10. Quintana Roo: turismo, saneamiento y alianzas público-privadas para la protección del agua*

Christian Muñoz Sánchez**

DOI: https://doi.org/10.52501/cc.493.10

Resumen

Quintana Roo alberga algunos de los principales destinos turísticos de México, pero su crecimiento depende de un acuífero kárstico altamente permeable y vulnerable a la contaminación. La expansión urbana y hotelera, la migración, la población flotante y la cobertura desigual de alcantarillado y tratamiento incrementan la presión hídrica y amenazan los ecosistemas costeros. El objetivo del capítulo es analizar, mediante investigación teórica y documental, cómo pueden articularse el turismo, el saneamiento y las alianzas público-privadas para proteger el agua. La revisión integra aportes sobre seguridad hídrica, reúso, economía circular, tratamiento descentralizado, asignación contractual de riesgos y gobernanza ambiental. Los resultados muestran que el crecimiento turístico debe condicionarse a la capacidad efectiva de abastecimiento, recolección, tratamiento y monitoreo del acuífero. Se propone un modelo que vincula responsabilidad empresarial, planeación territorial, financiamiento basado en desempeño, transparencia y participación social. Las alianzas pueden movilizar inversión y capacidades técnicas, pero deben conservar la rectoría pública, proteger el derecho humano al agua y demostrar reducciones verificables de extracciones y cargas contaminantes.

* 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 Sociales. Profesor-investigador del Instituto Politécnico Nacional, México. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8692-4252 ; Scopus ID: 57209292143 ; correo electrónico: cmunozs@ipn.mx

Palabras clave: *turismo, saneamiento, alianzas público-privadas, aguas subterráneas.*

Introducción

Quintana Roo se ha consolidado como uno de los principales destinos turísticos de México. La oferta de alojamiento, recreación, restaurantes y comercio se concentra en Cancún, la Riviera Maya, Tulum, Cozumel, Isla Mujeres, Puerto Morelos, Bacalar y Mahahual, entre otros destinos vinculados con el turismo nacional e internacional. Esta especialización genera empleo y cadenas de suministro en alimentos, transporte, construcción, lavandería, entretenimiento y servicios ambientales (Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI], 2025; Secretaría de Turismo de Quintana Roo, 2024).

El crecimiento turístico exige infraestructura. Los destinos requieren planeación territorial y servicios de agua potable, alcantarillado, tratamiento de aguas residuales y drenaje pluvial, además de energía, movilidad y gestión de residuos. La demanda no depende solo de la población residente: los turistas, trabajadores temporales y proyectos en construcción generan variaciones estacionales y espaciales que deben incorporarse a la planeación (Gobierno del Estado de Quintana Roo, 2023; Secretaría de Turismo de Quintana Roo, 2024).

El turismo consume agua en habitaciones, restaurantes, cocinas, lavanderías, piscinas, spas, sistemas de enfriamiento, servicios sanitarios y riego de jardines. Las necesidades varían según la categoría, el tamaño, la ocupación, el diseño, la ubicación y las prácticas de gestión. Los establecimientos con grandes áreas verdes, múltiples piscinas y servicios intensivos pueden registrar consumos por huésped superiores a los de la población residente, aunque la diversidad del sector impide establecer un único valor representativo (Gössling et al., 2012; Silva, 2023a).

Los problemas hídricos de Quintana Roo están estrechamente relacionados con la geología de la península de Yucatán. El subsuelo está formado por rocas carbonatadas permeables, fracturas, conductos, cuevas y cenotes. Ante la escasez de cauces superficiales permanentes, el agua subterránea

constituye la principal fuente de abastecimiento y también recibe infiltraciones provenientes de la superficie (Bauer-Gottwein et al., 2011).

El acuífero kárstico posee gran capacidad de almacenamiento, pero también una elevada vulnerabilidad. El agua se desplaza rápidamente por conductos y fracturas, mientras la filtración y degradación naturales varían según la estructura del subsuelo. Las descargas inadecuadas, fosas sépticas, fugas de alcantarillado, lixiviados y pozos de absorción pueden introducir microorganismos, nutrientes y sustancias químicas que después alcanzan cenotes, lagunas, humedales o zonas costeras (Bauer-Gottwein et al., 2011; Khan et al., 2024).

La disponibilidad administrativa del acuífero no implica ausencia de riesgos. Los balances regionales agregados pueden ocultar sobrebombeo local, intrusión salina, deterioro de la calidad o competencia entre usos. Además del volumen, deben considerarse la ubicación y profundidad de los pozos, su proximidad a descargas y la conectividad de los flujos subterráneos hacia la costa (Comisión Nacional del Agua [Conagua], 2024).

El abastecimiento y el saneamiento están directamente vinculados. Cada aumento del agua distribuida genera, después del consumo y las pérdidas, un incremento de las aguas residuales. El crecimiento hotelero, residencial y comercial sin una ampliación equivalente de recolección, tratamiento y disposición convierte el desarrollo económico en una amenaza para el acuífero y los ecosistemas costeros (Gobierno del Estado de Quintana Roo, 2023; Silva, 2023b).

El saneamiento presenta desafíos distintos en zonas urbanas densas y desarrollos dispersos. Los destinos consolidados requieren ampliar colectores, cárcamos, plantas y redes de reúso; las localidades pequeñas, islas y desarrollos alejados pueden depender de sistemas descentralizados. En ambos casos se necesitan operación, mantenimiento, energía, personal y gestión adecuada de lodos (Comisión de Agua Potable y Alcantarillado del Estado de Quintana Roo [CAPA], 2024; Silva, 2023a).

La instalación de una planta no garantiza el saneamiento. Puede operar por debajo de su capacidad, recibir caudales superiores a su diseño, carecer de mantenimiento o descargar un efluente inadecuado para el medio receptor. Además, hoteles, viviendas y comercios pueden permanecer desconectados de la red y utilizar sistemas aislados de confiabilidad limitada (Mejía-Marchena et al., 2023; Silva, 2023a).

Las aguas residuales turísticas contienen materia orgánica, grasas, detergentes y microorganismos. Los hospitales, lavanderías, campos de golf, embarcaciones y otras actividades complementarias pueden aportar fármacos, biocidas, sales y diversos compuestos. Los tratamientos convencionales eliminan una parte importante de la contaminación, pero no todos los contaminantes emergentes (Khan et al., 2024).

El nitrógeno y el fósforo son especialmente relevantes en los sistemas costeros. Al llegar a lagunas, humedales y arrecifes pueden favorecer desequilibrios ecológicos y eutrofización. La protección del acuífero debe abarcar microorganismos, materia orgánica, nutrientes y la conectividad entre el subsuelo y el mar (Bauer-Gottwein et al., 2011; Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura [UNESCO], 2024).

El turismo depende directamente de la calidad ambiental. Las playas, cenotes, arrecifes, manglares y lagunas son atractivos y proporcionan protección costera, paisaje, recreación y biodiversidad. La contaminación deteriora la experiencia turística, incrementa los costos de tratamiento, afecta la salud y reduce la competitividad. Por ello, el saneamiento debe considerarse una inversión productiva y no solo una obligación ambiental (Gobierno del Estado de Quintana Roo, 2023; UNESCO, 2024).

Esta interdependencia impone responsabilidades a las empresas turísticas. Hoteles, desarrolladores, restaurantes, parques, marinas y proveedores deben gestionar eficientemente el agua, conectar sus descargas a sistemas adecuados y financiar la prevención de impactos. La responsabilidad no termina en el límite del establecimiento, pues las cadenas de suministro y la expansión inmobiliaria también afectan al territorio (Gössling et al., 2012; Morseletto et al., 2022).

Las autoridades públicas conservan la responsabilidad de planear, regular y supervisar, así como de garantizar el derecho humano al agua y al saneamiento. La participación empresarial puede aportar inversión, tecnología y capacidad operativa, pero no sustituir las funciones públicas ni permitir que los intereses turísticos definan unilateralmente las prioridades de los servicios (Lima et al., 2021; Ma et al., 2023).

Las brechas de infraestructura han abierto espacios para concesiones, contratos de operación, construcción de plantas, prestación de servicios y desarrollos con sistemas propios. Estos arreglos forman un continuo de

alianzas público-privadas con diferencias de propiedad, duración, financiamiento, asignación de riesgos y mecanismos de pago (Lima et al., 2021; Ma et al., 2023).

Una alianza puede permitir que un operador especializado diseñe, financie, construya u opere activos de abastecimiento y saneamiento. También puede estructurar compras de agua regenerada, plantas compartidas para corredores turísticos o contratos de desempeño para reducir fugas y consumo. Su pertinencia depende del valor público generado, no de la mera movilización de recursos fuera del presupuesto inmediato (Georgiou et al., 2023; Global Infrastructure Hub, 2020).

El capítulo analiza las condiciones tecnológicas, económicas, contractuales, ambientales y sociales necesarias para articular el turismo, el saneamiento y las alianzas público-privadas en Quintana Roo. La pregunta guía es la siguiente: ¿cómo puede organizarse la participación empresarial y la inversión privada para ampliar el saneamiento y proteger el acuífero sin trasladar costos y riesgos a la población y los ecosistemas?

La premisa central es que una alianza no puede evaluarse únicamente por la infraestructura construida o el volumen tratado. Deben demostrarse la conexión efectiva de los usuarios, la operación permanente de las plantas, la reducción de extracciones y descargas, la protección del acuífero y la distribución territorial de los beneficios.

Aproximación teórica y conceptual

La seguridad hídrica es la capacidad de una sociedad para disponer de agua segura y suficiente, proteger la salud y los medios de vida, conservar los ecosistemas y reducir la vulnerabilidad ante sequías, inundaciones y contaminación. Comprende disponibilidad, acceso, continuidad, asequibilidad, calidad y resiliencia de los sistemas (UNESCO, 2024).

La seguridad hídrica posee una dimensión territorial y otra empresarial. La primera se refiere a la capacidad de los sistemas públicos y ambientales para atender a residentes, trabajadores, turistas y ecosistemas; la segunda, a la continuidad requerida por los establecimientos. Ambas están vinculadas: una empresa puede contar con almacenamiento propio y seguir expuesta

si la fuente regional o el saneamiento se deterioran (Gössling et al., 2012; UNESCO, 2024).

La gobernanza del agua comprende las reglas, instituciones, actores y procesos mediante los cuales se decide sobre abastecimiento, saneamiento, calidad, tarifas e infraestructura. La participación de empresas, operadores, desarrolladores y organizaciones sociales no elimina la supervisión pública. Las autoridades deben definir prioridades, monitorear la calidad, sancionar incumplimientos y garantizar un acceso equitativo (Lima et al., 2021).

El turismo plantea un problema distributivo. Las zonas con mayor capacidad económica pueden financiar pozos, cisternas y sistemas de respaldo, mientras los barrios y localidades con menor infraestructura enfrentan interrupciones, drenajes deficientes o saneamiento insuficiente. La seguridad privada del sector turístico no debe construirse a costa de una mayor vulnerabilidad pública (Gössling et al., 2012; UNESCO, 2024).

La responsabilidad empresarial comienza con el cumplimiento normativo y se extiende a prevención, eficiencia, información, inversión y reparación. Los establecimientos deben medir su uso, corregir fugas, tratar adecuadamente sus efluentes y contribuir a la protección de las fuentes compartidas. Los programas voluntarios no compensan incumplimientos ni sustituyen la conexión a los sistemas correspondientes (Morseletto et al., 2022; Silva, 2023a).

La jerarquía de gestión comienza con la prevención del consumo. Antes de buscar nuevas extracciones, desalación o abastecimientos externos, los hoteles deben revisar tuberías, edificios, equipos, limpieza, lavanderías, jardines y piscinas. Reducir la demanda disminuye tanto el suministro requerido como el caudal que debe tratarse (Fernandes y Cunha Marques, 2023; Gössling et al., 2012).

La medición agregada del establecimiento no basta para identificar oportunidades. Se necesitan medidores en habitaciones, lavanderías, cocinas, piscinas, jardines, torres de enfriamiento y áreas comunes. Los indicadores por huésped, habitación ocupada, comida servida o superficie irrigada deben complementarse con volúmenes absolutos para evitar que el crecimiento oculte aumentos de consumo (Morseletto et al., 2022).

Los dispositivos de bajo consumo, la detección de fugas y la participación informada de los huéspedes pueden mejorar la eficiencia en habitacio-

nes. La comunicación no debe trasladar toda la responsabilidad al visitante mientras el establecimiento mantiene jardines de alta demanda, equipos ineficientes o prácticas de limpieza excesivas (Gössling et al., 2012).

Las lavanderías concentran una parte relevante del consumo hotelero. Los ahorros provienen de equipos eficientes, cargas completas, recuperación de agua de enjuague, detección de fugas y programas voluntarios de cambio de ropa de cama. La subcontratación no elimina el consumo, sino que lo desplaza; por ello debe incluirse en la evaluación de la cadena de valor (Morseletto et al., 2022).

Las áreas verdes deben emplear especies adaptadas al clima y la salinidad, riego en horarios adecuados, control de humedad y menor superficie ornamental intensiva. Sustituir vegetación nativa por especies de alta demanda aumenta el consumo y puede requerir fertilizantes que se infiltran al acuífero (Gössling et al., 2012; UNESCO, 2024).

Las piscinas y elementos acuáticos presentan pérdidas por evaporación, limpieza, fugas y retrolavado. La eficiencia incluye mantenimiento, control de niveles, cubiertas cuando sean compatibles con el uso y recuperación de determinados flujos. Cualquier reúso debe cumplir condiciones sanitarias y evitar la concentración de productos químicos.

La economía circular amplía la gestión desde la eficiencia hacia la recirculación, el reúso y la recuperación de recursos. Su propósito es mantener el agua más tiempo en el sistema y utilizar una calidad adecuada para cada necesidad. El tratamiento deja de ser únicamente una etapa previa a la descarga y se convierte en una fuente para nuevos usos (Fernandes y Cunha Marques, 2023; Morseletto et al., 2022).

El agua tratada puede destinarse a servicios sanitarios, riego o limpieza. Las aguas grises de duchas y lavabos suelen tener una carga menor que las aguas negras, pero pueden contener microorganismos, detergentes y productos de higiene personal. Su reúso requiere tratamiento, redes independientes, almacenamiento protegido, señalización y monitoreo (Ho et al., 2024; Silva, 2023a).

El efluente de plantas municipales puede abastecer corredores turísticos para riego, limpieza urbana, áreas recreativas o servicios auxiliares. Esta alternativa genera economías de escala, pero requiere conducción, demanda estable, contratos y estándares de calidad (Georgiou et al., 2023).

El principio de calidad adecuada para cada uso evita emplear agua potable donde no es necesaria y previene la utilización de efluentes insuficientemente tratados en condiciones de exposición humana o ambiental. El tratamiento debe basarse en el riesgo, la vía de exposición, la acumulación y el destino final (Fernandes y Cunha Marques, 2023; Ho et al., 2024).

El enfoque de múltiples barreras combina prevención, tratamiento, desinfección, almacenamiento, monitoreo y prácticas de uso para evitar que una sola falla comprometa el sistema. En los hoteles, la exposición de trabajadores y visitantes hace especialmente importante la confiabilidad sanitaria (Ho et al., 2024).

Entre los tratamientos se encuentran filtración, sedimentación, procesos biológicos, remoción de nutrientes, desinfección, carbón activado, membranas y oxidación avanzada. La selección depende de la calidad de entrada y del uso previsto. Las tecnologías avanzadas pueden remover contaminantes específicos, pero requieren energía y generan lodos o concentrados que también deben gestionarse (Khan et al., 2024; Mejía-Marchena et al., 2023).

La remoción de nutrientes es especialmente importante en el acuífero costero. Una planta diseñada únicamente para reducir materia orgánica y microorganismos puede liberar nitrógeno o fósforo capaces de deteriorar cenotes, lagunas y sistemas costeros. Los objetivos de calidad deben definirse según el proyecto y el medio receptor (Bauer-Gottwein et al., 2011; UNESCO, 2024).

Los contaminantes emergentes añaden otra prioridad. Los productos farmacéuticos, cosméticos, protectores solares y desinfectantes pueden llegar a las aguas residuales. No todos presentan el mismo riesgo ni requieren igual tratamiento; su monitoreo debe priorizarse según las actividades, la exposición y la vulnerabilidad ambiental (Khan et al., 2024).

Los sistemas centralizados son adecuados para zonas urbanas densas con redes, caudales suficientes y capacidad operativa. Los sistemas descentralizados pueden servir a desarrollos alejados, islas o comunidades pequeñas. Su multiplicidad dificulta la supervisión y exige un esquema regional de operación y rendición de cuentas (Silva, 2023b).

Los sistemas descentralizados pueden instalarse con rapidez, pero requieren diseño acorde con el caudal, energía confiable, reposición de equi-

pos, retiro de lodos y capacitación. Una instalación abandonada o utilizada de manera intermitente puede convertirse en fuente de contaminación.

La conexión al alcantarillado es tan importante como la capacidad de tratamiento. Si viviendas y establecimientos permanecen desconectados, una planta puede quedar subutilizada; si recibe caudales superiores a los previstos, puede desbordarse o tratar inadecuadamente (CAPA, 2024; Silva, 2023b).

La infiltración de agua pluvial o subterránea en los colectores aumenta el caudal y reduce la eficiencia de las plantas. Las conexiones de drenaje pluvial al alcantarillado sanitario también provocan sobrecargas. La rehabilitación de redes forma parte esencial del saneamiento.

El tratamiento no concluye sin una gestión adecuada de lodos. Los biosólidos pueden contener materia orgánica, nutrientes, patógenos y compuestos químicos. La caracterización, estabilización, transporte y trazabilidad son necesarias para su aprovechamiento o disposición. Retirar contaminantes del agua y depositarlos de manera incontrolada en el suelo no constituye circularidad (Crovella et al., 2024).

Las alianzas público-privadas son relaciones contractuales de largo plazo mediante las cuales autoridades y actores privados distribuyen recursos, responsabilidades y riesgos para proveer infraestructura o servicios. En saneamiento pueden abarcar diseño, financiamiento, construcción, operación, mantenimiento, tratamiento avanzado y reúso (Lima et al., 2021; Ma et al., 2023).

Las modalidades incluyen concesiones con recuperación mediante tarifas; contratos de diseño, construcción, operación y mantenimiento con activos públicos; empresas mixtas; y acuerdos de compra de agua regenerada. Cada esquema distribuye de manera distinta la propiedad, el financiamiento y los riesgos.

La participación privada no implica eficiencia automática. Los resultados dependen de la capacidad institucional, la competencia, la regulación, la transparencia, la asignación de riesgos y la calidad contractual. Las alianzas pueden fomentar innovación, pero también generar rigidez, pasivos contingentes, asimetrías de información y renegociaciones costosas (Lima et al., 2021; Ma et al., 2023).

Los riesgos deben asignarse a quien tenga mayor capacidad para controlarlos. El socio privado puede asumir diseño, construcción, operación, mantenimiento y desempeño; el Estado conserva regulación, planeación y protección del derecho al agua y del ambiente. Los riesgos de demanda, calidad del afluente, energía y eventos extremos pueden requerir mecanismos compartidos (Global Infrastructure Hub, 2020).

El riesgo de demanda surge cuando la infraestructura se diseña para caudales superiores a los reales o los usuarios previstos no se conectan. Una planta sobredimensionada aumenta los costos unitarios, mientras una subdimensionada pierde capacidad conforme crece la demanda. Las proyecciones deben considerar residentes, población flotante, estacionalidad y desarrollos autorizados (Georgiou et al., 2023).

Las grasas, aceites, productos de limpieza, descargas comerciales y conexiones irregulares pueden alterar el afluente. Los hoteles, restaurantes y lavanderías necesitan pretratamiento cuando sus efluentes pueden afectar las plantas municipales. El operador debe identificar las fuentes y contar con instrumentos para corregirlas (Mejía-Marchena et al., 2023).

El riesgo energético es relevante porque el bombeo, la aireación y los tratamientos avanzados consumen electricidad. Los contratos deben incluir metas de eficiencia y mecanismos para gestionar las variaciones de precios sin eliminar los incentivos del operador. La energía renovable puede reducir emisiones, pero requiere respaldo y mantenimiento.

La remuneración vinculada con el desempeño puede mejorar los incentivos. Los pagos pueden considerar volumen tratado, calidad, disponibilidad, eficiencia energética, reducción de pérdidas y reúso, con deducciones por fallas atribuibles al operador y mecanismos para compartir ahorros verificables (Global Infrastructure Hub, 2020).

El valor público de una alianza comprende saneamiento, salud, protección ambiental, continuidad y acceso. La evaluación financiera debe compararse con alternativas más simples o menos costosas y verificar que el proyecto trate nutrientes, opere de manera continua y gestione los lodos (Lima et al., 2021).

Método de investigación

El capítulo se desarrolló mediante una investigación teórica y documental con enfoque cualitativo e integrador. El diseño permitió vincular literatura sobre turismo, seguridad hídrica, acuíferos kársticos, tratamiento y reúso de aguas residuales, economía circular y alianzas público-privadas.

La revisión incluyó artículos científicos, documentos estatales de planeación, información oficial sobre aguas subterráneas, estadísticas económicas, legislación ambiental e hídrica y estudios sobre gestión del agua en el turismo. Se priorizaron publicaciones de 2022 a 2025 y se incorporaron trabajos anteriores cuando resultaron necesarios para explicar la hidrogeología regional o conceptos fundamentales.

La búsqueda utilizó términos en español e inglés relacionados con turismo, consumo de agua, saneamiento hotelero, acuífero kárstico, cenotes, reúso de aguas residuales, contaminantes emergentes, alianzas público-privadas y Quintana Roo.

Los criterios de inclusión fueron pertinencia, procedencia académica u oficial, actualidad, claridad metodológica y posibilidad de transferencia al contexto turístico. Se excluyeron materiales promocionales y documentos que equiparaban la construcción de infraestructura con saneamiento sin examinar operación, conexiones y calidad.

La información se organizó en siete categorías: vulnerabilidad territorial; eficiencia turística; cobertura y operación del saneamiento; tratamiento y reúso en entornos costeros; distribución contractual de riesgos; financiamiento y equidad; y transparencia, monitoreo y participación social.

Los resultados constituyen una síntesis teórica y no una evaluación de operadores, hoteles o plantas específicas. La información pública no permite comparar homogéneamente consumo, conexiones, caudales tratados, calidad y costos entre municipios y establecimientos. Esta limitación constituye un problema de gobernanza.

Resultados

Vulnerabilidad territorial y planeación del crecimiento

El primer resultado es que la planeación del saneamiento debe seguir los límites funcionales del acuífero y no solo las fronteras administrativas. Las zonas de desarrollo, cenotes, humedales, lagunas y costas están conectadas por flujos subterráneos, de modo que una descarga infiltrada puede afectar sitios alejados del origen (Bauer-Gottwein et al., 2011).

Los proyectos nuevos deben autorizarse únicamente cuando exista capacidad comprobada de abastecimiento, recolección, tratamiento, disposición y reúso. Disponer de suelo o capital no significa que el agua esté disponible. Los impactos acumulativos de todos los desarrollos deben evaluarse de manera conjunta.

La planeación debe diferenciar áreas consolidadas, corredores de crecimiento, islas, comunidades rurales y zonas ecológicamente sensibles. Cancún y Playa del Carmen pueden favorecer soluciones centralizadas; otros territorios requieren sistemas modulares, humedales construidos o tratamientos descentralizados con supervisión regional.

Las proyecciones deben incorporar población flotante, ocupación hotelera, trabajadores y variaciones estacionales. Diseñar únicamente con base en residentes registrados puede subestimar las necesidades de los destinos turísticos (Gobierno del Estado de Quintana Roo, 2023; Secretaría de Turismo de Quintana Roo, 2024).

Los permisos de construcción deben condicionarse a capacidad real desde el inicio de las operaciones. Las cartas de factibilidad no deben basarse en la expectativa de que la infraestructura se construirá después de aprobar el desarrollo.

Cuando un proyecto genera demanda adicional de infraestructura, debe contribuir a financiarla mediante aportaciones, derechos de conexión u otros mecanismos transparentes. Así se evita que la población existente subsidie el crecimiento privado.

Eficiencia hídrica en el sector turístico

El segundo resultado es que la eficiencia debe preceder a la expansión de la oferta. Los hoteles requieren balances por proceso, metas absolutas y programas de detección de fugas. El monitoreo mensual agregado debe complementarse con datos de habitaciones, lavanderías, cocinas, piscinas y jardines (Gössling et al., 2012; Morseletto et al., 2022).

Las métricas por habitación ocupada permiten comparar periodos y establecimientos, pero pueden mejorar simplemente por mayor ocupación. Deben acompañarse del consumo total, el origen del agua y el volumen de aguas residuales generado.

La detección digital ayuda a reducir fugas en redes internas, habitaciones, equipos y jardines. Los sensores deben conectarse con protocolos de reparación, inventarios y responsables. Las alertas sin seguimiento operativo tienen poco valor.

Las lavanderías requieren control de cargas, operación eficiente y recuperación de corrientes. Cuando el servicio se subcontrata, el hotel debe evaluar el consumo y las descargas del proveedor para evitar que las mejoras internas sean solo un desplazamiento territorial.

Los jardines deben emplear especies adaptadas al clima y la salinidad. La vegetación ornamental de alta demanda aumenta el consumo y, combinada con fertilización y riego excesivos, incrementa la infiltración de nutrientes. El agua regenerada puede utilizarse cuando su calidad y aplicación protegen a trabajadores, huéspedes y acuíferos.

Las piscinas requieren detección de fugas, control de niveles, recirculación y mantenimiento. El agua de retrolavado contiene sólidos y desinfectantes y, por lo general, necesita tratamiento antes de reutilizarse o descargarse.

Los balances deben incluir los sistemas de agua caliente y enfriamiento. Los condensados pueden recuperarse cuando se generan en cantidades suficientes, y las torres de enfriamiento deben optimizar el consumo de agua y energía. Cualquier sustitución tecnológica requiere una evaluación integral de desempeño.

Las certificaciones ambientales pueden promover buenas prácticas, pero no sustituyen la medición pública ni el cumplimiento. Los criterios deben

demostrar resultados y no basarse únicamente en políticas o equipos instalados.

Conexión, recolección y tratamiento efectivo

El tercer resultado es que la cobertura de saneamiento debe medirse como acceso funcional y no como mera existencia de tuberías o plantas. Un sistema incompleto permite que las aguas residuales continúen infiltrándose, aunque se haya construido infraestructura básica (CAPA, 2024; Silva, 2023b).

Se necesita un inventario georreferenciado de hoteles, viviendas, comercios, plantas, fosas sépticas y puntos de descarga. Esta información permite identificar usuarios sin conexión, infraestructura obsoleta y establecimientos con tratamiento propio.

La conexión debe ser obligatoria cuando existe una red con capacidad suficiente. Los sistemas individuales solo deberían mantenerse cuando demuestren un desempeño equivalente o superior mediante monitoreo continuo.

Las inspecciones deben detectar conexiones irregulares entre drenaje pluvial y sanitario. Las lluvias pueden sobrecargar plantas y estaciones de bombeo, mientras las descargas sanitarias hacia sistemas pluviales alcanzan directamente el territorio.

La operación debe reportar disponibilidad, caudal recibido y tratado, materia orgánica, nutrientes, microorganismos, energía y lodos. La capacidad nominal no informa cuánto se trata efectivamente ni con qué calidad.

La operación requiere presupuestos plurianuales. Construir con recursos extraordinarios es insostenible cuando las tarifas o contratos no cubren energía, personal, reactivos, laboratorios, mantenimiento y reposición de equipos.

Los establecimientos con plantas propias deben reportar caudal, calidad, incidentes y destino del efluente. La supervisión no puede concluir con la autorización inicial, pues los sistemas se deterioran con el tiempo.

Las plantas pequeñas pueden operar bajo un gestor regional especializado. Este modelo conserva instalaciones descentralizadas y comparte laboratorios, mantenimiento, refacciones y personal.

Tratamiento basado en riesgos y protección del acuífero

El cuarto resultado es que la calidad del efluente debe definirse según la vulnerabilidad del acuífero y el destino final. Cumplir un límite general puede ser insuficiente para una infiltración en sistemas kársticos conectados con cenotes y el mar (Bauer-Gottwein et al., 2011; Khan et al., 2024).

La NOM-001-SEMARNAT-2021 actualizó los límites de descargas en cuerpos receptores propiedad de la nación. Sin embargo, la infiltración, el alcantarillado, el reúso y las condiciones locales pueden requerir disposiciones adicionales. La coordinación regulatoria debe evitar que una descarga aceptable bajo un criterio resulte insuficiente frente a otro (Diario Oficial de la Federación [DOF], 2022).

Las plantas ubicadas en zonas vulnerables deben incorporar remoción de nitrógeno y fósforo. El tratamiento secundario convencional reduce materia orgánica y microorganismos, pero puede ser insuficiente para controlar nutrientes.

La desinfección debe equilibrar la inactivación de microorganismos con la prevención de subproductos. El cloro es eficaz y mantiene un residual, pero puede combinarse con radiación ultravioleta u otras tecnologías según la calidad y el uso previsto.

Se requiere una estrategia de priorización para contaminantes emergentes. No es viable medir permanentemente todas las sustancias. El monitoreo debe basarse en las actividades, los compuestos utilizados, los riesgos, la exposición y la capacidad de remoción (Khan et al., 2024).

Los hospitales, lavanderías y otras instalaciones con efluentes particulares pueden requerir pretratamiento. La descarga indiscriminada traslada contaminantes a sistemas municipales que no fueron diseñados para eliminarlos.

Los pozos de absorción no deben utilizarse como una vía simple para ocultar descargas. Su autorización requiere evaluar calidad, profundidad, flujo subterráneo, distancia a captaciones y capacidad de monitoreo.

Los lodos deben contar con rutas legales y trazables. Las plantas pequeñas pueden acumularlos o entregarlos a transportistas sin control suficiente. Los contratos deben establecer el destino final y conservar registros verificables.

Reúso y circularidad en los destinos turísticos

El quinto resultado es que el reúso reduce extracciones y descargas cuando sustituye agua convencional. Los usos iniciales más viables son riego, servicios sanitarios, limpieza urbana y determinados sistemas de enfriamiento (Fernandes y Cunha Marques, 2023; Georgiou et al., 2023).

Los hoteles con plantas propias pueden instalar redes internas de agua regenerada. La infraestructura requiere señalización, prevención de conexiones cruzadas, almacenamiento protegido y monitoreo de calidad.

Las redes de agua regenerada pueden abastecer corredores hoteleros desde plantas municipales. Los establecimientos funcionan como usuarios ancla y pueden contratar el tratamiento adicional y la conducción necesarios.

Los contratos deben definir calidad, volumen, presión, continuidad, tarifas y respuesta ante incumplimientos. El proveedor responde por la calidad hasta el punto de entrega y el hotel por la operación de su red interna.

El agua regenerada no debe utilizarse para ampliar indefinidamente jardines, campos recreativos o elementos ornamentales. El proyecto necesita una línea base y debe demostrar una reducción posterior del consumo convencional.

El mismo volumen puede contabilizarse varias veces y producir porcentajes engañosos. Los indicadores deben distinguir agua regenerada suministrada, uso consuntivo y agua subterránea o potable efectivamente sustituida.

La recarga gestionada de acuíferos es más compleja que el reúso no potable. La elevada conectividad kárstica puede transportar contaminantes con rapidez. Cualquier proyecto exige tratamiento avanzado, evaluación hidrogeológica, monitoreo y planes de contingencia.

La captación de lluvia puede complementar el reúso, especialmente en techos y superficies controladas. Su estacionalidad y necesidad de almacenamiento impiden considerarla un sustituto del saneamiento.

Alianzas público-privadas para infraestructura y operación

El sexto resultado es que las alianzas deben responder a problemas específicos. No se requiere una concesión integral para todas las necesidades. Los contratos pueden limitarse a construcción, rehabilitación, operación, reducción de fugas, tratamiento avanzado o suministro de agua regenerada (Lima et al., 2021; Ma et al., 2023).

La autoridad debe comparar contratación tradicional, operación pública fortalecida, gestión regional y alianzas de largo plazo. La participación privada solo se justifica cuando la transferencia de riesgos, las capacidades y las mejoras de eficiencia compensan su mayor costo financiero.

Los contratos de diseño, construcción, operación y mantenimiento vinculan el diseño con el costo del ciclo de vida. Cuando la remuneración depende del desempeño, el operador tiene incentivos para elegir equipos confiables y mantenerlos.

Los hoteles pueden participar mediante contratos de compra de agua regenerada, aportaciones a redes troncales y fondos de saneamiento. La nueva capacidad puede financiarse en proporción a los beneficios obtenidos por cada empresa.

La infraestructura requerida por un desarrollo inmobiliario debe ser financiada por el desarrollador. Aprobar proyectos con la expectativa de que el gobierno ampliará los servicios posteriormente traslada costos privados a la sociedad.

Los contratos no deben otorgar abastecimiento prioritario a una empresa por haber financiado infraestructura. Durante emergencias, el consumo humano y doméstico debe conservar la prioridad conforme a la normativa aplicable.

La infraestructura estratégica puede permanecer en propiedad pública aunque sea operada por un privado. El contrato debe regular mantenimiento, reposición, reversión de activos y transferencia de información y tecnología.

Las cláusulas de terminación deben permitir restablecer la operación ante incumplimiento grave, insolvencia o riesgo sanitario y asegurar la continuidad del servicio durante la transición.

Distribución de riesgos y desempeño

El séptimo resultado es asignar cada riesgo a la parte con mayor capacidad para gestionarlo. El socio privado puede asumir diseño y construcción; la autorización y planeación corresponden al sector público; y la demanda, la calidad del afluente, la energía y los eventos extremos pueden requerir mecanismos compartidos (Global Infrastructure Hub, 2020).

Los riesgos de construcción incluyen retrasos, sobrecostos y desempeño de los equipos. Los pagos deben condicionarse a la puesta en servicio y a pruebas de desempeño, no solo a la terminación física de la obra.

La operación comprende calidad, continuidad, mantenimiento, energía y gestión de lodos. Los contratos deben establecer indicadores durante toda su vigencia y deducciones automáticas cuando las fallas sean atribuibles al operador.

El riesgo de demanda depende de las conexiones y los caudales reales. El gobierno debe establecer reglas de conexión y planear adecuadamente; pagar toda la capacidad ociosa derivada de proyecciones deficientes puede generar costos injustificados.

Las bandas de precios, metas de eficiencia y mecanismos para compartir ahorros pueden distribuir el riesgo energético. Trasladar todos los aumentos al sector público elimina incentivos para optimizar el consumo.

Los planes de continuidad deben cubrir huracanes, inundaciones y fallas eléctricas mediante energía de respaldo, almacenamiento, protección física y procedimientos para evitar descargas sin tratamiento.

La definición de fuerza mayor no debe ser tan amplia que permita al operador eludir la responsabilidad por falta de mantenimiento. El contrato debe distinguir los eventos extraordinarios de las fallas previsibles.

La calidad variable del afluente debe controlarse antes de la descarga. Cuando ingresan sustancias no autorizadas, el operador puede perder capacidad para garantizar resultados, pero debe contar con monitoreo para detectarlas y la autoridad debe inspeccionar y sancionar.

Financiamiento, tarifas y equidad

El octavo resultado es la necesidad de financiamiento sostenible para el saneamiento. Las tarifas, derechos de conexión, aportaciones de desarrolladores, recursos públicos y pagos por agua regenerada pueden combinarse según la naturaleza del proyecto.

Las tarifas deben reflejar razonablemente los costos de operación y mantenimiento y proteger el consumo doméstico básico. Los subsidios generales suelen beneficiar más a los usuarios de mayor consumo; el apoyo focalizado protege mejor a los hogares vulnerables (UNESCO, 2024).

El turismo genera demanda, ingresos y externalidades que justifican mecanismos específicos de contribución. Una proporción transparente y trazable de los ingresos o impuestos vinculados con el desarrollo turístico puede destinarse al saneamiento.

Las aportaciones empresariales no sustituyen las tarifas ordinarias. Un hotel que financia una iniciativa conjunta conserva la obligación de pagar los servicios y cumplir los límites aplicables.

Los fondos deben publicar ingresos, proyectos, contratos, tarifas y resultados. Sin trazabilidad, el saneamiento puede convertirse en un instrumento discrecional o reputacional.

La selección de proyectos debe priorizar riesgos y beneficios territoriales, no solo la visibilidad turística. Los barrios de trabajadores y las comunidades locales también requieren agua, alcantarillado y saneamiento.

La planeación fiscal debe reconocer los pasivos contingentes de las alianzas, como garantías, pagos mínimos independientemente de la demanda y compensaciones por terminación (Global Infrastructure Hub, 2020).

Transparencia, monitoreo y participación social

El noveno resultado es que la gobernanza necesita información sobre disponibilidad, redes, plantas, calidad, tarifas y contratos. Los datos deben presentarse por municipio, sistema e instalación con metodologías comparables.

Los operadores públicos y privados deben informar capacidad, volumen recibido y tratado, cumplimiento, energía, incidentes, lodos y agua regenerada.

Los datos excesivamente agregados impiden identificar instalaciones problemáticas.

El monitoreo empresarial debe validarse mediante laboratorios acreditados y muestreos independientes. El operador puede generar datos operativos, pero no controlar por completo la evaluación regulatoria.

El acuífero requiere una red que integre pozos, cenotes, lagunas y zonas costeras. Los datos de niveles, conductividad, nutrientes y microorganismos permiten detectar tendencias y orientar inspecciones (Bauer-Gottwein et al., 2011).

Las universidades y centros de investigación pueden apoyar la supervisión, modelación y evaluación tecnológica. Deben transparentar el financiamiento y conservar la libertad para publicar resultados desfavorables.

Las comunidades deben participar desde la planeación. Su conocimiento permite identificar barrios con malos olores, desbordamientos, depósitos de residuos, fosas y cambios en cenotes. Estas observaciones deben combinarse con investigaciones sistemáticas para mejorar el diagnóstico.

Los residentes, trabajadores y visitantes necesitan mecanismos de queja accesibles, con plazos, seguimiento y publicación de acciones correctivas.

Los contratos deben publicar duración, obligaciones, garantías, indicadores, tarifas y procedimientos de renegociación. Las obligaciones fiscales, los parámetros ambientales y los incumplimientos no pueden ocultarse mediante confidencialidad comercial.

Protección de ecosistemas y resiliencia climática

El décimo resultado es que el saneamiento debe integrarse con la protección de cenotes, manglares, humedales, lagunas y arrecifes. Estos ecosistemas no son elementos aislados, sino componentes conectados con la circulación y calidad del agua (Bauer-Gottwein et al., 2011; UNESCO, 2024).

Ordenamiento territorial de zonas de recarga y corredores subterráneos

La eliminación de vegetación y la construcción en zonas vulnerables sellan el suelo, modifican la infiltración y aumentan la exposición a contaminantes.

Los manglares y humedales contribuyen a la regulación hidrológica y al tratamiento natural de determinados flujos, pero su capacidad es limitada. No deben utilizarse como receptores de efluentes insuficientemente tratados ni sustituir instalaciones adecuadas.

Las soluciones basadas en la naturaleza pueden complementar plantas descentralizadas y controlar escurrimientos. Su diseño debe considerar carga, superficie, mantenimiento, mosquitos, salinidad y eventos extremos.

Los huracanes pueden interrumpir la energía, dañar estaciones de bombeo y provocar desbordamientos. Los sistemas requieren generadores, almacenamiento, protección física y equipos de respuesta.

Las extracciones costeras pueden alterar el equilibrio entre agua dulce y salada y favorecer la intrusión marina. La eficiencia y el reúso pueden reducir el bombeo, pero sus efectos deben validarse mediante análisis hidrogeológicos (Bauer-Gottwein et al., 2011).

El cambio climático modifica los patrones de precipitación, eleva el nivel del mar y agrava los eventos extremos. La infraestructura debe diseñarse para condiciones futuras y no únicamente con base en registros históricos (UNESCO, 2024).

Modelo de turismo y saneamiento corresponsable

A partir del análisis se propone un modelo integrado con ocho componentes: planeación territorial; eficiencia turística; conexión universal; tratamiento basado en riesgos; reúso; alianzas basadas en desempeño; financiamiento equitativo; y monitoreo independiente con participación social.

La planeación territorial vincula el crecimiento con la capacidad de abastecimiento y saneamiento. La eficiencia turística reduce la demanda y los caudales posteriores al consumo. La conexión universal evita descargas aisladas cuando existe infraestructura disponible.

El tratamiento basado en riesgos adapta la calidad a la vulnerabilidad del acuífero y al uso previsto. El reúso sustituye agua convencional. Las alianzas distribuyen inversiones y responsabilidades mediante indicadores verificables.

El financiamiento equitativo asigna contribuciones a los desarrollos que generan y reciben beneficios, mientras protege el consumo básico. La información pública y el monitoreo independiente permiten ajustar las decisiones.

El modelo opera en tres escalas: la propiedad, donde se controlan consumo y descargas; el corredor turístico, donde se comparten redes, plantas y reúso; y el acuífero, donde se evalúan calidad, extracciones y ecosistemas.

Los indicadores deben incluir consumo absoluto y por huésped, pérdidas, conexiones, caudal recolectado y tratado, remoción de materia orgánica, nutrientes y microorganismos, agua regenerada, agua convencional sustituida, energía, lodos, incidentes, continuidad del servicio y evolución de los ecosistemas.

La evaluación debe abarcar toda la vida útil de la infraestructura. Una planta puede cumplir al inicio y deteriorarse por falta de mantenimiento, crecimiento de la demanda o cambios del afluente. Los contratos y programas públicos requieren revisiones periódicas.

Los logros no deben medirse solo por el número de plantas, kilómetros de tubería o recursos invertidos. El resultado final debe ser una reducción sostenida de descargas, captaciones y riesgos, acompañada de mayor acceso y protección de los ecosistemas.

Conclusiones

El turismo es una actividad económica fundamental para Quintana Roo, pero su sostenibilidad depende de un acuífero kárstico vulnerable y de ecosistemas vinculados con el agua subterránea. La degradación de estas fuentes afecta la salud, la población, la competitividad y el patrimonio natural.

El crecimiento turístico y urbano debe corresponder con la capacidad de abastecimiento y saneamiento. Autorizar desarrollos sin infraestructura traslada costos al Estado, a los residentes y a los ecosistemas.

La eficiencia hotelera constituye la primera línea de acción. La demanda puede reducirse mediante medición, detección y reparación de fugas, sustitución de equipos ineficientes, gestión de lavanderías, paisajismo adaptado y recuperación de corrientes. Las mejoras relativas deben acompañarse de metas absolutas.

La conexión al alcantarillado es tan importante como la construcción de plantas. La capacidad nominal no produce saneamiento cuando los usuarios permanecen desconectados o las redes presentan fugas y sobrecargas.

El tratamiento debe responder a la vulnerabilidad del acuífero, la remoción de nutrientes, los contaminantes emergentes y el destino del efluente. Cumplir un límite general no garantiza por sí mismo la protección de cenotes, lagunas o arrecifes.

El reúso reduce captaciones cuando sustituye agua potable o subterránea. Su contribución debe medirse mediante el volumen efectivamente desplazado y no solo con porcentajes internos de recirculación.

Las alianzas público-privadas pueden movilizar capital, tecnología y capacidad operativa. Su conveniencia depende de la competencia, la asignación de riesgos, la rendición de cuentas, la transparencia y la supervisión pública.

La participación privada no exime al Estado de planear, regular y proteger el derecho humano al agua y al saneamiento. Los contratos no deben otorgar derechos preferentes de abastecimiento a las empresas.

Los desarrolladores y establecimientos que generan nueva demanda deben contribuir a financiar la infraestructura correspondiente. Las comunidades existentes no deben subsidiar la expansión privada.

La legitimidad también depende de la equidad. Los barrios de trabajadores y las comunidades locales deben recibir prioridad en agua, alcantarillado y saneamiento, y no únicamente los corredores turísticos.

El monitoreo debe integrar plantas, pozos, cenotes y sistemas costeros. La información pública sobre caudales, calidad, contratos e incidentes reduce las asimetrías y permite evaluar resultados.

El modelo conecta la propiedad, el corredor turístico y el acuífero. Su éxito dependerá de que las mejoras internas produzcan beneficios territoriales verificables y no solo seguridad privada para los establecimientos.

Quintana Roo necesita una relación entre turismo e infraestructura que proteja el agua. Para ser sostenible, el sector debe financiar, operar y conservar los sistemas de los que depende, sin trasladar riesgos a la población ni degradar los ecosistemas que constituyen su principal atractivo.

Referencias

Bauer-Gottwein, P., Gondwe, B. R. N., Charvet, G., Marín, L. E., Rebolledo-Vieyra, M., y Merediz-Alonso, G. (2011). Review: The Yucatán Peninsula karst aquifer, Mexico. *Hydrogeology Journal, 19,* 507-524. https://doi.org/10.1007/s10040-010-0699-5

Comisión de Agua Potable y Alcantarillado del Estado de Quintana Roo. (2024). Programa Institucional de la Comisión de Agua Potable y Alcantarillado 2023-2027. Gobierno del Estado de Quintana Roo.

Comisión Nacional del Agua. (2024). Disponibilidad media anual de agua subterránea en los acuíferos del estado de Quintana Roo. Gobierno de México.

Crovella, T., Paiano, A., Falciglia, P. P., Lagioia, G., e Ingrao, C. (2024). Wastewater recovery for sustainable agricultural systems in the circular economy: A systematic literature review of life cycle assessments. *Science of the Total Environment, 912,* 169310. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.169310

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=5645374yfecha=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

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

Global Infrastructure Hub. (2020). PPP risk allocation tool 2019 edition. https://ppp-risk.gihub.org/

Gobierno del Estado de Quintana Roo. (2023). Plan Estatal de Desarrollo Quintana Roo 2023-2027.

Gössling, S., Peeters, P., Hall, C. M., Ceron, J.-P., Dubois, G., Lehmann, L. V., y Scott, D. (2012). Tourism and water use: Supply, demand, and security. An international review. *Tourism Management, 33*(1), 1-15. https://doi.org/10.1016/j.tourman.2011.03.015

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.

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

Lima, S., Brochado, A., y Marques, R. C. (2021). Public-private partnerships in the water sector: A review. *Utilities Policy, 69,* 101182. https://doi.org/10.1016/j.jup.2021.101182

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

Morseletto, P., Mooren, C. E., y Munaretto, S. (2022). Circular economy of water: Definition, strategies and challenges. *Circular Economy and Sustainability, 2,* 1463-1477. https://doi.org/10.1007/s43615-022-00165-x

Secretaría de Turismo de Quintana Roo. (2024). Indicadores turísticos de Quintana Roo 2024. Gobierno del Estado de Quintana Roo.

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

Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura. (2024). Informe mundial de las Naciones Unidas sobre el desarrollo de los recursos hídricos 2024: Agua para la prosperidad y la paz. UNESCO.