

Municipal wastewater reuse as a strategy for the prevention and water pollution control: Bolo and Frayle river basins (Colombia)

INGENIERÍA AMBIENTAL

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)

María F. Jaramillo^{1§}, Diana A. Cardona-Zea¹, Alberto Galvis¹

¹*Universidad del Valle, Facultad de Ingeniería, Instituto de Investigación y Desarrollo en Abastecimiento de Agua, Saneamiento Ambiental y Conservación del Recurso Hídrico (CINARA), Cali, Colombia*

[§]*maria.f.jaramillo@correounivalle.edu.co, diana.a.cardona@correounivalle.edu.co, alberto.galvis@correounivalle.edu.co*

Recibido: 06 de agosto 2019 – **Aceptado:** 08 de marzo de 2020

Abstract

In this study, the implementation of municipal wastewater reuse in agriculture was assessed as a strategy for the prevention and water pollution control. A methodological process was developed for water resources planning in the Bolo and Frayle river basins. These rivers are located in the Upper Cauca River basin in Colombia, and they are the main water resources of Candelaria, Florida and Pradera municipalities. Among the main results of the study, scenario-based planning for 20-year horizon was developed considering an active stakeholders' participation. These scenarios were evaluated thorough the implementation of the water quality model QUAL2K. The results of the modelling showed improvement in the water quality of the Bolo and Frayle rivers by the implementation of municipal wastewater reuse strategy. The Dissolved Oxygen levels (DO) increased by 5 mg / L in Bolo River and 2.5 mg / L in Frayle River. In addition, with the implementation of the reuse in agriculture at the end of the planning horizon (year 2036), it is possible to obtain a reduction of the polluting load of 94% and 62% for the Bolo and Frayle rivers respectively.

Keywords: *Integrated water resource management (IWRM), Scenario-based planning, Wastewater reuse.*

Resumen

En este estudio se evaluó la implementación del reúso de agua residual municipal en agricultura, como una estrategia de prevención y control de la contaminación hídrica. Esta evaluación se desarrolló como un proceso metodológico de planificación del recurso hídrico superficial en las cuencas de los ríos Bolo y Frayle, principales fuentes hídricas de los municipios de Candelaria, Florida y Pradera ubicados en la cuenca Alta del río Cauca en el suroccidente colombiano. Dentro de los principales resultados del estudio se construyeron escenarios de planificación del recurso hídrico de manera participativa con los actores en las cuencas de estudio, que fueron evaluados con la herramienta de modelación QUAL2K. A través de la formulación de los escenarios y en un horizonte de 20 años, fue posible observar el mejoramiento de la calidad del agua de los ríos Bolo y Frayle bajo la implementación de escenarios de reutilización de las aguas residuales municipales. Evaluando esta estrategia, se observó que el Oxígeno Disuelto (OD) puede incrementarse en 5 mg/l y 2.5 mg/l en los ríos Bolo y Frayle respectivamente. Adicionalmente, con la implementación del reúso agrícola es posible obtener una reducción de la carga contaminante vertida del 94% y 62% para los ríos Bolo y Frayle respectivamente, en relación con la carga producida al final del horizonte de planificación (año 2036).

Palabras clave: *Gestión del recurso hídrico, Modelación de calidad de agua, Reúso de agua residual, Reúso agrícola, Planificación basada en escenarios.*

1. Introducción

1.1. Planificación de los recursos hídricos en Colombia

La planificación del territorio es una herramienta integral que además del desarrollo urbano, en términos de movilidad e infraestructura, debe considerar el uso y distribución de los recursos naturales (en especial el recurso hídrico) como articulador de todos los procesos. En Colombia, la Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico ⁽¹⁾ orienta las acciones dirigidas a la administración de los cuerpos hídricos superficiales, mediante procesos de planificación que realizan las autoridades ambientales competentes, considerando como ejes principales el control de la contaminación vertida a los cuerpos de agua y a la gestión de la demanda de agua. Esa planificación se realiza mediante la formulación e implementación de los Planes de Ordenamiento y Manejo de Cuencas (POMCA) y los Planes de Ordenamiento del Recurso Hídrico (PORH). Ambos instrumentos de planificación deben integrar otros instrumentos normativos existentes para su desarrollo como son: reglamentación y permisos de vertimientos, planes de saneamiento

y manejo de vertimientos (PSMV), concesionamiento de agua, reglamentación del uso y los programas de uso eficiente y ahorro del agua, para un horizonte mínimo de diez años ⁽²⁾. El instrumento que planifica en detalle el recurso hídrico superficial corresponde al PORH, que está estructurado en 4 fases: declaratoria, diagnóstico, identificación de usos potenciales y elaboración del Plan de ordenamiento.

En la fase de diagnóstico, se construye una línea base sobre la situación actual del cuerpo de agua, los conflictos asociados al uso y disponibilidad del agua en términos de cantidad y calidad, el inventario de usuarios y la destinación o uso, y la disposición final del recurso después su utilización. En la fase de identificación de usos potenciales (prospectiva) se realizan proyecciones de la demanda y vertimientos de cargas, y se plantean diferentes escenarios de manejo con estrategias que son evaluadas a través de la modelación como herramienta de soporte a la toma de decisiones.

En la fase de elaboración del PORH, se identifican las posibilidades de aprovechamiento del recurso hídrico en función de los objetivos de calidad a ser cumplidos y alcanzados por los

usuarios en el mediano y largo plazo ⁽³⁾. También se definen los programas y proyectos, las metas quinquenales y el programa de seguimiento y monitoreo al recurso hídrico.

En desarrollo conjunto entre el Instituto Cinara de la Universidad del Valle y la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca (CVC), se elaboró un diagnóstico del recurso hídrico superficial de los ríos Bolo y Frayle, principales fuentes hídricas de los municipios de Candelaria, Florida y Pradera ubicados en la cuenca Alta del río Cauca, en el suroccidente colombiano. Con base en ese diagnóstico se identificaron algunas estrategias para la prevención y control de la contaminación, como el reúso de las aguas residuales en la agricultura.

En este artículo, se presenta la evaluación de una estrategia de reúso agrícola, identificada como parte de un ejercicio de planeación basado en escenarios con participación de actores, que fue fundamental para la construcción de la visión compartida y para la identificación de las estrategias que conduzcan a alcanzar la visión y para soportar la toma de decisiones en la gestión integral del recurso hídrico ⁽⁴⁾. El objetivo de desarrollar una visión compartida se fundamentó en una evaluación sistemática de las tendencias futuras y el impacto de estas tendencias en un territorio compartido. Para el proceso de planificación hídrica se consideraron los lineamientos de la “guía técnica para la formulación del Plan de Ordenamiento del recurso Hídrico” publicada por el MADS ⁽³⁾.

Teniendo en cuenta las estrategias de prevención y control de la contaminación hídrica, la reutilización del agua residual municipal surgió como una estrategia clave en la planificación del recurso hídrico. La evaluación de las estrategias fue realizada mediante la implementación de la modelación como herramienta para apoyar la toma de decisiones en un horizonte de 20 años y en función de la variación de la calidad del agua

en términos de la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅) y el Oxígeno Disuelto (OD).

1.2. El reúso del agua como estrategia para la prevención y el control de la contaminación hídrica

Considerando la creciente crisis del agua, a causa del crecimiento demográfico y el deterioro ambiental asociado, a mediados del siglo XX se postularon algunas bases para la prevención y control de la contaminación hídrica, haciendo énfasis en que la gestión del agua debe tener un enfoque coordinado entre las políticas globales relacionadas con la salud pública, el agua, los recursos y el ambiente ⁽⁵⁾.

El reúso de agua residual en la agricultura surgió como una estrategia de control de contaminación y corresponde al uso posterior que se le da al agua residual “tratada” en el riego de cultivos ⁽⁶⁾. Este tipo de reúso ha sido considerado como una herramienta eficiente para la gestión del agua ⁽⁷⁾ ante la necesidad de un abastecimiento regular que compense la escasez, ya sea por la estacionalidad o la distribución irregular de la oferta de otras fuentes de agua para los cultivos a lo largo de un año hidrológico ⁽⁸⁾.

De acuerdo con el último informe de la Organización de Naciones Unidas ⁽⁹⁾ el reúso de las aguas residuales tratadas en la agricultura conlleva múltiples beneficios para el ambiente y la economía, sin embargo, esta estrategia de prevención y control de la contaminación hídrica, puede presentar riesgos a la salud humana asociados con su inadecuada implementación ⁽¹⁰⁾. El reúso del agua residual municipal es una alternativa que cada vez más se adopta en diferentes regiones con problemas de escasez de agua, poblaciones urbanas crecientes y con una mayor demanda de agua de riego ^(11, 12). La disponibilidad del agua también se afecta por la contaminación provocada por las aguas residuales, muchas de las cuales no son tratadas antes de ser dispuestas en cauces superficiales, y la contaminación de los acuíferos ^(12, 13).

Uno de los beneficios más reconocidos del reúso del agua residual en la agricultura es la disminución de la presión sobre las fuentes de agua dulce, dado que el agua residual se convierte en una fuente alternativa para riego ⁽¹²⁾. Otros beneficios de esta práctica reportados en la literatura científica corresponden al aumento de la disponibilidad de nutrientes y metales en el suelo ⁽¹⁴⁻¹⁸⁾, al mejoramiento de la capacidad de intercambio catiónico y estabilización de la estructura del suelo ^(14-17, 19-29), al mejoramiento en el contenido de nutrientes disponibles para los cultivos, por aumento de la materia orgánica del suelo ⁽³⁰⁻⁴⁶⁾.

En el contexto colombiano, la gestión de las aguas residuales se realizó, desde el año 1984 hasta el año 2015, mediante la disposición final de los residuos líquidos en los ríos, bajo el cumplimiento de eficiencias de remoción de sistemas de tratamiento del 80% en los parámetros de DBO₅ y SST ⁽⁴⁷⁾. En el 2015, se reformuló el tratamiento de los efluentes líquidos y se establecieron criterios de calidad para su disposición final en cuerpos hídricos superficiales ⁽⁴⁸⁾. En función del reúso del agua, solo hasta el año 2014 se desarrollaron criterios de calidad para reúso de las aguas residuales tratadas en agricultura y en el sector industrial ⁽⁴⁹⁾. Todo lo anterior en el marco de desarrollo de la reglamentación de la Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico ⁽¹⁾.

1.3. Evaluación de estrategias de prevención hídrica y el modelo QUAL2K

Esta investigación tuvo como propósito la evaluación de una estrategia de prevención y control de la contaminación hídrica conocida como reúso de agua residual (municipal) en actividades agrícolas. La evaluación se realizó a través de la herramienta de modelación QUAL2K, mediante la formulación de

escenarios contruidos con los actores en territorio, en el marco de un proceso de planificación del recurso hídrico de los ríos Bolo y Frayle, en el departamento del Valle del Cauca, Colombia.

El modelo QUAL2K ha sido empleado ampliamente para estudiar el comportamiento de la calidad del agua de fuentes superficiales en diferentes partes de mundo. Algunas de sus aplicaciones en el contexto de la evaluación de impactos y toma de decisiones frente a una gestión integral del recurso hídrico han sido desarrolladas. Zainudin *et al.*, ⁽⁵⁰⁾ realizaron la evaluación de la calidad del agua del río Tebrau para analizar la influencia de los vertimientos industriales y la implementación de diferentes estrategias de saneamiento como parte del plan de gestión de su cuenca. Pai *et al.*, ⁽⁵¹⁾ realizó la evaluación del impacto del tratamiento de agua residual tratada con sistemas ecológicos de la ciudad de Taichung, Taiwan, utilizando la modelación del cuerpo hídrico antes y después de la implementación de los sistemas. El QUAL2K también ha sido usado en Egipto para analizar la calidad del agua, bajo el impacto de la implementación de reúso de efluentes provenientes de canales agrícolas ⁽⁵²⁾.

En el año 2016, Jaramillo ⁽⁵³⁾ evaluaron el impacto de las aguas residuales domésticas y agroindustriales en la cuenca del río La Vieja, Colombia, considerando como factores para la evaluación el crecimiento poblacional, el desarrollo agroindustrial y los efectos de la variabilidad y el cambio climático. La evaluación de la calidad del agua se logró mediante la integración de las herramientas de modelación WEAP (Water Evaluation And Planning System) y QUAL2K, mediante un análisis dendrítico de 11 fuentes hídricas tributarias al río La Vieja. De acuerdo con los autores, la integración de modelos WEAP y QUAL2K tuvo como resultado principal la identificación del comportamiento espacio

temporal de los parámetros de calidad del agua Oxígeno Disuelto (OD), Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅) y Temperatura (T) en una escala de agregación mensual y la evaluación de la implementación de dos estrategias de control de la contaminación hídrica: sistemas de tratamiento de aguas residuales municipales y sistemas de tratamiento anaerobio para la remoción de carga orgánica en el beneficio del café.

2. Metodología

2.1. Descripción del área de estudio

Las subcuencas de los ríos Bolo y Frayle se encuentran localizadas en la cuenca Alta del río Cauca, en el suroriente del departamento del Valle del Cauca, Colombia ⁽⁵⁴⁾, en jurisdicción de los municipios de Pradera, Florida, Palmira y Candelaria. Cuenta con un área aproximada de 1,114 km² (Figura 1).

El río Bolo nace en la Laguna de Los Cristales, ubicado en el Páramo de las Hermosas, en el corregimiento de Bolo Azul del municipio de Pradera, en límites con el departamento del

Tolima y el municipio de Florida, a 3,800 m.s.n.m. ⁽⁵⁵⁾. Este río fluye por la vertiente occidental de la cordillera central, con una longitud aproximada de 64 km. El río Frayle nace en límites con los departamentos de Cauca y Tolima, en las lagunas Frayles, a 3,900 m.s.n.m., también fluye por la vertiente occidental de la cordillera central, recorriendo cerca de 70 km antes de su confluencia con el río Bolo. En la zona plana del Valle del Cauca estos dos ríos se unen y forman el río Guachal, que finalmente desemboca al río Cauca.

El 49% (545 km²) del área de las subcuencas de los ríos Bolo y Frayle se encuentra a menos de 1,000 m.s.n.m. en clima cálido con temperaturas que oscilan entre 25 y 35°C y precipitaciones anuales de 900 a 1,200 mm; el 23% (256 km²) del área de las dos subcuencas se encuentra a una altitud media de 1,500 m.s.n.m. y precipitaciones anuales entre 1,400 a 1,800 mm. El 28% del área restante se distribuye en escalas climáticas entre frío y páramo con elevaciones mayores a 2,000 m.s.n.m. y con precipitaciones anuales entre 1,400 – 2,200 mm ⁽⁵⁴⁾.

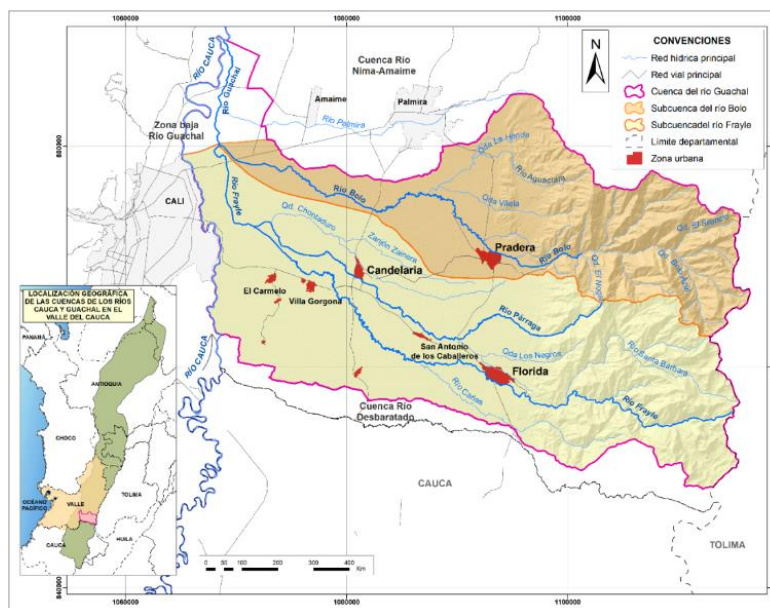


Figura 1. Localización de las subcuencas de los ríos Bolo y Frayle ⁽⁵⁴⁾

La población de las subcuencas de los ríos Bolo y Frayle está distribuida en los municipios de Candelaria, Palmira, Pradera y Florida. En la subcuenca del río Bolo se encuentran asentadas 62,075 personas, de las cuales el 78% se localizan en la cabecera municipal de Pradera; de esta población, el 95% corresponde a población nucleada y el 5% restante es población dispersa. La población localizada en la subcuenca del río Frayle corresponde a un total de 126,487 habitantes distribuidos en las cabeceras municipales de Florida y Candelaria y aproximadamente 25 corregimientos. El 96% de la población se encuentra nucleada, el restante 4% de la población es dispersa. Los dos centros poblados más grandes son las cabeceras municipales de Florida, con 43,005 habitantes (34% de la población total) y Candelaria con 22,767 habitantes (18% de la población total). Los corregimientos con más de 7,000 habitantes son El Carmelo, San Antonio de los Caballeros, y Villagorgona ⁽⁵⁴⁾.

En la parte alta y media de las dos cuencas, se aprovecha el agua de los ríos Bolo y Frayle para el consumo humano, la realización de actividades agropecuarias, la extracción de materiales y como cuerpos de agua receptores de vertimientos. En la parte plana, el agua es usada principalmente para el riego de los cultivos de caña de azúcar que rodean los ríos Bolo, Frayle y sus principales afluentes ⁽⁵⁴⁾.

2.2. Planeación basada en escenarios

El desarrollo de una visión compartida relacionada con el estado futuro del recurso hídrico, para las cuencas de estudio, se construyó a partir de una propuesta de visión que fue discutida y concertada en 5 talleres con la participación de los diferentes actores involucrados en la gestión del agua en el territorio, como son: las asociaciones de usuarios del agua, empresas de servicios públicos, alcaldías, representantes de los gremios

(azucarero, porcícola y avícola), profesionales de la Autoridad Ambiental (Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca) y centros de educación e investigación presentes en las cuencas de los ríos Bolo y Frayle. El primer taller abordó la socialización y el diagnóstico de los conflictos relacionados con el uso del agua. En el segundo y tercer taller se aplicó la metodología de planificación estratégica desarrollada por Schwartz ⁽⁵⁶⁾, en la cual se construyó la visión y se formularon los escenarios. En el cuarto taller se definieron las metas y estrategias de los sectores productivos presentes en las cuencas de estudio. El último taller correspondió a la socialización de los resultados del proyecto en el cual se enmarca la investigación.

A partir de la problemática y de los conflictos del recurso hídrico identificados en la fase de diagnóstico, realizada por la Autoridad Ambiental de la zona de estudio ⁽⁵⁴⁾, se definieron las variables claves para la definición de escenarios, lo anterior a través del mapeo social sistematizado en una base de datos geográfica en ARC GIS 10.2. Los principales conflictos fueron documentados a partir de información secundaria histórica y mediciones en campo. Posteriormente las variables claves definidas fueron clasificadas considerando el grado de incertidumbre e importancia, según la metodología formulada por Schwartz ⁽⁵⁶⁾. Las variables con alta importancia e incertidumbre son la base para el desarrollo de los escenarios narrativos (Figura 2).

Aumenta importancia ↑	Alta importancia y baja incertidumbre I	Alta importancia y alta incertidumbre II
	Baja importancia y baja incertidumbre III	Baja importancia y alta incertidumbre IV
		Aumenta incertidumbre →

Figura 2. Factores de clasificación para escenarios narrativos ⁽⁵⁶⁾

Las estrategias de prevención y control de la contaminación estuvieron enfocadas al mejoramiento de la calidad del agua de los ríos Bolo y Frayle, mediante la reducción de las cargas contaminantes vertidas a los cuerpos de agua. Estas se identificaron a través del desarrollo de los 5 talleres citados anteriormente, donde se presentaron las líneas estratégicas y se definieron metas a implementar en el corto mediano y largo plazo. Estas estrategias, en armonía con la situación actual en el manejo de vertimientos, la normatividad vigente y los criterios de calidad definidos para el vertimiento y usos del agua en Colombia.

El desarrollo de escenarios narrativos consistió en definir las posibles combinaciones entre las variables claves, en sus diferentes estados, y las estrategias a implementar. Los criterios para la construcción de los escenarios narrativos fueron:

- **Línea Base (año 2015):** corresponde a la información, en cuanto a cantidad y calidad, que presenta el río para la condición inicial y los datos de las variables de estado de las fronteras internas y externas del modelo de calidad. Incluyó la información relacionada con las cargas contaminantes aportadas por los diferentes sectores, el estado en el manejo de aguas residuales y la implementación de sistemas de tratamiento de agua residual (STAR), la existencia de permisos de

vertimiento y planes de reconversión tecnológica. La línea base tuvo el año 2015 como punto de partida y sobre este se proyectaron los escenarios futuros para las aplicaciones del modelo de cantidad y calidad de agua. En función de la cantidad, esta condición correspondió al 75% de probabilidad de ocurrencia en la curva de duración de caudales (CDC) para un periodo de baja humedad ^(55, 57).

- **Horizonte de Planificación:** correspondiente al periodo 2016-2036. La evaluación de las estrategias se realizó para tres quinquenios: al año 2020 (corto plazo), 2025 (mediano plazo) y 2036 (largo plazo).

2.3. Proyección de las cargas vertidas en línea base y escenarios

Se formularon tres escenarios para la evaluación de la calidad y cantidad del recurso hídrico en los ríos de estudio. Los escenarios fueron contruidos mediante la combinación de variables clave y dos estrategias de prevención control de contaminación como son la implementación de STAR y el reúso agrícola (Tabla 1).

Para la estrategia de implementación de STAR, se consideró el cumplimiento de los criterios de calidad requeridos para el vertimiento a cuerpos

Tabla 1. Combinación de variables claves y estrategias para los escenarios de control de contaminación

Características de los escenarios			E1	E2	E3
Variables clave	Cambio Climático	Serie histórica	X	X	X
	Crecimiento sector agroindustrial	Tendencia	X	X	X
Estrategias	Municipios y corregimientos	Implementación de STAR y criterios de calidad para el vertimiento ⁽⁴⁸⁾ .		X	X
		Reúso de aguas residuales ⁽⁴⁹⁾ .			X
	Sectores Avícola, Porcícola y Azucarero	Implementación de STAR y criterios de calidad para el vertimiento ⁽⁴⁸⁾ .		X	X

de agua superficiales (Resolución 0631 de 2015), para los municipios y los sectores avícola, porcícola y azucarero. Para la estrategia de reúso de agua residual tratada en actividad agrícola, se consideró el objetivo de calidad acorde con la normatividad local (Resolución 1207 de 2014) y los estándares internacionales de la OMS ⁽⁵⁸⁾ y la FAO ⁽⁵⁹⁾. Adicionalmente para esta última estrategia, en cabeceras municipales y corregimientos, se realizó un análisis preliminar del potencial de reúso de las aguas residuales tratadas de los grandes centros poblados que vierten sus aguas residuales en los ríos Bolo y Frayle. Para esto se tuvo en cuenta la disponibilidad de área, el módulo de riego, la vulnerabilidad del acuífero y la infraestructura requerida para su implementación, medida en términos de longitud de tubería, de acuerdo con la metodología desarrollada por Jaramillo ⁽⁸⁾

Para la línea base (año 2015) y los escenarios, se realizó la proyección de las cargas de DBO_5 vertidas, teniendo como punto de partida la población para el periodo 2016-2036, con base en la información de crecimiento para las cabeceras municipales y de corregimientos reportadas por el DANE ⁽⁶⁰⁾. Para estimar la carga de materia orgánica se tuvo en cuenta una producción per cápita para el departamento del Valle del Cauca de 0.042 kg de DBO_5 /día/habitante y 0.046 kg de SST/día/habitante ⁽⁶¹⁾.

En el sector agroindustrial, la proyección de las cargas vertidas en los ríos Bolo y Frayle, se estimó asumiendo que la contaminación aumenta de manera proporcional al crecimiento de la producción anual, para el periodo de proyección. Para los Sectores Porcícola y Avícola, se estimaron las tasas de crecimiento teniendo en cuenta: la tendencia histórica de crecimiento del sector y su variación porcentual, según el Censo Pecuario Nacional ⁽⁶²⁾. Para el sector azucarero se consideraron las proyecciones de crecimiento realizadas por ASOCAÑA ⁽⁶³⁾.

2.5. Aplicaciones del modelo y análisis de calidad del agua

El objeto de modelación correspondió a la evaluación de la calidad y la cantidad de agua de los ríos Bolo y Frayle, mediante la implementación del modelo QUAL2K. El sistema modelado se representó en tramos y fronteras. Los tramos se definieron en puntos (nodos) con los siguientes criterios: estaciones de caudal, puntos de monitoreo de calidad, cambios topográficos significativos entre estaciones en los cauces, vertimientos importantes en términos de carga, extracciones importantes en términos de caudal y confluencias entre los ríos Bolo, Frayle, Párraga, Guachal y Cauca.

Las entradas del sistema correspondieron a los puntos del río donde aguas recibe vertimientos, retornos de agricultura y ríos tributarios. Las salidas corresponden al punto aguas abajo donde finaliza la esquematización y las extracciones (Figura 3). El set de datos de entradas y salidas del modelo se construyó con base en los registros históricos de la CVC, en un periodo de información comprendido entre 1980 hasta 2015 y mediante la ejecución de una campaña de monitoreo con seguimiento a dos masas de agua, una de ellas empleadas para el proceso de calibración.

El modelo desarrollado fue calibrado para la condición asociada a la campaña de monitoreo realizada en el mes marzo de 2015 e implementado para la condición de línea base (año 2015). El set de datos obtenido de la campaña de monitoreo para el proceso de calibración consideró el seguimiento de la masa de agua (M1) en condiciones de caudal bajo, en un tiempo de tránsito de 24 horas. La modelación hidráulica fue simulada con el método de Manning con flujo permanente y los parámetros de calidad evaluados en la

modelación corresponden a la DBO₅ y el OD, asociados con el caudal. Las secciones hidráulicas requeridas en el modelo fueron estimadas considerando valores de ancho del canal y taludes como secciones trapezoidales, equivalentes a las secciones medidas en la campaña de monitoreo citada anteriormente.

Para la modelación de los procesos de transferencia de calor entre aire-agua-sedimentos, la radiación solar fue estimada con el método Bras con un coeficiente de turbiedad atmosférica de 2 asociado a un *cielo claro* y para el cálculo del flujo descendente de radiación de onda larga procedente de la atmosfera, se utilizó el método Brunt ⁽⁶⁴⁾. En los parámetros de calor de sedimentos se utilizaron valores recomendados por Chapra *et al.* ⁽⁶⁴⁾ para ríos, correspondientes a 0.005 cm²/s para la difusión térmica y 1.6 g/cm³ para la densidad de sedimentos. Para la modelación de calidad del agua se utilizaron, para producción y consumo de oxígeno por fotosíntesis y respiración, las tasas de cambio de 2,69 gO₂/gC y 4,57 gO₂/N según la estequiometría de estos procesos ⁽⁶⁴⁾.

3. Resultados y discusión

3.1. Identificación de conflictos

Los principales conflictos identificados en las cuencas de los ríos Bolo y Frayle fueron clasificados en 3 categorías: *Categoría I. Conflictos asociados al uso del suelo:* Con base en los estudios realizados por la CVC ⁽⁶⁵⁾ el 23% de la subcuenca del río Bolo presentan un grado de conflicto Alto, donde las tierras forestales han sido destinadas al uso y aprovechamiento de cultivos con mecanización agrícola y bosques cultivados que han generados grados de erosión desde moderada a muy severa. El 37% presenta un grado de conflicto Bajo, que corresponde a áreas donde con impactos menores por la utilización del suelo. El 40% de la subcuenca está catalogada en Equilibrio, o que no presenta conflicto, y se constituye fundamentalmente por las actividades relacionadas con la conservación y aprovechamiento sostenible de los recursos. De manera similar en la subcuenca del río Frayle, el 9% de la cuenca se encuentra en Alto grado de conflicto, el 61% en Bajo grado y el 30% no presenta conflicto.

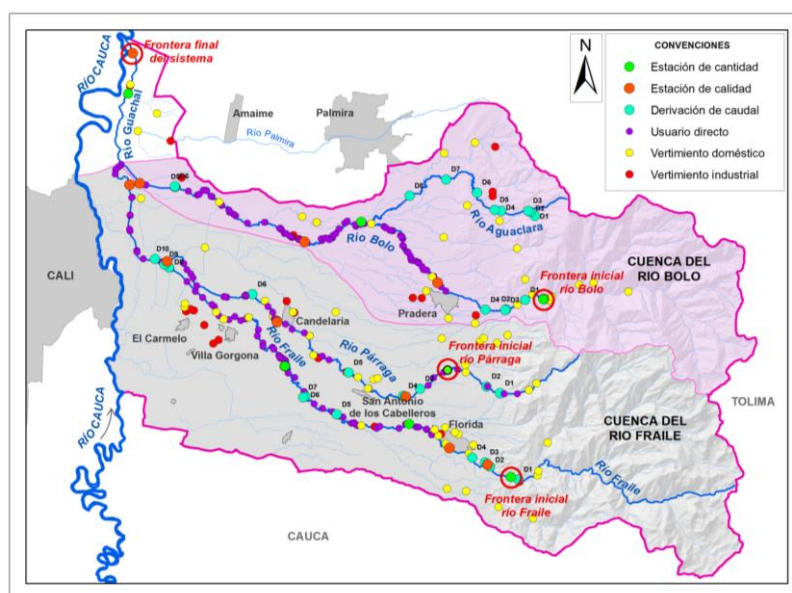


Figura 3. Esquematización de los ríos objeto de modelación ⁽⁵⁴⁾

Categoría II. Conflictos asociados a la oferta y demanda: El principal problema asociado a la gestión de la oferta corresponde al deficiente monitoreo de la cantidad de agua. Para el cauce principal del río Bolo, sólo una de las 4 estaciones cuenta con monitoreo de cantidad y en el caso del río Frayle, solo 2 de 5 estaciones. Esto se constituye en un limitante para asociar la información de calidad con cantidad. Los principales problemas asociados a la gestión de la demanda corresponden a: i) limitaciones en la distribución de agua debido a la falta de infraestructura de captación y medición ⁽⁶⁶⁾ ii) combinación entre una alta demanda de agua y uso ineficiente de agua para riego. El 80% del agua es demanda por el sector agrícola y las pérdidas son superiores al 60% ⁽⁶⁶⁾ iii) De acuerdo con la estimación de los indicadores de gestión del recursos hídrico ⁽⁶⁶⁾ el Índice de Uso del Agua (IUA) fue catalogado como crítico con un valor de 123% y 110% para los río Bolo y Frayle respectivamente, indicando que la presión de la demanda supera la oferta. El Índice de Vulnerabilidad por Desabastecimiento Hídrico (IVH) indica condiciones de vulnerabilidad media para el río Bolo y vulnerabilidad alta para el río Frayle. El Índice de Retención y Regulación Hídrica (IRH) presenta un valor alto 79% para el río Bolo y moderado 66% para el río Frayle. iv) en la demanda del sector doméstico, se presentan pérdidas en los sistemas de distribución de agua potable superiores al 30% ⁽⁶⁶⁾.

Categoría III. Conflictos asociados a la calidad del agua para los diferentes usos: En esta categoría se evidenciaron los siguiente conflictos: i) No todas las estaciones o puntos de monitoreo de la calidad del agua están asociadas con la medición de cantidad ii) solo 6 de los centros poblados de la cuenca del río Bolo cuentan con sistema de alcantarillado ⁽⁶⁶⁾ iii) El tratamiento de las aguas residuales municipales es limitado. En la cuenca del río Bolo, el municipio de Pradera es el mayor aportante de

carga contaminante, con 2,021 kg/d y su Sistema de Tratamiento de Agua Residual (STAR) no ha iniciado operación a pesar de estar construido desde el año 2011. Los demás asentamientos nucleados no cuentan con sistema de tratamiento de aguas residuales. En la subcuenca del río Frayle, los municipios de Florida y Candelaria vierten sus aguas residuales sin tratamiento a los ríos Frayle y Párraga ⁽⁶⁶⁾.

3.2. Planeación basada en escenarios

Con base en los talleres de diagnóstico realizados en la investigación, se identificaron los conflictos relacionados con la gestión del recurso hídrico, claves para la construcción de la visión compartida, que representó el punto de partida de la formulación de los escenarios. A partir de los talleres y discusiones con actores que intervienen en el manejo del agua, la visión en la planificación del recurso hídrico de los ríos Bolo y Frayle correspondió a: *“En el año 2036 la gestión del recurso hídrico de los ríos Bolo y Frayle permitirá disponer de la cantidad y mejorar la calidad del agua para suplir las necesidades de los ecosistemas y de los diferentes usuarios, a través de la planificación, conservación, protección y aprovechamiento sostenible de los recursos hídricos, con equidad social, educación y eficiencia técnica, económica y ambiental”*.

Así mismo, las variables claves para alcanzar la visión fueron identificadas y clasificadas en 5 componentes principales: ambiental, institucional, tecnológico, económico y social (Tabla 2).

De las variables clave se identificaron las fuerzas motoras, que son los principales factores que influyen en los cambios graduales que se describen en el escenario. Las fuerzas motoras se derivan de las variables clave y su característica es que no son susceptibles de ser intervenidas por los actores, mientras que

Tabla 2. Variables claves clasificadas por componentes principales

Componente	Variable clave
Ambiental	Cambio climático*
	Variabilidad climática
Institucional	Trabajo interinstitucional
	Planificación territorial (áreas de expansión urbana)
	Cambios en el uso del suelo
	Implementación y seguimiento de la normatividad ambiental (uso eficiente del agua y control de vertimientos)
	Cambios en las políticas y normas
Tecnológico	Implementación de tecnologías para el tratamiento de las aguas residuales domésticas e industriales
	Implementación de tecnología para la minimización del uso del agua en el sector agroindustrial
	Desarrollo tecnológico (sistemas de tratamiento de aguas residuales, sistemas de irrigación de cultivos)
Económico	Crecimiento del sector agroindustrial*
Social	Factores sociales (conflicto armado)
	Educación y cultura ambiental
	Crecimiento demográfico

*Variables claves con Alta Incertidumbre e Importancia.

algunas variables claves pueden ser intervenidas por las acciones para lograr la visión ⁽⁵⁶⁾. Las variables claves que fueron identificadas como fuerzas motoras para la construcción de escenarios fueron: Cambio Climático (CC) y crecimiento del sector agroindustrial. Para la variable CC se consideraron los escenarios formulados por la Autoridad Ambiental ⁽⁶⁷⁾ a escala regional. En este caso de estudio, las estrategias se evaluaron sin variaciones de temperatura y un decremento del 4% de la precipitación en el escenario tendencial. Para el crecimiento del sector agroindustrial se consideró la información de tendencia en el crecimiento (Tabla 3).

3.3. Escenarios Narrativos

Los escenarios narrativos fueron contruidos considerando la combinación de las variables clave y estrategias de control de contaminación (Tabla 1) y se presentan a continuación:

Escenario E1 - Crecimiento sectorial sin implementación de estrategias: La población y la producción agroindustrial siguen las tendencias actuales de crecimiento. Sin embargo, la situación de manejo de las aguas residuales (AR) y demanda de agua permanecen en el tiempo, sin incorporar nuevas estrategias diferentes a las ya existentes en la Línea Base.

Escenario E2 - Implementación de STAR en los principales centros poblados y sectores productivos: El aumento de la población y la producción de la agroindustria siguen las tendencias actuales de crecimiento, a la vez que se implementan y mejoran los sistemas de tratamiento de aguas residuales existentes en todos los sectores productivos, para alcanzar los valores establecidos en la Resolución 0631 de 2015⁽⁴⁸⁾.

Escenario E3 - Reúso de las aguas residuales tratadas de centros poblados en actividad

Tabla 3. Tendencia de crecimiento del sector agroindustrial

Sector	Tasa de crecimiento del sector	Descripción
Avícola	0.3% geométrico anual (tendencia) ±3% variación	Tendencia histórica de crecimiento del sector en Colombia y variación considerando la diferencia entre los crecimientos de los periodos 2007 – 2011 y 2011 – 2014 ⁽⁶²⁾
Porcícola	1.6% geométrico anual (tendencia) ±1% variación	Tasa basada en el crecimiento del sector durante el periodo 2009 – 2014 ⁽⁶²⁾
Azucarero	0.8% geométrico anual. (tendencia)	Se tiene en cuenta la proyección realizada por ASOCAÑA ⁽⁶³⁾ para el periodo 2010-2032.
Agrícola	0%	La expansión en área se considera marginal, dado que hay restricciones de disponibilidad y de aptitud agroclimática para incorporar nuevas tierras. Es decir, no se considerará crecimiento de la frontera agrícola.

agrícola: El aumento de la población y la producción de la agroindustria siguen las tendencias actuales de crecimiento, a la vez que se implementan y mejoran los STAR existentes para alcanzar los valores establecidos en la Resolución 1207 de 2014 ⁽⁴⁹⁾ y con cumplimiento de los estándares internacionales de la FAO ⁽⁵⁹⁾ y WHO ⁽⁵⁸⁾ en relación con la calidad microbiológica del efluente para ser reusado en agricultura. Los STAR deben garantizar en el efluente una concentración menor a 1 HH/L y 1×10^4 NMP/100mL de Coliformes. Se implementan estrategias de reúso de aguas residuales tratadas provenientes de las cabeceras de los centros poblados en actividad agrícola (Tabla 4).

De acuerdo con lo anterior, se propone que al menos al año 2025, las cabeceras municipales de Candelaria y Pradera y los corregimientos de Villagorgona y San Antonio de los Caballeros, realizarán reúso de las aguas residuales tratadas. El caudal total estimado de reúso sería de 231 L/s y el área requerida para irrigación de 29 km². Se excluye la cabecera municipal de Florida dado que ésta se encuentra en zona de alta vulnerabilidad del acuífero ⁽⁶⁸⁾. Es necesario tener en cuenta que, debido a la ausencia de

STAR (al año 2015) y de información de calidad del vertimiento, no se consideraron los criterios de calidad establecidos para el reúso de la Resolución 1207 de 2014.

3.4. Resultados de aplicación del modelo de calidad

En las Figuras 4 y 5 se presentan los resultados de la aplicación del modelo de calidad para los parámetros DBO₅ y el OD en los escenarios planteados para los ríos Frayle y Bolo.

Línea base y Escenario E1 - Río Frayle

De acuerdo con la Figura 4, aguas arriba del km 40, el río Frayle presenta una disminución progresiva en los niveles de oxígeno disuelto pasando de 7.8 mg/l a 4.5 mg/l. Así mismo, la concentración de DBO₅ se mantiene.

Para el E1, la situación en calidad del río se vuelve aún más crítica en relación con la concentración de DBO₅ y los niveles de OD en el río, considerando que este escenario es una proyección de la línea base donde la población y el sector industrial siguen las tendencias de crecimiento hasta el año 2036 y no se

Tabla 4. Potencial de reúso agrícola de AR tratadas de centros poblados

Centro poblado	Caudal de reúso (L/s)	Área de riego (Ha)	Vulnerabilidad del acuífero ⁽⁶⁸⁾	Potencial de Reúso
Candelaria	76	95	Baja	SI
Pradera	90	112	Moderada	SI
San Antonio de los Caballeros	15	19	Baja	SI
Villagorgona, Buchitolo	30	38	Baja	SI
El Carmelo, San Joaquín	21	26	Baja	SI
Total	231	290		

implementa ninguna estrategia para el control de la contaminación.

Escenarios E2 y E3 - Río Frayle

El E2, presenta la implementación de los sistemas de tratamiento de aguas residuales en los principales centros poblados y la agroindustria y el cumplimiento de la normatividad de vertimientos a cuerpos de agua superficial (Resolución 0631 de 2015), y traería consigo un impacto positivo en el mejoramiento de la calidad del agua del río Frayle al año 2036. Aguas arriba de la confluencia con el río Bolo, las concentraciones de DBO₅ se mantendrían inferiores a 10.3 mg/l y la concentración de OD alcanzaría los 3.5 mg/l en el punto de la confluencia con el río Bolo (km 10.9) (Figura 4).

Para el E3, la reutilización de las aguas residuales tratadas de centros poblados en actividad agrícola impactará positivamente la calidad del agua del río Frayle, y esto se refleja en la disminución de las concentraciones de DBO₅ que se mantendrían por debajo de los 8 mg/l aguas arriba de la confluencia con el río Bolo y con niveles de OD de 4.5 mg/l en el mismo punto (Figura 4). Aunque para la cabecera municipal de Florida no fue considerada la estrategia de reuso, debido a que ésta se encuentra en zona de alta vulnerabilidad del acuífero ⁽⁶⁸⁾, la implementación del STAR

bajo, el cumplimiento de la normativa, es clave para alcanzar un mejoramiento en la calidad el río.

Línea Base y Escenario E1 - Río Bolo

De acuerdo con la Figura 5, para la línea base y el escenario E1, aguas abajo del km 18, se observa un punto crítico en cuanto al deterioro de la calidad del agua del río Bolo, si se tiene en cuenta que, en el tramo anterior a este punto, se realizan importantes vertimientos directos e indirectos de aguas residuales provenientes de los sectores industrial y doméstico. A través del río Agua Clara se vierten aguas residuales de la industria avícola, Pollos A y a través del Zanjón Tamboral, las aguas residuales sin tratar del municipio de Pradera, el cual cuenta con una población de 48,115 habitantes (línea base al 2015). Los resultados de la modelación para el escenario E1, indican que se alcanzarían niveles mínimos de OD de 1.0 mg/l y concentraciones de 28 mg/l de DBO₅ (km 15). Posterior al punto crítico, y por efecto de la capacidad de autodepuración del río, se presentaría una recuperación en los niveles de OD a 3.0 mg/l en la confluencia con el río Frayle. Sin embargo, las concentraciones de DBO₅ alcanzarán valores de 34.8 mg/l en la entrega al río Frayle, debido al vertimiento de aguas residuales de los sectores porcícola, azucarero y doméstico.

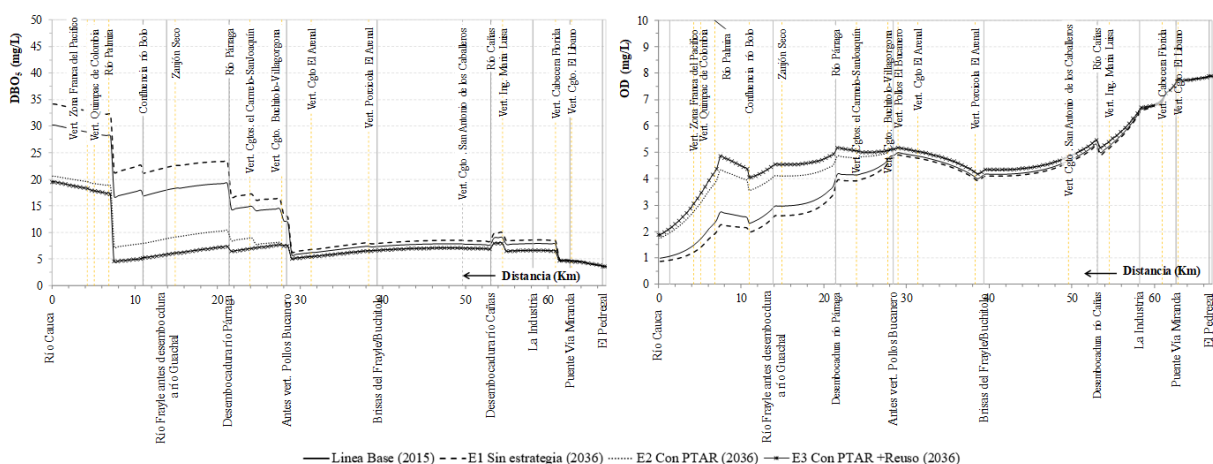


Figura 4. Perfiles de calidad de la DBO₅ y el OD del río Frayle para la condición de Línea Base y el año 2036 para los escenarios E1, E2 y E3.

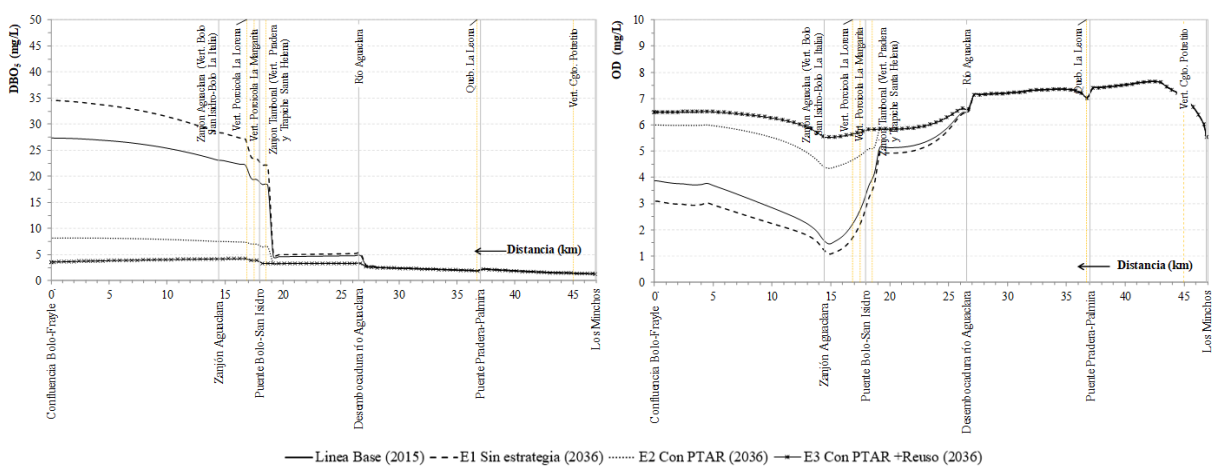


Figura 5. Perfiles de calidad de la DBO₅ y el OD del río Bolo para la condición de Línea Base y el año 2036 para los escenarios E1, E2 y E3.

Escenarios E2 y E3 - Río Bolo

Para el escenario E2, el mayor impacto en la calidad del agua del río se presentará con la puesta en funcionamiento del STAR del municipio de Pradera. El punto crítico (km 15) de contaminación presentaría niveles de OD de 4.5 mg/l y concentraciones de DBO₅ de 7.5 mg/l (Figura 5).

En el escenario E3, el reúso de las aguas residuales tratadas del Municipio de Pradera, como estrategia para el control de la contaminación, tendrá impactos positivos

notorios en la recuperación de la calidad del agua del río Bolo. Con base en los resultados de modelación el río Bolo alcanzará en este escenario valores inferiores a 5 mg/l de DBO₅ en todo río y de 5.5 mg/l de OD, en el tramo crítico hasta 6.5 mg/l en la confluencia con el río Frayle.

3.5. Resultados de proyección de cargas contaminantes

En la Tabla 5 se presentan las cargas vertidas de DBO₅ para los diferentes escenarios y quinquenios propuestos para los ríos Bolo y

Tabla 5. Cargas vertidas de DBO₅ para los escenarios formulados.

Rio	Año	Carga de DBO ₅ (Kg/d)		
		E1	E2	E3
Río Bolo	2015	Carga contaminante de DBO ₅ vertida al río Bolo= 3,324 kg/d		
	2020	3,515	1,093	1,093
	2025	3,717	826	250
	2036	4,207	935	271
Río Frayle	2015	Carga contaminante de DBO ₅ vertida al río Frayle= 8007 kg/d		
	2020	8,338	4,943	4,943
	2025	8,689	4,041	3,346
	2036	9,534	4,420	3,654

Frayle. Para el río Frayle, al final del periodo de planificación (año 2036), en el escenario E2, que incluye la implementación de un STAR, se verterá una carga de DBO₅ de 4,420 Kg/d, correspondiente a una reducción del 54% en relación con la carga producida y proyectada al mismo año (9,534 Kg/d). Para el escenario E3 que incluye el reúso de agua en el sector agrícola, la carga de DBO₅ presentará una reducción del 62% de la carga producida.

Para el río Bolo, a partir del año 2025 y hasta el 2036, la implementación del reúso reducirá significativamente la carga vertida de DBO₅ en un 94%, pasando de 4,207 kg/d a 271 kg/d, al final del horizonte de planificación. Para el escenario E2 cuya estrategia principal es la implementación de STAR, la carga vertida de DBO₅, 935 kg/d, presentará una reducción del 78% en relación con la carga producida 4,207 kg/d.

4. Conclusiones

En esta investigación se construyó una visión compartida, acerca del estado de cantidad y calidad del recurso hídrico de las cuencas de los ríos Bolo y Frayle, para un horizonte a largo plazo. La visión compartida fue desarrollada con los actores sociales en las cuencas de estudio y fue evaluada a través de la formulación de escenarios prospectivos en un modelo numérico.

El resultado de la evaluación de escenarios permitió a los actores conocer qué tipo de estrategias deben ser priorizadas e implementadas para el alcance de la visión formulada y cuáles son las fuerzas motrices que pueden impulsar el cambio en la gestión de las aguas residuales en las cuencas de estudio.

La implementación del reúso con aguas residuales municipales tratadas, en actividad agrícola, como estrategia en la planificación, se convierte en un aspecto clave para alcanzar la sostenibilidad en la gestión de los recursos hídricos dado que, disminuye la presión sobre los cuerpos de agua receptores de vertimientos y mejoran su calidad de agua. Esto se ve reflejado en la reducción de las concentraciones y cargas de DBO₅ vertida y en el aumento de los niveles de OD tanto en el río Bolo como en el río Frayle, resultado de este estudio. Sin embargo, es necesario realizar la evaluación de los costos asociados a la estrategia de reúso planteada, lo que permitiría apoyar la toma de decisiones por parte de los municipios localizados en las cuencas estudiadas.

En esta investigación, se empleó la modelación como una herramienta para la toma de decisiones, desde el enfoque de la planificación hídrica. Algunas estrategias de control y prevención de la contaminación hídrica pueden

no resultar favorecedoras para los cuerpos hídricos, esto debido a la capacidad de depuración de cada sistema y al impacto ambiental en su condición de línea base. En el desarrollo de este estudio, la modelación numérica permitió evidenciar para los ríos estudiados, que la implementación de STAR y reúso agrícola, desde el punto de vista ambiental, son técnicamente viables en un horizonte de largo plazo. Pese a esto, la toma de decisiones debe ser soportada con otro tipo de estudios (viabilidad financiera y económica) para su implementación.

El impacto de la reutilización de agua residual municipal en actividades agrícolas debe ser evaluado integralmente, considerando los efectos e impactos negativos no solo en la matriz hídrica. Deben incluirse una evaluación a los sistemas asociados suelo y cultivo. En este sentido, la investigación realizada presentó limitaciones en cuanto a la evaluación de otros compuestos presentes en las aguas residuales municipales, como son el contenido de nitratos, fosfatos y compuestos emergentes, que pueden impactar significativamente la productividad agrícola por afectación en suelos y cultivos. Lo anterior, sucede como resultado de un ejercicio de ordenamiento del recurso hídrico superficial.

5. Agradecimientos

Los autores agradecen al equipo de trabajo del Instituto Cinara de la Universidad del Valle y a la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca, por el desarrollo Convenio Interadministrativo No. 025 *"Elaboración de los insumos técnicos a ser considerados en la formulación del Plan de Ordenamiento del Recurso Hídrico de los ríos Bolo y Frayle"*, especialmente a las Ingenieras Amparo Duque Vargas y Paola Janeth Patiño Triana supervisoras del convenio.

6. Referencias

- (1) Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial. Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico. Bogotá D.C.; 2010. p. 124.
- (2) Betancur T, Campiño AK, García V. Una metodología para la formulación de planes de ordenamiento del recurso hídrico. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*. 2011;10(19):67-78.
- (3) Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. Guía técnica para la formulación de planes de ordenamiento del recurso hídrico. Bogotá D.C.; 2014. p. 58.
- (4) Moriarty P, Batchelor C, Laban P. Using Visions, Scenarios and Strategies within the EMPOWERS Planning Cycle for IWRM. 2005. EMPOWERS Working Paper No.: 4.
- (5) Helmer R, Hespanhol I, World Health Organization (WHO). Water pollution control: a guide to the use of water quality management principles. London: E&FN Spon. 1997. p. 510.
- (6) Brega Filho D, Mancuso P. Conceito de reúso de água. In: Pedro Caetano Sanches Mancuso, Hilton Felício dos Santos, editors. *Reúso de Água* Capítulo 2. Universidade de São Paulo - Faculdade de Saúde Pública. ABES2003. p. 579.
- (7) Manga J, Logreira N, Serrait J. Reuso de aguas residuales: Un recurso hídrico disponible. *Ingeniería y desarrollo*. 2001;9:12–21.
- (8) Jaramillo MF. Potencial de reuso de agua residual doméstica como estrategia para el control de la contaminación en el valle

- geográfico del río Cauca. [master's thesis]. Cali: Universidad del Valle; 2014. 187 p.
- (9) United Nations World Water Assessment Programme. The United Nations World Water Development Report 2017: Wastewater, The Untapped Resource. France: UNESCO; 2017.
- (10) Jaramillo MF, Restrepo I. Wastewater Reuse in Agriculture: A Review about Its Limitations and Benefits. *Sustainability*. 2017;9(10):1734. Doi:10.3390/su9101734.
- (11) Becerra C, Lopes A, Vaz I, Silva E, Manaia C, Nunes O. Wastewater reuse in irrigation: A microbiological perspective on implications in soil fertility and human and environmental health. *Environment Int*. 2015;75:117-35. Doi: 10.1016/j.envint.2014.11.001.
- (12) Winpenny J, Heinz I, Koo-Oshima S. Reutilización del Agua en Agricultura: ¿Beneficios Para Todos? Roma: Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. Informe sobre temas hídricos (FAO). 2013. (Informes sobre temas hídricos). Report No.: 35;124.
- (13) Foster S, Hirata R, Gomes D, D'Elia M, Paris M. Protección de la calidad del agua subterránea. Guía para empresas de agua, autoridades municipales y agencias ambientales. 1era ed. Mundi-Prensa, editor. Washington DC: Banco Mundial; 2003. p. 128.
- (14) Bloom P. Soil pH and pH buffering. In: Sumner M, editor. *Handbook of soil science: properties and processes*. United State: CRC Press; 2000. p. B333-B52.
- (15) Fierer N, Jackson RB. The diversity and biogeography of soil bacterial communities. *Proceedings of the national academy of sciences of the USA*. 2006;103(3):626-31. Doi: 10.1073/pnas.0507535103.
- (16) Lauber CL, Hamady M, Knight R, Fierer N. Pyrosequencing-based assessment of soil pH as a predictor of soil bacterial community structure at the continental scale. *Applied and environmental microbiology*. 2009;75(15):5111-20. Doi: 10.1128/AEM.00335-09.
- (17) Rousk J, Bååth E, Brookes P, Lauber C, Lozupone C, Caporaso G, et al. Soil bacterial and fungal communities across a pH gradient in an arable soil. *The ISME journal*. 2010;4(10):1340-51. Doi: 10.1038/ismej.2010.58.
- (18) Rattan R, Datta S, Chhonkar P, Suribabu K, Singh A. Long-term impact of irrigation with sewage effluents on heavy metal content in soils, crops and groundwater—a case study. *Agriculture, Ecosystems & Environment*. 2005;109(3):310-22. Doi: 10.1016/j.agee.2005.02.025
- (19) Sparks D. *Environmental soil chemistry*. 2nd Ed. Massachusetts: Academic press; 2003. 352 p.
- (20) White PJ, Greenwood DJ. Properties and management of cationic elements for crop growth. In: Gregory PJ, Nortcliff S, editors. *Soil Conditions and Plant Growth*. 1st ed. Hoboken: John Wiley & Sons, Ltd; 2013. p. 369–82.
- (21) Julca A, Meneses L, Blas R, Bello S. La materia orgánica, importancia y experiencia de su uso en la agricultura.

- Idesia. 2006;24(1):49-61. Doi: 10.4067/S0718-34292006000100009.
- (22) Andrade M, Marcet P, Reyzábal M, Montero M. Contenido, evolución de nutrientes y productividad en un suelo tratado con lodos residuales urbanos. *Edafología*. 2000;7(3):21-9.
- (23) Macías F. Recuperación de suelos degradados, reutilización de residuos y secuestro de carbono. Una alternativa integral de mejora de la calidad ambiental. In Galicia: IBADER: Instituto de Biodiversidade Agraria e Desenvolvimento Rural; 2004. p. 49–56. (Recursos Rurais).
- (24) Powlson DS, Smith P, Smith JU, editors. *Evaluation of Soil Organic Matter Models: Using Existing Long-Term Datasets*. Hertfordshire, UK: Springer Berlin Heidelberg; 1996. (NATO ASI Series): Series I: Global Environmental Change, Vol. 38.
- (25) Thompson L, Troeh F. *Los suelos y su fertilidad*. 4ta Ed. Barcelona: Editorial Reverté; 1988. 678 p.
- (26) Ranjard L, Richaume A. Quantitative and qualitative microscale distribution of bacteria in soil. *Research in microbiology*. 2001;152(8):707-16. Doi: 10.1016/S0923-2508(01)01251-7.
- (27) Levy G, Lordian A, Goldstein D, Borisover M. Soil structural indices' dependence on irrigation water quality and their association with chromophoric components in dissolved organic matter. *European journal of soil science*. 2014;65(2):197-205. Doi: 10.1111/ejss.12116.
- (28) Murcia M, Calderón O, Díaz J. Impacto de aguas grises en propiedades físicas del suelo. *Tecno Lógicas*. 2014;17(32):57-65.
- (29) Pérez F, Madera C, Echeverri A, Urrutia N. Wastewater reuse: impact on the chemical and macronutritional attributes of an inceptisol irrigated with treated domestic wastewater. *Ingeniería y competitividad*. 2015;17(2):19-28. Doi: 10.25100/iyc.v17i2.2185.
- (30) DeForest J, Zak D, Pregitzer K, Burton A. Atmospheric nitrate deposition, microbial community composition, and enzyme activity in northern hardwood forests. *Soil science society of America*. 2004;68(1):132-8. Doi: 10.2136/sssaj2004.1320.
- (31) Habteselassie M, Xu L, Norton J. Ammonia-oxidizer communities in an agricultural soil treated with contrasting nitrogen sources. *Frontiers in microbiology*. 2013;4:326. Doi: 10.3389/fmicb.2013.00326.
- (32) Haynes R, Naidu R. Influence of lime, fertilizer and manure applications on soil organic matter content and soil physical conditions: a review. *Nutrient cycling in agroecosystems*. 1998;51(2):123-37. Doi: 10.1023/A:1009738307837.
- (33) Knobeloch L, Salna B, Hogan A, Postle J, Anderson H. Blue babies and nitrate-contaminated well water. *Environmental health perspectives*. 2000;108(7):675-8. Doi: 10.1289/ehp.00108675.
- (34) Kuramae E, Gamper H, van Veen J, Kowalchuk G. Soil and plant factors driving the community of soil-borne microorganisms across chronosequences of secondary succession of chalk

- grasslands with a neutral pH. *FEMS microbiology ecology*. 2011;77(2):285-94. Doi: 10.1111/j.1574-6941.2011.01110.x.
- (35) Ramírez K, Craine J, Fierer N. Consistent effects of nitrogen amendments on soil microbial communities and processes across biomes. *Global change biology*. 2012;18(6):1918-27. Doi: 10.1111/j.1365-2486.2012.02639.x.
- (36) Wu R. Eutrophication, water borne pathogens and xenobiotic compounds: environmental risks and challenges. *Marine pollution bulletin*. 1999;39(1-12):11-22.
- (37) Zörb C, Senbayram M, Peiter E. Potassium in agriculture—status and perspectives. *Journal of plant physiology*. 2014;171(9):656-69. Doi: 10.1016/j.jplph.2013.08.008.
- (38) Chee-Sanford J, Mackie R, Koike S, Krapac I, Lin YF, Yannarell A, et al. Fate and transport of antibiotic residues and antibiotic resistance genes following land application of manure waste. *Journal of environmental quality*. 2009;38(3):1086-108. Doi: 10.2134/jeq2008.0128.
- (39) Oliveira MLD, Coraucci FB, Roston D, Stefanutti R, Tonetti A. Evaluation of the productivity of irrigated eucalyptus grandis with reclaimed wastewater and effects on soil. *Water, air & soil pollution*. 2014;225(1830):1-7. Doi: 10.1007/s11270-013-1830-8.
- (40) Henze M, Loosdrecht MCM, Ekama GA, Brdjanovic D, editors. *Wastewater characterization*. In: *Biological Wastewater Treatment: Principles, Modelling and Design*. 1st ed. London: IWA Publishing; 2008. p. 33–52.
- (41) Jimenez B. Wastewater reuse to increase soil productivity. *Water science and technology*. 1995;32(12):173-80. Doi: 10.1016/0273-1223(96)00152-7.
- (42) Lal K, Yadav R, Kaur R, Bundela D, Khan MI, Chaudhary M, et al. Productivity, essential oil yield, and heavy metal accumulation in lemon grass (*cymbopogon flexuosus*) under varied wastewater–groundwater irrigation regimes. *Industrial Crops and Products*. 2013;45:270-8. Doi: 10.1016/j.indcrop.2013.01.004.
- (43) Liu Y, Haynes R. Origin, nature, and treatment of effluents from dairy and meat processing factories and the effects of their irrigation on the quality of agricultural soils. *Critical reviews in environmental science and technology*. 2011;41(17):1531-99. Doi: 10.1080/10643381003608359.
- (44) Matheyarasu R, Seshadri B, Bolan NS, Naidu R. Abattoir wastewater irrigation increases the availability of nutrients and influences on plant growth and development. *Water, air, & soil pollution*. 2016;227-53. Doi: 10.1007/s11270-016-2947-3.
- (45) Moscoso J. Aspectos técnicos de la agricultura con aguas residuales. Lima: Centro panamericano de ingeniería sanitaria y ciencias del ambiente (CEPIS). Organización panamericana de la salud (OPS); 1995.
- (46) Candela L, Fabregat S, Josa A, Suriol J, Vigués N, Mas J. Assessment of soil and groundwater impacts by treated urban wastewater reuse. A case study: Application in a golf course (Girona, Spain). *Science of the total environment*.

- 2007;374(1):26-35. Doi: 10.1016/j.scitotenv.2006.12.028.
- (47) Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural. Decreto 1594 de 1984. Colombia: Diario Oficial No. 36.700 de 1984; 1984.
- (48) Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. Resolución 0631 de 2015. Colombia: Diario Oficial No. 49.486 de 18 de abril de 2015; 2015.
- (49) Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. Resolución 1207 de 2014. Colombia: Diario Oficial No. 49242 del 13 de agosto de 2014; 2014.
- (50) Zainudin Z, Rahman N, Abdullah N, Mazlan N. Development of water quality model for Sungai Tebrau using QUAL2K. *Journal of applied sciences*. 2010;10(21):2748-50. Doi: 10.3923/jas.2010.2748.2750.
- (51) Pai T-Y, Huang J-T, Wang S-C, Chang D-H, Huang K-J, Lee C-C, et al. Evaluation of ecological water purification processes in Dali River using QUAL2K. *J Environ Eng Manag*. 2010;20(4):239-43.
- (52) Rashed AA, El-Sayed E. Simulating agricultural drainage water reuse using QUAL2K Model: case study of the Ismailia canal catchment area, Egypt. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 2014;140(5):05014001. Doi: 10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000715.
- (53) Jaramillo MF, Galvis A, Escobar M, Forni L, Purkey D, Siebel JS, et al. 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*. 2016;8(2):14-24.
- (54) CVC, Universidad del Valle. Informe de diagnóstico en el proyecto: Convenio Interadministrativo CVC No. 025, Insumos técnicos para la elaboración del plan de ordenamiento del recurso hídrico de los ríos Bolo y Frayle. Cali; 2015.
- (55) Corporación Autónoma Regional del Valle de Cauca (CVC). Reglamentación integral para el manejo y la administración del agua del río Bolo. Cali; 2012.
- (56) Schwartz P. *The Art of the Long View: Planning for the Future in an Uncertain World*. 1st Ed. New York: Currency Doubleday; 1991. 292 p.
- (57) Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca (CVC). Reglamentación del río Frayle. Cali; 2012.
- (58) World Health Organization (WHO). *Guidelines for the Safe Use of Wastewater, excreta and greywater - Volume 2. Wastewater use in Agriculture*. 1st ed. Francia; 2006. 182 p.
- (59) Pescod MB. *Wastewater treatment and use in agriculture*. Rome. 1992 (FAO irrigation and drainage). Report No. 47.
- (60) Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE). Consulta del último censo. Población por departamentos. Bogotá, Colombia; 2005 [Consulted 2015 Sep 28]; Available in: <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/demografia-y-poblacion/censo-general-2005-1>.
- (61) Corporación Autónoma Regional del Quindío (CRQ), Corporación Autónoma Regional de Risaralda (CARDER), Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca (CVC), Universidad del

- Valle, Universidad del Quindío, Universidad Tecnológica de Pereira. Definición de la línea base en el proyecto: ordenación del recurso hídrico en la cuenca del río La Vieja mediante el desarrollo de una metodología con criterios de eficiencia económica e implementación de herramientas de apoyo a la decisión. Armenia, Colombia; 2011.
- (62) Instituto Colombiano Agropecuario (ICA). Censo Pecuario Nacional. Bogotá, Colombia; 2015. [Consulted 2015 Sep 01]; Available in: <http://www.ica.gov.co/getdoc/8232c0e5-be97-42bd-b07b-9cdbfb07fcac/Censos-2008.aspx>.
- (63) Asociación de Cultivadores de Caña de Azúcar de Colombia (ASOCAÑA). Informe Anual 2011-2012. Cali, Colombia; 2011.
- (64) Chapra S, Pelletier G, Tao H. QUAL2K: A modeling framework for simulating river and stream water quality. Documentation and user manual. Version 2.07. Medford: Tufts University; 2007.
- (65) Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca (CVC). Definición de conflictos por uso del suelo en el departamento del Valle del Cauca. En Sistema de información ambiental de la CVC. Cali, Colombia; 2010.
- (66) CVC, Universidad del Valle. Informe ejecutivo en el proyecto:. Convenio Interadministrativo CVC No 025, Insumos técnicos para la elaboración del plan de ordenamiento del recurso hídrico de los ríos Bolo y Frayle. Cali, Colombia; 2015.
- (67) Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca (CVC). Effects of climate change and vulnerability assessment. Informe ejecutivo en el Proyecto TWIN-LATIN. Hermando cuencas europeas y latinoamericanas para el desarrollo y manejo sostenible del agua. Cali, Colombia; 2008. 56 p.
- (68) Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca (CVC). Plan de manejo del acuífero del Valle del Cauca. Cali, Colombia. 2000. 25 p.

