

6. Querétaro: reúso de agua y alianzas público-privadas para el desarrollo industrial*

EUGENE HAKIZIMANA**



DOI: <https://doi.org/10.52501/cc.493.06>

Resumen

Querétaro posee una economía industrial diversificada, pero su desarrollo ocurre en un territorio donde varios acuíferos presentan balances negativos y los usos urbanos, agrícolas e industriales compiten por el recurso. El objetivo del capítulo es analizar, mediante una investigación teórica y documental, las condiciones para impulsar el reúso industrial de aguas residuales tratadas mediante alianzas público-privadas. La revisión integra economía circular, tratamiento avanzado, gestión de riesgos, gobernanza contractual y aceptación social. Los resultados muestran que la viabilidad depende de la distancia entre plantas y usuarios, la correspondencia entre calidad y uso, la estabilidad del suministro, las tarifas, la medición del agua convencional sustituida y la asignación de responsabilidades. Se propone un modelo basado en planeación territorial, infraestructura dual, barreras múltiples, contratos de desempeño, transparencia y reducción verificable de extracciones. Se concluye que el reúso puede contribuir al desarrollo industrial de Querétaro cuando sustituye fuentes sobreexplotadas, protege el derecho humano al agua y se complementa con eficiencia, saneamiento y conservación de acuíferos.

* Derivado del proyecto IND-2026-0592: Propuesta de tratamiento sostenible de agua para mejorar la competitividad de empresas del sector farmacéutico de la Ciudad de México.

** Doctor en Ciencias Económicas. Profesor-investigador en la Escuela Superior de Comercio y Administración (unidad Santo Tomás), Instituto Politécnico Nacional, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1804-1516>; Scopus ID: 57192373996; correo electrónico: eha-kizimana@ipn.mx

Palabras clave: *reúso de agua, desarrollo industrial, agua regenerada, alianzas público-privadas.*

Introducción

Querétaro se ha consolidado como uno de los principales polos industriales del centro de México. Su estructura productiva comprende actividades automotrices, aeroespaciales, metalúrgicas, alimentarias, químicas, electrónicas, logísticas y de tecnologías de la información. Además, cuenta con una red de clústeres que vincula empresas, universidades, centros de investigación y autoridades. Esta concentración impulsa inversión, empleo e innovación, pero también incrementa la demanda de suelo, energía, infraestructura y agua (Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI], 2025; Secretaría de Desarrollo Sustentable del Estado de Querétaro [SEDESU], s. f.).

El agua participa en numerosos procesos industriales, aunque su función varía entre sectores e instalaciones. Se utiliza en enfriamiento, generación de vapor, limpieza de equipos y superficies, preparación de materiales, tratamiento de piezas, producción de alimentos, control de emisiones, mantenimiento y servicios sanitarios. Incluso las actividades con menor consumo directo pueden depender de proveedores o servicios intensivos en agua, por lo que su continuidad está condicionada por la disponibilidad regional (Georgiou et al., 2023; Silva, 2023a).

El crecimiento industrial ocurre en un contexto de presión sobre las aguas subterráneas. La Comisión Nacional del Agua reporta disponibilidad media anual negativa en los acuíferos Valle de Querétaro, Valle de Amazcala, Valle de San Juan del Río, Valle de Buenavista y Valle de Huimilpan. Los mayores déficits corresponden a Valle de Querétaro, con aproximadamente 65.56 hectómetros cúbicos anuales, y Valle de San Juan del Río, con 56.89 (Comisión Nacional del Agua [Conagua], s. f.).

Un balance negativo no significa que el acuífero esté vacío, sino que la recarga media anual, una vez descontada la descarga natural comprometida, resulta inferior al volumen concesionado o extraído. En términos prácticos, ampliar las concesiones agrava el deterioro o compromete otros usos, por

lo que el crecimiento debe apoyarse en reducción, sustitución y gestión de la demanda (Conagua, s. f.).

El crecimiento poblacional, la expansión urbana, la agricultura, la ganadería y la industria ejercen presión conjunta sobre las fuentes subterráneas. Ningún sector explica por sí solo el abatimiento. No obstante, las empresas industriales poseen capacidades técnicas, financieras y organizativas para acelerar la eficiencia y adoptar fuentes alternativas. También pueden ofrecer una demanda estable que favorezca la viabilidad de las plantas de tratamiento y las redes de agua regenerada (Georgiou et al., 2023).

Un crecimiento industrial basado en mayores extracciones subterráneas encontrará límites físicos e institucionales. Perforar pozos o profundizar los existentes puede ampliar temporalmente el suministro de una instalación, pero eleva los costos de bombeo, intensifica los conflictos y agrava el abatimiento. La seguridad hídrica empresarial depende no solo de la existencia formal de una concesión, sino de la disponibilidad real y sostenida del acuífero (Fernandes y Cunha Marques, 2023; Silva, 2023b).

El tratamiento y reúso de aguas residuales ofrecen una vía para disminuir la dependencia del agua potable y subterránea. El reúso consiste en emplear deliberadamente un efluente tratado que cumple los requisitos del nuevo uso. Puede destinarse a enfriamiento, servicios sanitarios, riego de áreas verdes, control de polvo y lavados preliminares; con tratamientos adicionales, también puede alimentar calderas o ciertos procesos industriales (Fernandes y Cunha Marques, 2023; Mejía-Marchena et al., 2023).

La Comisión Estatal de Aguas de Querétaro reconoce usos del agua tratada en procesos industriales, agricultura de tallo alto y algunas actividades recreativas sin contacto directo. Esto confirma que el reúso forma parte del sistema estatal de gestión hídrica y no constituye únicamente una posibilidad tecnológica (Comisión Estatal de Aguas de Querétaro [CEA Querétaro], s. f.).

El reúso puede beneficiar al organismo operador y a las empresas. El primero obtiene ingresos para sostener el tratamiento y las segundas acceden a una fuente más confiable y reducen su exposición a restricciones. El beneficio territorial, sin embargo, depende de sustituir de manera verificable agua convencional y disminuir las descargas contaminantes (Georgiou et al., 2023).

La disponibilidad de aguas residuales no garantiza su aprovechamiento. El efluente puede no cumplir los requisitos industriales; las plantas y usuarios pueden estar distantes; la conducción puede requerir bombeo; y el suministro depende del caudal recibido y del desempeño de la instalación. También deben gestionarse patógenos, sales, corrosión, incrustaciones y contaminantes emergentes (Ho et al., 2024; Kato y Kansha, 2024; Khan et al., 2024).

La infraestructura puede superar la capacidad financiera de un organismo público o de una empresa individual. Además del tratamiento secundario, algunos usos requieren filtración, eliminación de nutrientes, desinfección, membranas, oxidación avanzada, almacenamiento y redes separadas. La colaboración permite distribuir aportaciones y responsabilidades entre gobiernos, organismos operadores, empresas usuarias, desarrolladores de parques y operadores especializados (Georgiou et al., 2023; Ma et al., 2023).

San Juan del Río constituye un antecedente relevante. El Fondo Nacional de Infraestructura registró un proyecto para rehabilitar y ampliar en 300 litros por segundo la planta municipal de tratamiento, con el objetivo de alcanzar una capacidad total de 600 litros por segundo y reducir las descargas sin tratar al río San Juan. El esquema contempló recursos públicos y privados mediante una asociación público-privada. La última situación publicada corresponde a mayo de 2021, por lo que el proyecto se utiliza como antecedente de planeación y no como prueba de operación actual (Fondo Nacional de Infraestructura [Fonadin], 2021).

El antecedente muestra que saneamiento, ampliación de capacidad y financiamiento privado pueden integrarse en un mismo proyecto. Sin embargo, una planta diseñada para cumplir límites de descarga no produce automáticamente agua apta para todos los usos industriales. El reúso requiere incorporar desde la planeación a los usuarios, la conducción, la confiabilidad y el tratamiento adicional.

El objetivo es evaluar las condiciones tecnológicas, económicas, contractuales e institucionales necesarias para implementar alianzas público-privadas de reúso industrial en Querétaro. La pregunta de investigación es la siguiente: ¿qué elementos debe contener un modelo de colaboración para que el agua regenerada contribuya al desarrollo industrial sin trasladar riesgos excesivos al Estado, los usuarios domésticos o los ecosistemas?

La contribución del reúso no debe medirse solo por el volumen producido o distribuido. Depende del agua convencional efectivamente sustituida, la confiabilidad y calidad del suministro, los costos y los efectos sobre el sistema hídrico. Un proyecto que incorpora una nueva fuente sin reducir extracciones amplía la oferta privada, pero no genera un beneficio neto para las fuentes naturales.

Aproximación teórica y conceptual

El reúso forma parte de la economía circular porque mantiene el agua en uso durante más tiempo y reduce la extracción de fuentes convencionales. Frente al modelo lineal de captación, uso, tratamiento y descarga, la circularidad integra prevención, recirculación interna, recuperación y aprovechamiento externo de efluentes (Fernandes y Cunha Marques, 2023).

La reducción de la demanda debe ocupar el primer lugar de la jerarquía. Una empresa no debe utilizar agua regenerada para sostener procesos ineficientes. La estrategia comienza con medición, reparación de fugas, optimización de limpiezas, recuperación de condensados, manejo de torres de enfriamiento y recirculación. Después de aplicar medidas razonables de eficiencia, el reúso externo puede sustituir parte del abastecimiento convencional (Silva, 2023a).

La recirculación mantiene el agua tratada dentro de la misma instalación o proceso. El reúso externo ocurre cuando una empresa utiliza efluentes tratados generados por otro usuario, generalmente un sistema municipal o una instalación cercana. Esta segunda modalidad requiere mayor coordinación contractual y regulatoria (Georgiou et al., 2023).

El agua regenerada es un efluente sometido a tratamiento para un uso posterior. Esto no significa que resulte apta para cualquier aplicación. La calidad debe relacionarse con el proceso receptor, la exposición de los trabajadores, el posible contacto con productos y los impactos ambientales (Ho et al., 2024).

El principio de calidad adecuada para el uso busca evitar el subtratamiento y el sobretratamiento. El primero genera riesgos sanitarios, daños a equipos o presencia de contaminantes; el segundo incrementa innecesariamente la

energía y los reactivos. La tecnología debe seleccionarse según los parámetros que condicionan la aplicación (Fernandes y Cunha Marques, 2023; Kato y Kansha, 2024).

Los usos industriales pueden agruparse según sus exigencias. El riego de áreas verdes, el control de polvo y ciertos servicios sanitarios requieren menor calidad que las calderas, el lavado de productos o la fabricación. Las torres de enfriamiento ocupan una posición intermedia y exigen controlar metales, dureza, sólidos, sílice, cloruros, materia orgánica y microorganismos para prevenir incrustaciones, corrosión y crecimiento biológico (Georgiou et al., 2023).

La selección del tratamiento depende de la calidad del afluente y del uso final. Puede combinar cribado, sedimentación, procesos biológicos, coagulación-floculación, filtración, carbón activado, desinfección, ultrafiltración, nanofiltración, ósmosis inversa y oxidación avanzada. Como ninguna tecnología elimina todos los contaminantes, normalmente se requieren trenes de tratamiento (Kato y Kansha, 2024; Mejía-Marchena et al., 2023).

Los procesos biológicos reducen materia orgánica biodegradable y algunos nutrientes; los fisicoquímicos separan sólidos, aceites, metales y otros compuestos. Las membranas producen efluentes de alta calidad, pero presentan ensuciamiento, consumo energético y generación de concentrados que deben gestionarse (Kato y Kansha, 2024; Mejía-Marchena et al., 2023).

El enfoque de barreras múltiples combina prevención en la fuente, tratamiento, desinfección, almacenamiento, distribución, monitoreo y control del uso. La integración de varias barreras permite alcanzar una calidad adecuada para la mayoría de los usos no potables y reduce el efecto de una falla aislada en el sistema (Ho et al., 2024).

La confiabilidad es tan importante como la calidad promedio. Una planta puede producir regularmente un efluente adecuado y experimentar episodios de deterioro por cambios en el afluente, fallas de aireación, cortes de energía o problemas de desinfección. Los contratos deben definir parámetros, frecuencia de monitoreo, alarmas y acciones cuando no se cumplan las especificaciones (Ho et al., 2024).

Los contaminantes emergentes representan otro desafío. Los efluentes municipales pueden contener residuos farmacéuticos, productos de cuidado personal, sustancias industriales, microorganismos resistentes y com-

puestos no incluidos en la regulación convencional. El riesgo depende del uso, la concentración, la exposición y la capacidad de remoción del tratamiento (Khan et al., 2024).

Los usos industriales sin contacto con alimentos o personas suelen presentar menor riesgo que el reúso potable o agrícola, pero debe analizarse el destino posterior del agua. Una corriente puede recircularse, descargarse o incorporarse a lodos y emisiones. La evaluación debe abarcar todo el ciclo y evitar la transferencia de contaminantes (Khan et al., 2024).

En México, el marco regulatorio distingue descarga y reúso. La NOM-001-SEMARNAT-2021 establece límites para descargas en cuerpos receptores propiedad de la nación, pero su cumplimiento no demuestra que el agua sea apta para cualquier proceso industrial. El proveedor y el usuario deben establecer requisitos adicionales según el riesgo y las especificaciones técnicas (Diario Oficial de la Federación [DOF], 2022).

También existen disposiciones federales, estatales y municipales para descargas al alcantarillado y usos específicos. La CEA Querétaro regula descargas de usuarios no domésticos y cuenta con normas técnicas para infraestructura de agua potable, agua tratada, alcantarillado sanitario y drenaje pluvial. Esta diversidad exige coordinación para evitar vacíos y duplicidades (CEA Querétaro, s. f.).

La infraestructura dual mantiene redes separadas para agua potable y regenerada. Esta separación reduce el riesgo de conexiones cruzadas y permite suministrar calidades distintas. Resulta más sencilla en nuevos parques industriales; en zonas consolidadas, instalar tuberías implica mayores costos y afectaciones urbanas (Georgiou et al., 2023).

La distancia entre la planta y los usuarios es decisiva. Una fuente abundante puede resultar económicamente inviable si requiere tuberías extensas o bombeo elevado. El costo depende de proximidad, diferencias de nivel, servidumbres de paso y concentración de la demanda (Georgiou et al., 2023).

Los parques industriales ofrecen ventajas al concentrar usuarios y permitir compartir almacenamiento, bombeo, tratamiento y monitoreo. La diversidad de procesos, sin embargo, implica requisitos de calidad diferentes. El sistema puede suministrar una calidad base y tratamientos adicionales en la planta central o en cada instalación.

La infraestructura requiere una demanda industrial estable. Las plantas municipales generan caudales relativamente continuos, mientras que el consumo empresarial varía por turnos, ciclos y condiciones económicas. Los contratos deben usar estimaciones realistas, volúmenes mínimos, capacidades máximas y reglas para reducciones temporales (Georgiou et al., 2023).

Las alianzas público-privadas son relaciones contractuales de largo plazo en las que actores públicos y privados distribuyen recursos, funciones y riesgos para proveer infraestructura o servicios. Pueden abarcar diseño, financiamiento, construcción, ampliación, operación, mantenimiento y tratamiento adicional (Ma et al., 2023).

En un proyecto de reúso, el organismo público puede aportar el efluente, la infraestructura existente y la autoridad para prestar el servicio; el operador privado, capital, tecnología y experiencia; las industrias, demanda; y los gobiernos, regulación, supervisión, derechos de vía o aportaciones públicas cuando se justifiquen (Georgiou et al., 2023).

Una alianza no equivale necesariamente a privatización. La propiedad y la responsabilidad última sobre el recurso y la infraestructura pueden permanecer públicas, mientras el contrato encarga actividades específicas a una empresa. La distinción depende de propiedad, plazo, riesgos, mecanismo de pago y facultades conservadas por la autoridad.

La alianza debe justificarse por el valor público y no solo por la falta de financiamiento. El proyecto debe mejorar el saneamiento, sustituir extracciones, reducir impactos, mantener tarifas razonables y asignar riesgos eficientemente. La inversión se recuperará mediante tarifas, contratos de compra, pagos públicos o una combinación de estos mecanismos (Ma et al., 2023).

La legislación de Querétaro en materia de alianzas público-privadas proporciona el marco para proyectos de servicios e infraestructura con participación privada. Exige planeación, autorización, contratación y supervisión, pero no determina por sí misma si un proyecto es conveniente; esa decisión requiere evaluación técnica, financiera, ambiental y social (Legislatura del Estado de Querétaro, 2024).

Los riesgos deben asignarse a la parte con mayor capacidad para controlarlos. El operador privado puede asumir diseño, construcción, integración tecnológica, operación y mantenimiento. La regulación, planeación y

protección del interés público permanecen en el Estado, mientras que demanda, energía, calidad del afluente y cambios regulatorios pueden requerir mecanismos compartidos.

La calidad del afluente es especialmente relevante. Una planta municipal recibe descargas domésticas, comerciales e industriales cuya composición puede variar. La entrada de sustancias tóxicas o inhibitorias afecta el tratamiento. El organismo público debe regular, medir y rastrear las descargas a la red y contar con capacidad de respuesta (Kato y Kansha, 2024).

El riesgo de demanda aparece cuando las industrias consumen menos agua de la prevista. Obligar al sector público a pagar toda la capacidad genera una carga fiscal, mientras que transferir toda la incertidumbre al operador eleva el precio. Los contratos pueden combinar pagos por disponibilidad, tarifas volumétricas y compromisos mínimos de los usuarios.

El riesgo de precio surge de la competencia entre agua regenerada y fuentes convencionales. Cuando el agua subterránea o potable es más barata porque no incorpora sus costos ambientales, las empresas tienen pocos incentivos para cambiar. Las tarifas y los límites de extracción influyen directamente en la viabilidad del reúso (Georgiou et al., 2023).

La aceptación social también condiciona los proyectos. Aunque el reúso industrial no potable suele generar menos rechazo que el potable, persisten preocupaciones sobre calidad, destino del agua y trato preferencial a empresas. Debe explicarse qué agua se utilizará, en qué procesos, con qué controles y qué beneficios producirá para el territorio (Moesker et al., 2024).

La participación no debe reducirse a persuadir al público. La innovación responsable exige incorporar preocupaciones sociales durante el diseño, mantener alternativas abiertas y permitir que las observaciones modifiquen el proyecto. La aceptación de largo plazo depende de confianza institucional y transparencia, no solo de campañas informativas (Moesker et al., 2024).

Método de investigación

El capítulo se desarrolló mediante una investigación teórica y documental de naturaleza cualitativa e integradora. El diseño permitió relacionar

disponibilidad hídrica, tratamiento de aguas residuales, reúso industrial, economía circular, gestión de riesgos y alianzas público-privadas.

La revisión incluyó artículos científicos, documentos oficiales sobre acuíferos, legislación, normas ambientales, datos económicos y fichas de proyectos de infraestructura. Se priorizaron publicaciones de 2022 a 2025 y se incorporaron documentos anteriores cuando fueron necesarios para describir el contexto o el marco jurídico.

Los términos de búsqueda, en español e inglés, se relacionaron con reúso industrial, agua regenerada, tratamiento avanzado, riesgos sanitarios, acuíferos de Querétaro, alianzas público-privadas, infraestructura dual, plantas de tratamiento y parques industriales.

Los documentos se seleccionaron por su pertinencia, autoría académica u oficial, actualidad y claridad metodológica. Se excluyeron materiales promocionales sin evidencia verificable y textos que presentaban el reúso como una solución universal sin analizar calidad, costos, riesgos y alternativas.

El análisis se organizó en siete categorías: presión hídrica territorial; calidad adecuada para el uso; infraestructura y proximidad; viabilidad económica; distribución contractual de riesgos; gobernanza y aceptación; y adicionalidad hídrica. Estas categorías se integraron en una propuesta aplicable al desarrollo industrial de Querétaro.

El proyecto de ampliación de la planta de San Juan del Río se utilizó como antecedente documental de colaboración público-privada. No se evaluó su desempeño, porque la última información de Fonadin corresponde a la preparación contractual en 2021 y no permite afirmar que haya sido adjudicado ni conocer su condición operativa.

Los resultados son teóricos y no constituyen una evaluación de una planta o empresa específica. La falta de información pública homogénea sobre consumo industrial, producción y calidad de agua tratada, precios y contratos limita el cálculo del potencial estatal y constituye uno de los retos de gobernanza identificados.

Resultados

El primer resultado es que el reúso industrial debe planearse a escala territorial. La capacidad nominal de las plantas no basta. Debe relacionarse el volumen efectivamente tratado con la ubicación de los parques, la demanda, la calidad, las elevaciones, las servidumbres y la infraestructura disponible.

La planeación debe inventariar plantas municipales e industriales, caudales promedio, variaciones estacionales, calidad del efluente, capacidad ociosa y necesidades de rehabilitación. También requiere identificar usuarios potenciales, consumos, procesos, distancias, derechos de vía y fuentes convencionales que serían sustituidas.

La prioridad debe asignarse a corredores que combinen una fuente confiable de efluente, concentración industrial y acuíferos deficitarios. En estas condiciones, la infraestructura compartida puede producir reducciones cuantificables de extracción.

Los acuíferos del Valle de Querétaro y Valle de San Juan del Río requieren atención especial debido a sus balances negativos y a la concentración urbana e industrial. En ambos casos, el reúso puede complementar otras medidas, pero no sustituye la reducción de fugas, la gestión de la demanda, la planeación urbana y la protección de las áreas de recarga (Conagua, s. f.).

El segundo resultado es la necesidad de aplicar una jerarquía de gestión. Antes de recibir agua regenerada, las empresas deben reducir desperdicios. Las auditorías y metas de eficiencia pueden convertirse en requisitos para contratar suministro público o acceder a tarifas preferenciales.

La auditoría debe identificar fuentes, procesos, pérdidas, recirculación, evaporación, agua incorporada al producto y descargas. También debe distinguir usos que requieren calidad potable de aquellos compatibles con agua regenerada, lo que evita tratamientos innecesariamente intensivos.

La medición por proceso es indispensable. El consumo total de una planta puede ocultar ineficiencias o cambios de producción. Los indicadores deben incluir metros cúbicos por unidad producida, extracción absoluta, porcentaje y volumen de reúso, agua convencional sustituida y calidad de efluentes y residuos.

Una reducción relativa no siempre genera un beneficio territorial. La intensidad puede disminuir mientras la extracción total aumenta con la producción. Las metas deben combinar indicadores relativos con límites absolutos relacionados con la condición del acuífero.

El tercer resultado es que el reúso debe comenzar en aplicaciones de bajo riesgo y alta demanda, como torres de enfriamiento, servicios sanitarios, control de polvo, lavado de patios y riego de áreas verdes, siempre que se controlen los parámetros pertinentes.

Las torres de enfriamiento ofrecen una demanda relativamente constante, pero el agua regenerada puede aumentar corrosión, incrustaciones y crecimiento microbiológico. Deben controlarse sólidos, dureza, alcalinidad, cloruros, sílice, nutrientes y materia orgánica, además de gestionar biocidas y purgas (Georgiou et al., 2023).

Las calderas requieren mayor calidad y pueden necesitar membranas, intercambio iónico y desgasificación, porque las sales y la sílice generan depósitos y daños. La viabilidad depende de la presión de operación, la calidad del efluente y el costo energético.

Los procesos con contacto con alimentos, productos farmacéuticos o componentes de alta precisión requieren evaluaciones más rigurosas. Un efluente apto para enfriamiento no debe considerarse automáticamente adecuado para lavado o como ingrediente. Cada aplicación necesita especificaciones y controles propios (Kato y Kansha, 2024).

El cuarto resultado es que la calidad debe gestionarse mediante varias barreras. El tratamiento municipal constituye la primera; puede complementarse con filtración, desinfección avanzada y tratamiento en la planta usuaria. El sistema debe definir quién opera y valida cada etapa.

La turbidez, conductividad, pH, cloro residual y otros parámetros pueden medirse en línea, mientras que determinadas sustancias requieren análisis de laboratorio. La combinación de monitoreo continuo y muestreo periódico permite detectar cambios y confirmar el cumplimiento.

Los contratos deben establecer niveles de alerta y respuesta. Cuando un parámetro se aproxima al límite deben ajustarse los procesos; si se supera, el suministro debe desviarse o suspenderse. Las industrias necesitan capacidad de respaldo para evitar interrupciones graves.

La fuente de respaldo debe reservarse para contingencias y no utilizarse para mantener permanentemente las captaciones originales. Los volúmenes de respaldo deben registrarse y analizarse para identificar fallas recurrentes.

El quinto resultado es la necesidad de infraestructura separada. Las redes de agua regenerada deben identificarse, señalizarse y mantenerse físicamente separadas de las redes potables. Estas características resultan más fáciles y menos costosas cuando se incorporan desde el diseño de nuevas áreas industriales.

Los parques existentes requieren estudios de viabilidad. La extensión, las diferencias de elevación y las servidumbres pueden encarecer las tuberías. En algunos casos, el tratamiento interno puede resultar más conveniente.

Los camiones cisterna implican costos, emisiones, riesgos y dificultades de trazabilidad. Pueden utilizarse en pilotos o consumos pequeños, pero no constituyen una solución eficiente para demandas industriales de gran escala.

El almacenamiento ayuda a equilibrar diferencias entre producción y consumo. Las plantas generan caudal durante todo el día y las industrias concentran su demanda en turnos. El dimensionamiento debe considerar variaciones, mantenimiento y conservación de la calidad.

El sexto resultado es que la viabilidad depende de una demanda contractual suficiente. Antes de construir una red deben identificarse usuarios ancla dispuestos a contratar agua durante varios años. Los proyectos de gran escala suelen apoyarse en plantas de gran consumo o grupos de empresas.

Los contratos reducen la exposición financiera, pero no deben concentrar el riesgo en un solo usuario. La producción puede cambiar y una planta puede cerrar. La demanda debe distribuirse entre varios participantes y contemplar escenarios de crecimiento o reducción.

Los costos de conexión y tratamiento pueden ser demasiado altos para pequeñas y medianas empresas. La infraestructura compartida puede financiarse mediante parques, empresas ancla o fondos públicos, con aportaciones distribuidas según volumen, calidad requerida y capacidad de pago.

El séptimo resultado es que la tarifa del agua tratada debe ser competitiva sin situarse por debajo de su costo. Debe cubrir tratamiento, conducción, energía, almacenamiento, monitoreo, mantenimiento y reposición, y

reconocer el beneficio ambiental de sustituir agua subterránea y evitar descargas.

La comparación no debe limitarse a la tarifa actual del agua convencional. Deben incorporarse los costos de pozos, bombeo, tratamiento interno, restricciones futuras y deterioro de la fuente. Omitir estos costos puede impedir proyectos socialmente convenientes.

Los subsidios públicos pueden justificarse para infraestructura troncal con beneficios territoriales. No deben financiar equipos internos cuyo beneficio se concentra en una empresa con capacidad suficiente para invertir.

El octavo resultado es que la alianza debe asignar claramente los riesgos. El operador privado puede asumir diseño, construcción, tecnología, operación y mantenimiento. La planeación, regulación, supervisión y protección del derecho humano al agua deben permanecer bajo responsabilidad pública.

La responsabilidad por la calidad del afluente debe compartirse. El organismo público regula las descargas a la red; el operador diseña una planta resiliente a variaciones previsibles; y las industrias usuarias adaptan sus procesos a la calidad contratada.

Los pagos por disponibilidad y las tarifas volumétricas pueden equilibrar el riesgo de demanda. El operador recibe una remuneración por mantener la infraestructura disponible, pero parte de sus ingresos depende del volumen efectivamente entregado y aceptado.

El riesgo de desempeño debe vincularse con indicadores. Las fallas atribuibles al operador generan penalizaciones y los resultados superiores pueden compartir beneficios. Calidad, disponibilidad, energía, pérdidas, respuesta ante incidentes y satisfacción del usuario son variables pertinentes.

Los contratos deben regular las modificaciones. Durante su vigencia pueden cambiar demanda, regulación y tecnología. La flexibilidad debe equilibrarse con la protección de la competencia, y toda renegociación relevante debe justificarse, publicarse y conservar la asignación adecuada de riesgos.

El noveno resultado es que la transparencia contractual constituye una condición de legitimidad. Deben publicarse precio, plazo, garantías, mecanismos de pago, indicadores, penalizaciones y obligaciones fiscales. La confidencialidad puede proteger aspectos tecnológicos o comerciales, pero no compromisos públicos.

La autoridad contratante necesita capacidad técnica para supervisar. El operador suele disponer de mayor información sobre contratos complejos, lo que genera asimetrías. Se requieren equipos públicos especializados y auditorías independientes.

Las universidades y centros de investigación de Querétaro pueden apoyar caracterización, pruebas piloto, monitoreo, evaluación de materiales y verificación. Esta colaboración es congruente con la red de instituciones asociadas a los clústeres industriales.

La participación académica debe preservar su independencia. Los acuerdos deben definir financiamiento, acceso a datos y publicación de resultados, incluidos los fallos y efectos adversos.

El décimo resultado es que el agua regenerada debe sustituir extracciones existentes. Este principio de adicionalidad distingue entre ampliar la oferta y mejorar la seguridad hídrica. Antes de recibir el nuevo suministro, cada usuario debe establecer una línea base de agua convencional.

La sustitución puede verificarse mediante medidores, registros de pozos y facturación. Los contratos deben precisar qué volumen de extracción se reducirá y en qué plazo. Cuando existan concesiones, las empresas deben realizar los procedimientos legales correspondientes para ajustar los volúmenes.

Los ahorros no deben reasignarse automáticamente a una expansión productiva. La política estatal debe definir qué parte se destina a disminuir el déficit, atender necesidades urbanas o mantener reservas. Esta regla evita el efecto rebote.

La producción puede aumentar al mismo tiempo que disminuye el consumo absoluto de agua convencional, siempre que el volumen regenerado sustituya extracciones. La condición debe demostrarse con datos y no solo con porcentajes de reúso.

El undécimo resultado se relaciona con el antecedente de San Juan del Río. El proyecto integró rehabilitación y ampliación de una planta con financiamiento público y privado. La ficha de Fonadin registró una participación aproximada de 49 % del fondo y 51 % de inversión privada (Fonadin, 2021).

El objetivo principal fue reducir descargas sin tratar al río San Juan. Para incorporar reúso industrial sería necesario añadir análisis de demanda,

calidad, redes, tarifas y sustitución de extracciones. Saneamiento y reúso son complementarios, pero no equivalentes.

El antecedente también muestra la importancia del seguimiento público. Una ficha de preparación no permite conocer lo ocurrido después. Los proyectos de largo plazo deben publicar información continua sobre autorizaciones, adjudicación, construcción, operación y resultados.

El duodécimo resultado es que la aceptación social depende de la distribución de beneficios. En contextos de escasez, las comunidades pueden cuestionar razonablemente la inversión destinada a abastecer industrias. El proyecto debe demostrar que no reduce el agua potable disponible y que genera beneficios ambientales y económicos para el sistema.

El uso industrial de efluentes municipales no debe representar una transferencia del consumo humano al sector privado. Debe liberar agua de mayor calidad y generar ingresos que mejoren el saneamiento. Esta afirmación requiere balances verificables y contratos transparentes.

La comunicación debe aclarar que el reúso industrial no potable difiere del consumo humano directo. También debe reconocer incertidumbres y explicar los protocolos ante incidentes. Minimizar las preocupaciones aumenta la desconfianza.

La participación debe comenzar durante la planificación. Los usuarios domésticos, las comunidades, las industrias, los grupos de conservación y la academia pueden definir las prioridades, los criterios de evaluación y los mecanismos de monitoreo.

A partir de los resultados se propone un modelo de reúso industrial para Querétaro con ocho componentes: planeación territorial, eficiencia previa, calidad adecuada para el uso, infraestructura dual, demanda contractual, alianza con distribución de riesgos, adicionalidad hídrica y gobernanza transparente.

La planeación identifica plantas, usuarios y acuíferos prioritarios. La eficiencia evita utilizar agua regenerada para sostener desperdicios; la calidad adecuada reduce costos y riesgos; y la infraestructura dual asegura separación y trazabilidad.

La demanda contractual proporciona estabilidad financiera. Las responsabilidades se asignan según las capacidades de cada actor. La adicionalidad garantiza reducción de extracciones, mientras que la gobernanza transpa-

rente permite vigilar costos, calidad y resultados. El modelo opera en tres escalas. En la instalación se controlan procesos, calidad y consumo; en parques o corredores se comparten redes e infraestructura; y en el acuífero se verifica la reducción de la presión total.

Los indicadores deben incluir volumen tratado y suministrado, continuidad, calidad, energía por metro cúbico, pérdidas, tarifa, agua convencional sustituida, reducción de extracción, incidentes, usuarios conectados y evolución del acuífero.

La evaluación debe abarcar todo el ciclo contractual. Un proyecto puede cumplir al inicio y deteriorarse después por falta de mantenimiento, aumento de demanda o cambios en el afluente. El monitoreo continuo permite adaptar la operación y evitar la obsolescencia.

Conclusiones

Querétaro debe equilibrar su crecimiento industrial con una disponibilidad hídrica limitada. Los balances negativos de varios acuíferos muestran que la expansión no puede sostenerse mediante captaciones subterráneas adicionales.

Las industrias que no requieren agua potable pueden utilizar aguas residuales tratadas. El reúso puede disminuir la presión sobre los acuíferos, generar ingresos para el saneamiento y fortalecer la resiliencia empresarial.

Las aguas residuales no constituyen una solución automática. Los proyectos deben relacionar calidad y uso, proximidad, infraestructura, demanda estable, tarifas viables y capacidad de respuesta ante fallas.

La calidad debe gestionarse mediante barreras y contratos. Cumplir límites de descarga no significa que el efluente resulte apto para todos los procesos. Cada aplicación requiere análisis de riesgos y parámetros específicos.

Las alianzas público-privadas pueden aportar capital, tecnología y experiencia operativa. Su eficacia depende de competencia, transparencia, asignación adecuada de riesgos, indicadores de desempeño y supervisión pública.

La participación privada no sustituye la rectoría estatal. La planeación, regulación, monitoreo y protección del derecho humano al agua deben

permanecer bajo responsabilidad pública, junto con el control de las obligaciones fiscales y contractuales.

El antecedente de San Juan del Río muestra la posibilidad de combinar inversión pública y privada para ampliar el saneamiento. También evidencia la necesidad de publicar información permanente sobre el desarrollo y los resultados de los proyectos.

La tarifa del agua regenerada debe reflejar costos razonables y evitar subsidios injustificados a las empresas. El apoyo público puede dirigirse a infraestructura con beneficios colectivos, mientras las mejoras internas corresponden a los usuarios.

La adicionalidad hídrica es el criterio determinante. Un proyecto mejora la seguridad hídrica solo cuando reduce de manera comprobable las extracciones convencionales. Si el consumo total continúa aumentando, el reúso amplía la oferta, pero no resuelve la presión territorial.

La aceptación social depende de que el reúso beneficie al sistema y no solo a las empresas. Los proyectos deben mejorar el saneamiento, elevar la calidad de las descargas, proteger a los usuarios domésticos y disminuir la presión sobre las fuentes.

El modelo propuesto articula la empresa, el parque industrial y el acuífero mediante eficiencia, tratamiento adecuado, infraestructura dual, sustitución verificable, contratos y transparencia. Esta perspectiva vincula la competitividad empresarial con la sostenibilidad territorial.

El futuro de Querétaro como polo industrial dependerá de su capacidad para generar valor con menor consumo de agua convencional. El reúso puede desempeñar un papel central cuando forma parte de una política integrada de eficiencia, saneamiento, conservación y gestión del crecimiento.

Referencias

- Comisión Estatal de Aguas de Querétaro. (s. f.). Preguntas frecuentes. <https://web-cea-qa.ceaqueretaro.gob.mx/preguntas-frecuentes/>
- Comisión Nacional del Agua. (s. f.). Aguas subterráneas: Acuíferos del estado de Querétaro. Gobierno de México. <https://sigagis.conagua.gob.mx/gas1/sections/Edos/queretaro/queretaro.html>
- Diario Oficial de la Federación. (2022, 11 de marzo). Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-2021, que establece los límites permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en cuerpos receptores propiedad de la nación. Diario Oficial de la Federación. https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5645374&fecha=11/03/2022
- Fernandes, E., y Cunha Marques, R. (2023). Review of water reuse from a circular economy perspective. *Water*, 15(5), 848. <https://doi.org/10.3390/w15050848>
- Fondo Nacional de Infraestructura. (2021). Ampliación planta de tratamiento de aguas residuales San Juan del Río, Querétaro. Banco Nacional de Obras y Servicios Públicos. <https://www.fonadin.gob.mx/fni2/fp08/>
- Georgiou, I., Caucci, S., Morris, J. C., Guenther, E., y Krebs, P. (2023). Assessing the potential of water reuse uptake through a private–public partnership: A practitioner's perspective. *Circular Economy and Sustainability*, 3, 199-220. <https://doi.org/10.1007/s43615-022-00166-w>
- Ho, J., Ahmadi, J., Schweikart, C., Hübner, U., Schwaller, C., Tiehm, A., y Drewes, J. E. (2024). Assuring reclaimed water quality using a multi-barrier treatment train according to the new EU non-potable water reuse regulation. *Water Research*, 267, 122429. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2024.122429>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2025). Censos Económicos 2024: Resultados definitivos. INEGI. <https://www.inegi.org.mx/programas/ce/2024/>
- Kato, S., y Kansha, Y. (2024). Comprehensive review of industrial wastewater treatment techniques. *Environmental Science and Pollution Research*, 31(39), 51064-51097. <https://doi.org/10.1007/s11356-024-34584-0>
- Khan, U. A., Löffler, P., Spilsbury, F., Wiberg, K., Stålsby Lundborg, C., y Lai, F. Y. (2024). Towards sustainable water reuse: A critical review and meta-analysis of emerging chemical contaminants with risk-based evaluation, health hazard prediction and prioritization for assessment of effluent water quality. *Journal of Hazardous Materials*, 480, 136175. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.136175>
- Legislatura del Estado de Querétaro. (2024). Ley de Asociaciones Público Privadas para el Estado de Querétaro. <https://site.legislaturaqueretaro.gob.mx/CloudPLQ/InvEst/Leyes/LEY-ID-004.pdf>
- Ma, L., Hu, Y., Zhu, L., y Ke, Y. (2023). Are public–private partnerships still an answer for social infrastructure? A systematic literature review. *Frontiers of Engineering Management*, 10, 467-482. <https://doi.org/10.1007/s42524-023-0249-1>
- Mejía-Marchena, R., Maturana-Córdoba, A., Gómez-Cerón, D., Quintero-Monroy, C.,

- Arismendy-Montes, L., y Cárdenas-Pérez, C. (2023). Industrial wastewater treatment technologies for reuse, recycle, and recovery: Advantages, disadvantages, and gaps. *Environmental Technology Reviews*, 12(1), 205-250. <https://doi.org/10.1080/21622515.2023.2198147>
- Moesker, K., Pesch, U., y Doorn, N. (2024). Public acceptance in direct potable water reuse: A call for incorporating responsible research and innovation. *Journal of Responsible Innovation*, 11(1), 2304382. <https://doi.org/10.1080/23299460.2024.2304382>
- Secretaría de Desarrollo Sustentable del Estado de Querétaro. (s. f.). Red Estatal de Clústeres. Gobierno del Estado de Querétaro. <https://queretaro.gob.mx/web/sedesu/cluster>
- Silva, J. A. (2023a). Wastewater treatment and reuse for sustainable water resources management: A systematic literature review. *Sustainability*, 15(14), 10940. <https://doi.org/10.3390/su151410940>
- Silva, J. A. (2023b). Water supply and wastewater treatment and reuse in future cities: A systematic literature review. *Water*, 15(17), 3064. <https://doi.org/10.3390/w15173064>