resultados también son confiables en otra época del año o bajo diferentes condiciones de caudal.

En el caso del río Sinú, la información disponible permitió representar de manera aproximada el comportamiento del oxígeno disuelto. Algunos procesos, como la nitrificación y la transformación del nitrógeno orgánico, tuvieron una mayor influencia en los resultados, mientras que la sedimentación presentó una influencia menor. En una decisión real, esta incertidumbre puede llevar a diseñar sistemas de tratamiento más grandes o pequeños de lo necesario, permitir cargas contaminantes demasiado altas o interpretar de manera equivocada las causas de la recuperación del río.

Para obtener resultados más confiables, se recomienda realizar campañas de monitoreo en épocas con diferentes condiciones de caudal. También es necesario medir al mismo tiempo la cantidad y la calidad del agua, diferenciar la DBO total de la filtrada, analizar las distintas formas de nitrógeno, separar los sólidos orgánicos e inorgánicos y registrar la temperatura, el oxígeno disuelto y las condiciones meteorológicas. Además, es importante evaluar cuáles parámetros afectan más los resultados para poder calcular los posibles rangos de variación y validar el modelo con información

diferente a la utilizada durante su calibración. Cuando no se dispone de estos datos, los resultados deben presentarse como posibles escenarios y no como valores exactos de la cantidad de contaminación que el río puede recibir.

Conclusión

La revisión bibliográfica muestra que QUAL2K es una herramienta ampliamente utilizada para apoyar la gestión de la calidad del agua en ríos, arroyos y canales afectados por descargas. Su principal aporte consiste en transformar datos de monitoreo e información hidráulica en escenarios comparables que facilitan el diagnóstico, la priorización de medidas y la evaluación de alternativas de saneamiento. En la mayoría de los estudios, el modelo se concentra en variables como oxígeno disuelto, DBO, nutrientes, sólidos, pH y temperatura, lo que permite interpretar procesos de contaminación orgánica, eutrofización, autodepuración y capacidad de asimilación.

Como apoyo para la toma de decisiones, QUAL2K resulta útil para evaluar escenarios futuros relacionados con reducción de cargas contaminantes, operación de plantas de tratamiento, reúso de aguas residuales, control de descargas industriales, aumento del caudal e implementación de tecnologías de recuperación ambiental. En Colombia, las aplicaciones revisadas muestran que el modelo puede respaldar la planificación del recurso hídrico dentro de instrumentos de gestión ambiental.

A pesar de estas ventajas, sus limitaciones deben reconocerse de manera explícita. Su carácter unidimensional, el enfoque de flujo permanente y la dependencia de datos de campo hacen que no sea adecuado para todos los sistemas. La falta de información, una calibración insuficiente o la selección arbitraria de parámetros pueden conducir a resultados poco confiables. Por esta razón, su aplicación debe incluir monitoreo, calibración, validación y análisis de sensibilidad.

En el contexto colombiano, QUAL2K representa una oportunidad para fortalecer la gestión del recurso hídrico mediante herramientas técnicas que integren monitoreo, modelación y toma de decisiones ambientales. Su aplicación es especialmente relevante en estudios de soporte para permisos de vertimiento, evaluación del impacto de descargas, formulación de planes de saneamiento y manejo de vertimientos. En este sentido, más que un software de simulación debe entenderse como una herramienta de apoyo para la planificación ambiental, capaz de traducir información dispersa en escenarios comparables que facilitan decisiones regulatorias, priorización de inversiones y estrategias de control de la contaminación hídrica.

Como consideración final desde la ingeniería ambiental, consideramos que QUAL2K representa una herramienta con un alto potencial para fortalecer la toma de decisiones sobre la calidad del agua en Colombia, especialmente cuando existe la necesidad de comparar alternativas de tratamiento, reducción de cargas o manejo de vertimientos antes de realizar inversiones y establecer medidas de control. Sin embargo, su utilidad profesional no debe asociarse únicamente con la obtención de una simulación o con el cumplimiento de un criterio normativo, sino con la capacidad de sustentar decisiones técnicamente razonables y ambientalmente preventivas. Por ello, consideramos que el uso de QUAL2K debe estar acompañado de monitoreo representativo, calibración y validación independientes, análisis de sensibilidad e incertidumbre y un reconocimiento explícito de los

contaminantes y procesos que no pueden ser representados adecuadamente por el modelo. Bajo estas condiciones, QUAL2K puede pasar de ser una herramienta académica de simulación a convertirse en un instrumento de apoyo para la planificación, el control de vertimientos y la gestión sostenible del recurso hídrico, siempre entendiendo que la decisión final corresponde al criterio técnico y ambiental sustentado en múltiples fuentes de información.

Referencias

- Al-Dalimy, S. Z., & Al-Zubaidi, H. A. M. (2023). Application of QUAL2K model for simulating water quality in Hilla River, Iraq. *Journal of Ecological Engineering*, 24(6), 272-280. <https://doi.org/10.12911/22998993/162873>
- Arroyave Gómez, D. M., Moreno Tovar, A. A., Toro Botero, F. M., Gallego Suárez, D. J., & Carvajal Serna, L. F. (2013). Estudio del modelamiento de la calidad del agua del río Sinú, Colombia. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 12(22), 33-44.
- Ashwani, S., Vivek, B., Ratnoji, S., Jayakumar, P., & Jainet, P. J. (2017). Application of QUAL2K model for prediction of water quality in a selected stretch of Pamba River. *International Journal of Civil Engineering and Technology*, 8(6), 75-84.
- 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. En 12th Latin American and Caribbean Conference for Engineering and Technology.
- 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.
- Cárdenas Calvachi, G. L., Mafla Chamorro, F., López Martínez, M. L., & Duque Villa, C. L. (2009). Simulación de la calidad del agua en la quebrada Chapal: Una aplicación del modelo QUAL2K. *Revista Unimar*, 11-24.
- Castro Huertas, M. A. (2015). Aplicación del QUAL2Kw en la modelación de la calidad del agua del río Guacaica, departamento de Caldas, Colombia [Tesis de maestría, Universidad Nacional de Colombia].
- Colombia, Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2015a). Decreto 1076 de 2015, por medio del cual se expide el Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible.
- Colombia, Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2015b). Resolución 631 de 2015, por la cual se establecen los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público.
- Colombia. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. Decreto 1076 de 2015. Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible.
- Colombia. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. Decreto 50 de 2018. Modificación de disposiciones sobre ordenamiento del recurso hídrico y vertimientos.
- Colombia. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. Resolución 631 de 2015. Parámetros y valores límites máximos permisibles en vertimientos puntuales.
- Colombia. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. Resolución 0565 de 2026. Criterios de calidad para el uso de las aguas superficiales, subterráneas y marinas.

- Colombia. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. Resolución 1256 de 2021. Uso de las aguas residuales.
- Colombia. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. Resoluciones 0751 y 0958 de 2018. Guía técnica para la formulación de los Planes de Ordenamiento del Recurso Hídrico.
- Colombia. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. Resolución 1433 de 2004. Planes de Saneamiento y Manejo de Vertimientos.
- Colombia. Ministerio de la Protección Social y Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. Decreto 1575 de 2007 y Resolución 2115 de 2007. Calidad del agua para consumo humano.
- Cuellar, 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>
- Cuesta-Parra, D. M., Velazco-Rincón, C. L., & Castro-Pardo, J. C. (2018). Evaluación ambiental asociada a los vertimientos de aguas residuales generados por una empresa de curtiembres en la cuenca del río Aburrá. Revista UIS Ingenierías, 17(2), 141-152. <https://doi.org/10.18273/revuin.v17n2-2018013>
- 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>
- Fernández, N., Camacho, L. A., McIntyre, N., Huguet, C., & Pearse, J. (2018). Propuesta metodológica para modelación del impacto de la minería de carbón en los recursos hídricos de cuencas de montaña. En XXVIII Congreso Latinoamericano de Hidráulica.
- Giraldo-B., L. C., Palacio, C. A., Molina, R., & Agudelo, R. A. (2015). Water quality modeling of the Medellin river in the Aburrá Valley. DYNA, 82(192), 195-202. <https://doi.org/10.15446/dyna.v82n192.42441>
- Hadgu, L. T., Nyadawa, M. O., Mwangi, J. K., Kibetu, P. M., & Mehari, B. B. (2014). Application of water quality model QUAL2K to model the dispersion of pollutants in River Ndarugu, Kenya. Computational Water, Energy, and Environmental Engineering, 3, 162-169. <https://doi.org/10.4236/cweee.2014.34017>
- Hasham, G. J., & Ramal, M. M. (2022). Application of QUAL2K for water quality modeling and management for the Euphrates River in Fallujah City as a case study. International Journal of Sustainable Development and Planning, 17(5), 1511-1521. <https://doi.org/10.18280/ijstdp.170515>
- Herrera Carrascal, Y. P. (2024). Modelación ambiental del vertimiento generado por el AETCR Llano Grande a la quebrada Chimiadó en el municipio de Dabeiba (Antioquia) [Informe de práctica, Universidad de Antioquia].
- Jaramillo, M. F., Cardona-Zea, D. A., & Galvis, A. (2020). Municipal wastewater reuse as a strategy for the prevention and water pollution control: Bolo and Frayle river basins (Colombia). Ingeniería y Competitividad, 22(2), 9412. <https://doi.org/10.25100/iy.22i2.9412>
- Jaramillo, M. F., Galvis, A., Escobar, M., Forni, L., Purkey, D., Sieber, J., Lozano, G., Rodríguez, C., Castaño, J., & Sabas, C. (2016). Integración de los modelos WEAP y QUAL2K para la simulación de la calidad de agua de fuentes superficiales. Caso de estudio: cuenca del río La Vieja, Colombia. Aqua-LAC, 8(2), 14-24.
- Jitolis, J. L., Awang Ali, A. N. A., & Bolong, N. (2021). Water quality modelling using QUAL2K at Likas River, Sabah. Transactions on Science and Technology, 8(3-2), 363-371.

- Kalburgi, P. B., Shareefa, R. N., & Deshannavar, U. B. (2015). Development and evaluation of BOD-DO model for River Ghataprabha near Mudhol (India), using QUAL2K. I.J. Engineering and Manufacturing, 1, 15-25. <https://doi.org/10.5815/ijem.2015.01.02>
- Kannel, P. R., Lee, S., Kanel, S. R., Lee, Y. S., & Ahn, K. H. (2007). Application of QUAL2Kw for water quality modeling and dissolved oxygen control in the river Bagmati. Environmental Monitoring and Assessment, 125, 201-217. <https://doi.org/10.1007/s10661-006-9255-0>
- Mehrasbi, M. R., & Farahmand Kia, Z. (2015). Water quality modeling and evaluation of nutrient control strategies using QUAL2K in the small rivers. Journal of Human, Environment, and Health Promotion, 1(1), 1-11.
- Nakhaei, N., & Etemad Shahidi, A. (2010). Waste water discharge impact modeling with QUAL2K, case study: The Zayandeh-rood River. En International Environmental Modelling and Software Society, 5th Biennial Meeting.
- Pazmiño-Rodríguez, J. C., Zambrano-Ganchozo, G. L., & Coello-Burgos, H. A. (2018). Water quality modeling of the Aguas Claras stream, canton Quevedo, Ecuador. DYNA, 85(204), 204-214. <https://doi.org/10.15446/dyna.v85n204.65847>
- Rahmi, R., Marlina, N., & Rahmawati, S. (2022). River water quality modeling based on DO and BOD parameters using QUAL2Kw software (Case study: Winongo River, Special Region of Yogyakarta). En 7th International Conference on Sustainable Built Environment, 138-148. <https://doi.org/10.22085/icsbe.vol2.art13>
- Rivera Gutiérrez, J. V. (2016). Determinación de las tasas de oxidación, nitrificación y sedimentación en el proceso de autopurificación de un río de montaña. Ingeniare. Revista Chilena de Ingeniería, 24(2), 314-326.
- Salinas Tapia, H., Flores Gutiérrez, L., García Aragón, J. A., Tejeda, S., & López Rebollar, B. (2016). Modelación del curso alto del río Lerma (CARL), utilizando QUAL2Kw, considerando la distribución y variación de nitrógeno amoniacal y nitrógeno como nitratos. Aqua-LAC, 8(1), 34-43.
- Vargas Eslava, K. Y., & Lucero Rosero, L. A. (2020). Modelación de la dinámica de la calidad del agua en los parámetros: sólidos suspendidos totales, pH, oxígeno disuelto, demanda bioquímica de oxígeno (DBO5), coliformes totales, aguas arriba de San Gil en el río Fonce (Santander, Colombia) [Trabajo de grado, Universidad Militar Nueva Granada].
- Xin, Z., Ye, L., & Zhang, C. (2019). Application of export coefficient model and QUAL2K for water environmental management in a rural watershed. Sustainability, 11(21), 6022. <https://doi.org/10.3390/su11216022>
- Zhang, R., Qian, X., Yuan, X., Ye, R., Xia, B., & Wang, Y. (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>
- Zhu, W., Niu, Q., Zhang, R., Ye, R., Qian, X., & Qian, Y. (2015). Application of QUAL2K model to assess ecological purification technology for a polluted river. International Journal of Environmental Research and Public Health, 12(2), 2215-2229. <https://doi.org/10.3390/ijerph120202215x>