

Gestión y Manejo del Agua en Grandes Ciudades

Eugenio Gómez Reyes
Marco Antonio Jacobo Villa
Felipe de Jesús Armas Vargas
Erick Raúl Olvera Prado
Ingeniería hidrológica
Universidad Autónoma Metropolitana
Unidad Iztapalapa



Abstract

An overview of water administrative structure and water management and their challenges in big cities is presented. Research contributions by the Hydrological Engineering Group (GIH) of the Department of Processes Engineering and Hydraulics of the UAM-Iztapalapa are described, regarding the management and handling of water resources. Likewise, future challenges and actual water research projects under development by GIH, regarding water administrative structure and management, are emphasized.

Keywords: Water administrative structure, water management, supply and demand, Hydrological Engineering, water research projects.

Resumen

Se presenta una revisión general de los conceptos de gestión y manejo del agua, así como los retos por contender en las grandes ciudades. Se describen las contribuciones de investigación por el Grupo de Ingeniería Hidrológica (GIH) del Departamento de Ingeniería de Procesos e Hidráulica de la UAM-Iztapalapa, en cuanto a la gestión y manejo del recurso hídrico. Asimismo, se

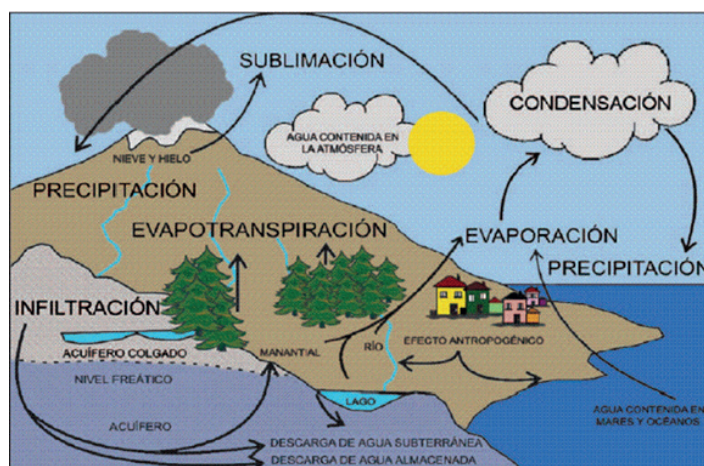
enfatan las perspectivas de las temáticas de investigación y lo que está desarrollando el GIH en relación con la gestión y manejo del agua.

Palabras claves: Gestión del agua, manejo del agua, oferta y demanda, Ingeniería Hidrológica, proyectos de investigación del agua.

1. ¿Quién nos da el agua?

La naturaleza, a través de la lluvia, proporciona el agua que tenemos en nuestra región. La lluvia es una parte fundamental del ciclo del agua (Fig. 1), ya que constituye el agua que se renueva. Sin embargo, no llueve lo mismo en cada lugar ni en cada instante de tiempo. De ahí que cuando las lluvias son menos frecuentes o escasas, pueden ocurrir graves desequilibrios en donde el agua es necesaria. Por ejemplo, en la agricultura, la temperatura aumenta e impide el crecimiento de la vegetación, el suelo se degrada y agrieta.

El ciclo del agua es un conjunto de procesos simultáneos de transferencia de masas de agua interrelacionados, como se muestran en la Figura 1 (De Miguel *et al.*, 2009), en



Fuente: De Miguel *et al.* (2009).

Figura 1. Ciclo del Agua.

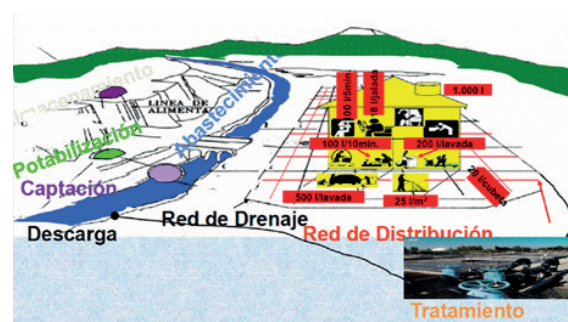
donde el sol aporta la energía necesaria para romper los enlaces que mantienen unidas las moléculas de agua. Este proceso de cambio de estado de fase líquida a gas (vapor de agua) se denomina evaporación. Cuando la humedad relativa del aire llega a su punto de saturación, comienza la condensación, proceso por el cual el vapor de agua del aire se transforma en agua líquida dando lugar a la formación de nubes. Estas nubes, en determinadas condiciones de presión y temperatura originan precipitaciones (en forma de lluvia); aunque también puede ocurrir en forma de nieve y acumularse en los glaciares. Su fusión, junto con el resto de precipitaciones da lugar al agua superficial y subterránea. Donde una parte del agua superficial fluye hasta el mar; otra se infiltra en el suelo y el resto, se evapora. Una vez el agua infiltrada, atraviesa la zona no saturada, donde puede evapotranspirarse por acción de las plantas o fluir hasta el acuífero (zona saturada) (De Miguel *et al.*, 2009).

El hombre ha intervenido y es un agente activo del ciclo del agua, logrando adaptarlo a sus necesidades mediante la construcción de presas y acueductos (entubamiento del agua), la explotación de los acuíferos (pozos de extracción de agua subterránea), la promoción de la condensación (bombardeo de nubes con yoduro de plata) y posterior precipitación pluvial. Los efectos de las alteraciones al ciclo del agua necesitan ser comprendidos para enfrentar los desafíos de estos cambios.

2. ¿Quién entrega el agua?

El servicio de entrega del agua (gestión del agua) a las grandes ciudades es un tema muy importante que recientemente ha sido investigado de manera intensa, sobre todo para la problemática de la se-

guía. En nuestro país, la entrega de agua a los Estados (agua en bloque; el total de volumen de agua requerido en esos Estados) que nos da la naturaleza (lluvia, ríos, lagos, lagunas, presas, manantiales, acuíferos), la realiza la CONAGUA (Comisión Nacional del Agua) quien tiene la responsabilidad de gestionar y administrar los recursos hídricos a nivel federal, mediante la adecuada utilización de la infraestructura hidráulica. El agua en bloque la reciben los organismos operadores del agua. En el caso de la Ciudad de México es el SACMEX (Sistema de Aguas de la Ciudad de México), como lo es la CAEM (Comisión del Agua del Estado de México) en el Estado de México o la CAASIM (Comisión de Agua y Alcantarillado de Sistemas Intermunicipales) en Hidalgo, quienes tienen la responsabilidad de hacer llegar el agua potable y dar servicio de drenaje a los habitantes de las ciudades, con la cantidad y calidad necesaria, mediante la adecuada utilización de las redes de distribución de agua y drenaje, así como la operación de las plantas de potabilización y las de tratamiento del agua residual (saneamiento). La Figura 2 muestra esquemáticamente la infraestructura hidráulica para hacer llegar el agua a las ciudades.



Fuente: elaboración propia.

Figura 2. Aprovechamiento del agua.

El agua es uno de los principales factores que influye en el crecimiento pobla-

cional, desarrollo económico y seguridad alimentaria de las ciudades. Sin embargo, satisfacer la sed de las grandes ciudades siempre ha sido un problema para los que entregan el agua (gestores). Actualmente, 55% de la población mundial vive en áreas urbanas, y se espera que aumente en un 68% para el 2050, lo que significa un aumento de 2.5 billones de personas que necesitarán más agua; el promedio de requerimiento de agua por habitante (per cápita) mundial es de 6,000 m³/habitante/año (FAO, 2016). En la región de América Latina y el Caribe, abunda el agua que puede satisfacer un requerimiento per cápita de 28,000 m³ (4 veces más del promedio mundial). Sin embargo, el agua no está disponible para los ciudadanos de manera fácil y equitativa. Esto es un indicativo de una mala gestión del agua.

Por otro lado, Sudáfrica es un buen ejemplo de un país carente de agua (*water scarce country*) que se sobrepuso a una mala gestión del agua. Durante 2017-2018, Ciudad del Cabo sufrió una fuerte crisis de agua en la que los niveles de sus presas bajaron a 11% de su capacidad, poniendo a la ciudad en riesgo de ser la primera en el mundo de quedarse completamente sin agua. La ciudad respondió implementando una serie de restricciones de agua agresivas, y logró reducir el consumo diario de agua en un 50%. El agua que pudo ser reservada como resultado, junto con la buena temporada de lluvias del verano de 2018, provocaron que las reservas de agua en las presas subieran al 70% para septiembre de ese año.

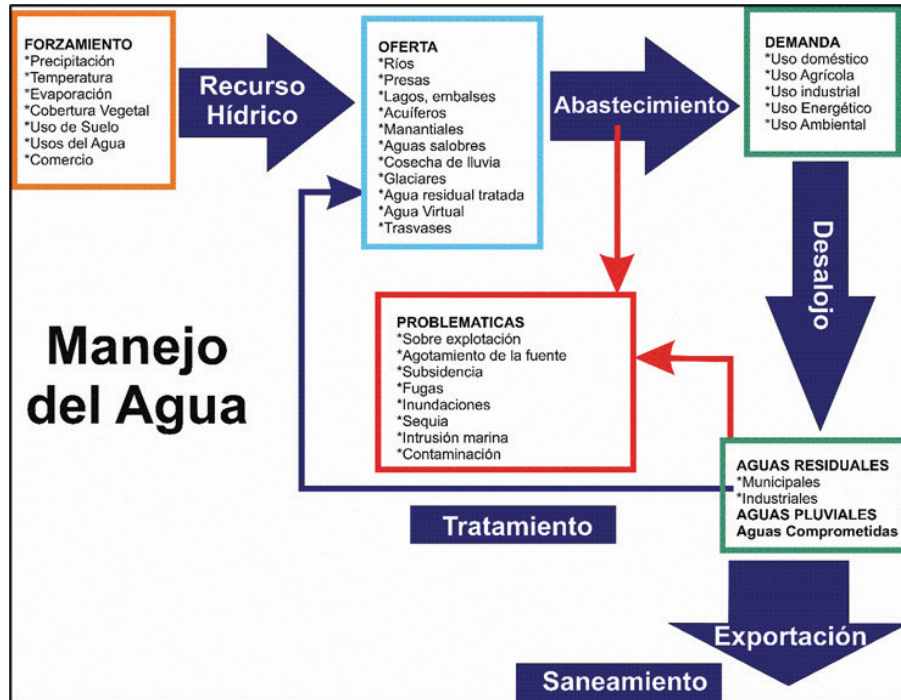
En México, se ha adoptado la “Gestión Integrada de los Recursos Hídricos (GIRH)”, definida en la Ley de Aguas Nacionales (LAN) de 2012, como el pro-

ceso que promueve la gestión y desarrollo coordinado del agua, la tierra, los recursos relacionados con estos y el ambiente, con el fin de maximizar el bienestar social y económico equitativamente sin comprometer la sustentabilidad de los ecosistemas vitales, esto es, una gestión íntimamente vinculada con el desarrollo sustentable.

3. ¿Qué involucra la entrega de agua?

La entrega de agua (manejo del agua) involucra el conocimiento de la disponibilidad, funcionamiento y variabilidad de las fuentes de agua que nos da la naturaleza (lluvia, ríos, lagos, lagunas, presas, manantiales, acuíferos), así como de los eventos ambientales, económicos y sociales que tienen influencia en ellas (Fig. 3). Asimismo, involucra las prácticas operativas de los aprovechamientos de las fuentes de agua para satisfacer la demanda en cantidad y calidad de las ciudades, generada por sus diversos usos del agua (hidroeléctricas, doméstico, agrícola, conservación ecológica, industrial, agroindustrial, acuicultura, servicios, termoelectricas, pecuario, múltiples, comercio, público urbano y otros).

El manejo de los recursos hídricos no solo contempla el abastecimiento de agua para satisfacer la demanda de sus diversos usos, sino que también considera el desalojo, tratamiento y reúso de las aguas usadas a las que se han incorporado productos de desecho (aguas residuales). También involucra el análisis y alternativas de solución de las problemáticas del agua generada por un deficiente manejo (sobreexplotación y agotamiento de las fuentes, hundimiento del suelo, fugas de agua, inundaciones, sequías, intrusión salina, contaminación).



Fuente: elaboración propia.

Figura 3. Representación esquemática del manejo del agua.

4. ¿Cuáles son los retos de la gestión y manejo del agua?

Hacer más sustentable la gestión del agua. Las acciones actualmente implementadas de gestión del agua en México están concentradas en atender las demandas crecientes de agua, resultado de las actividades económicas predominantes en las ciudades. Por consiguiente, alcanzar una GIRH en el país enfrenta grandes desafíos, dado que difícilmente las instituciones responsables del manejo del agua, en particular las que se encuentran en el nivel local, cuentan con los recursos financieros, humanos y tecnológicos suficientes (Sosa-Rodríguez *et al.*, 2020). Es por ello, que resulta necesario aplicar otros enfoques de gestión que mantengan los aspectos primordiales de la GIRH como son participación, gobernanza del agua, descentralización de funciones y sosteni-

bilidad de los recursos; además de considerar aspectos sociales, ambientales, culturales, legales, institucionales, políticos, financieros, equidad, justicia, simpleza de aplicación y, sobre todo, capacidad de medición y seguimiento. Una alternativa corresponde al Prisma de la Gobernanza de Cuencas, enfoque de gestión que reúne las características mencionadas y el cual se ha aplicado en la Cuenca del Río Duero, Mich. (Armas-Vargas *et al.*, 2022; 2023).

La seguridad alimentaria. Los efectos del cambio climático se acentuarán en las zonas con rápidos procesos de urbanización, sin dejar de lado los impactos en el medio rural por la disponibilidad del agua y los cambios de temperatura, que podría derivar en el desplazamiento y rendimiento de las zonas de cultivo (Estadísticas del Agua en México, 2018). En consecuencia, es ne-

cesario evaluar alternativas de adaptación climática para contender con la amenaza de la seguridad alimentaria.

Fuentes de abastecimiento no convencionales. En la medida que el agua se ha vuelto escasa en muchas ciudades del mundo, el manejo del agua ha incorporado nuevas fuentes de abastecimiento no convencionales para reducir la demanda de agua, *v.gr.*, cosecha de lluvia, recuperación de agua perdida por fugas, agua residual tratada, agua virtual. Sin embargo, hay que tener en cuenta que estas técnicas no siempre aseguran el completo abastecimiento de agua, aunque estén bien diseñadas, sobre todo la cosecha de lluvia toda vez que no llueve todos los días del año. Asimismo, es imposible la eliminación total de las fugas, pero si es viable la implementación de planes, basados en tecnologías innovadoras, para la recuperación de la mayor parte de los volúmenes perdidos. En este sentido, el reto consiste en mejorar las técnicas de aprovechamiento de aguas de las fuentes de abastecimiento no convencionales para que se consideren tecnología probada y puedan incorporarse como parte fundamental del abastecimiento de agua a las ciudades.

Cultura del agua. El ahorro del agua para reducir la demanda representa una fuente importante de abastecimiento de agua. En este caso, se hace necesaria la participación ciudadana a través del ahorro y la recirculación de agua, lo que conlleva hacia una nueva cultura del agua. En ella, los ciudadanos se acostumbran a reutilizar el agua del aseo personal (baño y lavadora) para los muebles sanitarios y riego del jardín, con un mínimo tratamiento (filtros de carbón activado) para disminuir el efecto agresivo del jabón. Por

otra parte, es indispensable un nuevo diseño del sistema de tuberías de agua en el hogar, no solo de agua fría y caliente, sino también para el agua residual tratada en casa. De esta forma, se fomentará el ahorro y recirculación del agua en esta nueva cultura del agua (aguacultura).

Huella hídrica. Técnicamente, se puede importar o exportar agua de una ciudad a otra sin el empleo de presas, acueductos o cualquier otra obra hidráulica, mediante el intercambio comercial de productos que han requerido agua para su creación (huella hídrica), *i.e.*, cada producto tiene un contenido de agua virtual. De esta manera, ciudades con gran desarrollo económico, pero con recursos hídricos insuficientes para satisfacer la demanda, utilizan su riqueza económica para obtener productos con alto contenido de agua virtual. El reto consiste en evaluar el intercambio comercial entre ciudades para determinar los volúmenes de agua virtual importados y exportados. Este análisis determinará las políticas que se pueden generar en el comercio y la elaboración de productos para contar con mayores reservas de agua para el abastecimiento a las ciudades.

Aprovechamiento de los escurrimientos de aguas pluviales. En la medida que hay crecimiento demográfico y económico de las ciudades, se incrementa el consumo de agua y, en consecuencia, la generación de un mayor volumen de aguas residuales provenientes de los usos domésticos, industriales, agrícolas y de la lluvia que precipita sobre la ciudad y su cuenca circundante. La mayoría de las grandes ciudades desalojan las aguas pluviales a través de la red de agua residual doméstica (drenaje combinado). Lo que conlleva el riesgo que, en tormentas severas, el agua

puede emerger a la superficie a través de las coladeras y provocar inundaciones de aguas mixtas, muy perjudiciales para la salud humana (contaminantes patógenos, como coliformes fecales, quistes y huevos de parásitos de helminto). El desafío consiste en, además de generar mapas de riesgo de inundaciones urbanas, evitar la incorporación del agua pluvial al drenaje combinado para disminuir el riesgo de inundación. Los conocimientos y análisis en continuar sobre el aumento de recarga natural de acuíferos a través de pozos de absorción, se hacen prioritarios. Paralelamente, la calidad del agua de los escurrimientos de aguas pluviales, resulta imperativo analizarla para evitar contaminación del agua subterránea, a pesar de que los pozos de absorción, a diferencias de los pozos de inyección, el agua de recarga no se pone inmediatamente en contacto directo con agua del acuífero, sino hasta un año después que el agua de recarga haya transitado por la zona no saturada del subsuelo en donde el proceso de filtración natural está activo.

Tratamiento de Agua Residual. Las Plantas de Tratamiento de Agua Residual (PTAR), en México, generalmente operan solo a un 50% de su capacidad instalada. El tratamiento consiste en eliminar sustancias nocivas por medio de procesos físico-químicos y biológicos, que le devuelven parcial o totalmente la calidad que tenía antes de ser usada. En todas las PTAR se realiza un tratamiento primario, donde se elimina un gran porcentaje de sólidos en suspensión y materia inorgánica, seguido de la reducción del contenido en materia orgánica, acelerando los procesos biológicos naturales con oxigenación por aireación y, terminando, con desinfección aplicando cloro. En algunas de estas plantas

se efectúa un tratamiento secundario, utilizando el proceso de lodos activados; cuando hay tratamiento terciario, este consiste en coagulación, sedimentación, filtración con arena. El grado de tratamiento del agua residual, *i.e.*, la descontaminación del agua, depende del reúso planeado del agua residual tratada. El principal reto aquí es hacer operar al 100% las PTAR, en donde se confronta la falta de personal técnico, pero, sobre todo, la falta de recursos económicos para la operación. Por lo que se hace necesario realizar estudios económicos para darle mercado al agua residual tratada. De este modo, las PTAR serían autónomas económicamente.

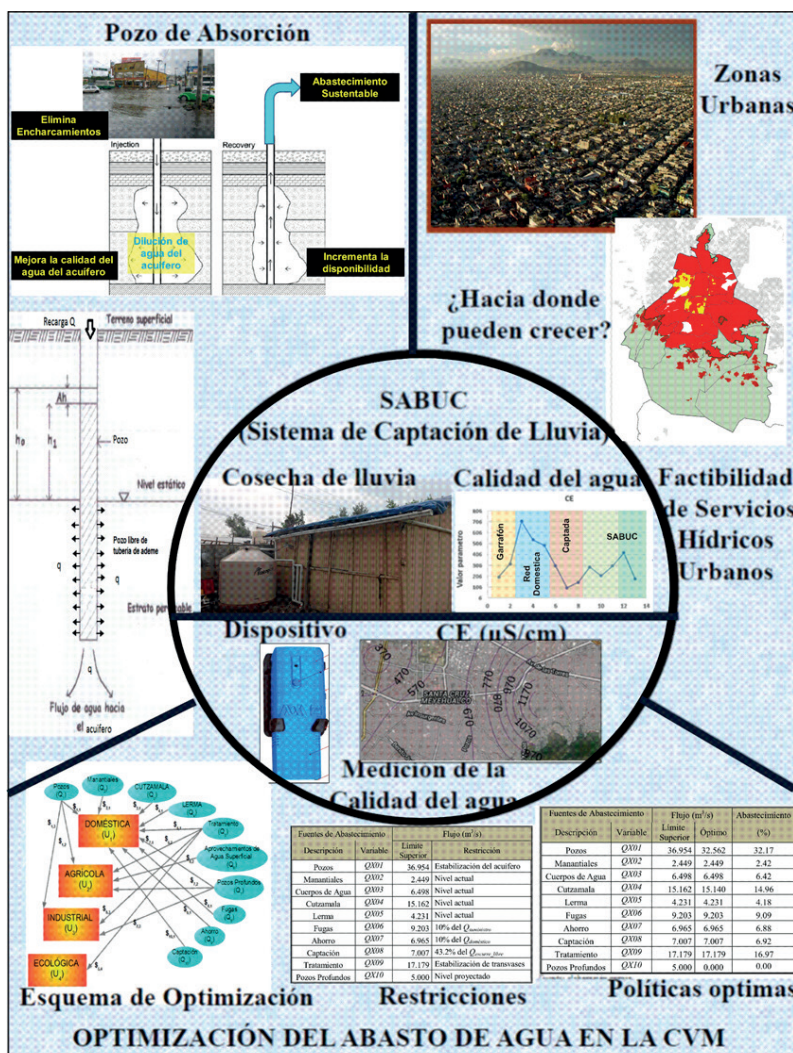
Optimización del abastecimiento de agua en las ciudades. Los problemas de abastecimiento incluyen un complejo sistema de fuentes y conducción que enfrenta fuertes limitaciones. El envejecimiento de la infraestructura, los costos de operación, la falta de inversión en mantenimiento y rehabilitación, así como el deterioro de las fuentes de agua en cantidad y calidad, es en parte lo que ha llevado al sistema de abastecimiento al límite de la operatividad física y económica. Aunado al incremento de la población, la movilidad laboral presente en las zonas metropolitanas, y la migración de las personas del ámbito rural hacia las ciudades, ha generado en gran medida la expansión urbana. El aumento en la demanda de agua impacta de manera negativa y creciente en el balance de las cuencas y los acuíferos locales y vecinos que sirven de fuentes de abastecimiento de agua potable a las ciudades, generando daños económicos y ambientales que ya se muestran dramáticos (Escolero *et al.*, 2016). El desafío consiste en diseñar políticas óptimas del abastecimiento del agua en las ciudades, tomando en cuen-

ta los volúmenes y costos de las fuentes convencionales y no convencionales de abastecimiento y su interrelación con los principales usos del agua, considerando la sustentabilidad del recurso hídrico (por ejemplo, equilibrio de recarga el acuífero vs. extracción de agua subterránea).

5. ¿Cómo ha contribuido la Ingeniería Hidrológica de la UAMI?

La Universidad Autónoma Metropolitana (UAM), cuenta con expertos que no solo se preocupan, sino que se ocupan del

tema del agua en sus diferentes ámbitos. En particular, el Departamento de Ingeniería de Procesos de la UAM-Iztapalapa (UAMI), incorpora al GIH que ha aportado conocimiento, a través de proyectos de investigación internos y externos de la institución, del manejo del agua, sobre todo de la Cuenca del Valle de México (CVM). Una descripción breve de los proyectos emblemáticos (Fig. 4) en los que ha participado total y parcialmente el GIH en aportar conocimiento al manejo del agua, se especifica a continuación.



Fuente: elaboración propia.

Figura 4. Representación esquemática de los proyectos emblemáticos.

Evaluación de la Funcionalidad, Eficacia y Efectividad de la tecnología SABUC (*Solar Air Bubbles, IBC Container, Ultraviolet light and Carbon Filter*) para la cosecha de agua de lluvia y su potencial aprovechamiento en viviendas periurbanas de bajos ingresos. Esta investigación aporta mejoras en gestión de agua sustentable, mediante la implementación de sistemas de cosecha de lluvia, como los instalados en la CDMX para solucionar la falta de agua en algunas zonas de mayor necesidad, con dispositivos que mejoran la calidad del agua captada y dan certeza de su uso habitacional.

Monitoreo del funcionamiento de un pozo de infiltración para incrementar la recarga natural del acuífero en zonas metropolitanas. Los resultados de esta investigación marcan la pauta para perfeccionar la tecnología de recarga artificial de buena calidad en las zonas urbanas; el consenso técnico anterior sobre recarga artificial del acuífero era que solo se podía realizarlo en las laderas de las montañas. Hacer de la recarga artificial del acuífero en la zona urbana de la CDMX una tecnología probada, impacta no solo en la atenuación de los efectos de sobreexplotación, tales como la subsidencia y fracturamiento del terreno, entre otros, sino que también para establecer estrategias más racionales del manejo de los sistemas hídricos subterráneos como para dar tratamiento natural al agua en el subsuelo, y para manejar los acuíferos como vasos de almacenamiento y regulación. Adicionalmente, se aprovecha el agua pluvial y se disminuye la carga al sistema de drenaje.

Factibilidad de Servicios de Agua Potable y Drenaje para el Desarrollo Urbano. Se desarrolló un SIG para la planeación urbana

de la CDMX, que maneja eficientemente la información alfanumérica y geográfica y que permite mantener la vigencia de las áreas de factibilidad hidráulica a través de la actualización de información y adecuaciones a los criterios aplicados. El SIG incorpora una gran cantidad de información urbana, hidráulica y del medio ambiente, para procesarla y determinar la sectorización del territorio con base en la capacidad de la infraestructura hidráulica para el desarrollo urbano, al mismo tiempo asegurará que no se rebasen estas capacidades ni que generen afectaciones en otras áreas del territorio de la CDMX. El aporte de este proyecto de investigación es que ahora la SEDUVI (Secretaría del Desarrollo Urbano y Vivienda) de la CDMX, cuenta con un instrumento de planeación que identifica áreas con factibilidad de los servicios de agua potable y drenaje para el desarrollo de proyectos urbanos en la CDMX, a través de la aplicación de criterios de sustentabilidad hídrica y el aprovechamiento de la infraestructura hidráulica

Sensor Doméstico de Potabilidad del Agua. Se inventó un dispositivo para medir la calidad de agua que se consume en los hogares. Consiste de un sistema central de procesamiento (microcontrolador) que, a partir de una muestra de agua, mide la conductividad eléctrica, la temperatura, la turbidez, el pH y la presencia de coliformes (*Escherichia coli*). Con estos parámetros, el microcontrolador calcula un índice de calidad para avisar al usuario, de manera presencial, si el agua que se está midiendo se puede beber, o de manera remota a todos los usuarios que cuentan con la aplicación *Google Maps*. El impacto esperado con este invento, una vez que esté en el mercado al alcance de todos los ciudadanos, es que se fomentará la nueva aguacultura, creando

un sistema de monitoreo de la calidad del agua en cada ciudad, equivalente al existente de la calidad del aire.

Optimización de operación del sistema hidrológico de la CVM. Se aplicó una herramienta numérica para el diseño de políticas óptimas del abastecimiento del agua en la CVM. Conformada por los volúmenes y costos de las fuentes (pozos, manantiales, trasvases Lerma-Cutzamala, aprovechamientos superficiales, tratamiento, pozos profundos, fugas, ahorro y captación) en conexión con los usos del agua: doméstico, agrícola, industrial y ecológico, considerando la sustentabilidad del recurso hídrico (equilibrio de recarga vs. extracción). Los resultados de esta investigación revelan la capacidad de las fuentes de abastecimiento y la infraestructura hidráulica de la CVM para la gestión y manejo sustentable del agua en la zona metropolitana de la CDMX.

6. ¿Hacia dónde vamos?

El GIH sigue desarrollando investigación que aporta conocimiento al manejo del agua. Se adopta como guía los temas propuestos en el Programa Hidrológico Intergubernamental, antes Programa Hidrológico Internacional, en su Fase IX, sin perder de vista las necesidades nacionales. La gestión del agua y la ingeniería del agua se han centrado en el suministro para la agricultura, industria, navegación y uso doméstico. El uso intensivo del agua, la modificación de las cuencas y el cambio climático han amplificado el carácter estocástico de los procesos hidrológicos, lo que tendrá un impacto negativo en la relación de recursos hídricos per cápita. El reto más importante para la gestión del agua es cómo aumentar la cantidad y calidad de los recursos hídricos y, en paralelo, aumentar la biodiversidad, los

servicios ecosistémicos para la sociedad y la resiliencia a los impactos. Los temas en cuestión se indican a continuación:

- Análisis de los procesos hidrológicos en condiciones de cambio climático no estacionario, para identificar medidas de adaptación y mitigación apropiadas y oportunas en un entorno en constante cambio ambiental.
- Análisis de los procesos hidro-sociales para ampliar el conocimiento de la interacción de los sistemas socio-hídricos en la gestión de los recursos hídricos de las cuencas.
- Enfoques de gobernanza y gestión sostenibles e integrada del agua en cuencas. Involucrando la participación de todos los actores: usuarios del agua, comunidades, instituciones y sector privado; además de considerar aspectos sociales, ambientales, culturales, legales, institucionales, políticos, financieros, equidad, justicia, simpleza de aplicación y, sobre todo, capacidad de evaluación y seguimiento.
- Sensibilización de la nueva aguacultura. Mejorar la capacidad y la sensibilización del público en relación con una cultura y gestión sostenibles del agua, para hacer frente a la escasez de agua.
- Estudios hidrológicos de los cuerpos de aguas superficiales y subterráneos. Se deben seguir estudiando a nivel local y regional los ríos, lagos, humedales y acuíferos, ya que no solo proporcionan agua potable y mantienen ecosistemas valiosos, también sustentan la agricultura, la energía eléctrica, la mitigación de inundaciones y la prevención de sequías

- Modelación numérica del ciclo hidrológico incluyendo la intervención del hombre. Esto con la finalidad de adquirir una comprensión y un mapeo más completos de la disponibilidad de recursos hídricos y la identificación de las amenazas relacionadas con el agua. La idea es aprovechar el aumento de la potencia computacional, nuevas técnicas de monitoreo espaciales y temporales (telemetría), mejores algoritmos numéricos, nuevas oportunidades para compartir información, fuentes de datos no tradicionales y una mayor cooperación internacional y transdisciplinaria.
- La educación en recursos hídricos sigue siendo la base sobre la que se pueden cambiar los comportamientos y se puede construir un consenso para tomar decisiones sostenibles sobre la gobernanza, gestión y manejo del agua.
- Trascendencias de las redes temáticas del agua. Si bien se han creado redes temáticas del agua, aún no han logrado tener un impacto significativo en las políticas y prácticas educativas del agua.

7. ¿En qué estamos?

El GIH sigue desarrollando investigación sobre la gestión y manejo del agua en grandes ciudades, a saber, atendiendo las temáticas del Programa Hidrológico Inter gubernamental, anteriormente descritas.

- Preparando el estudio de la gobernanza y gestión del agua en la CVM, mediante la aplicación del enfoque del Prisma de la Gobernanza de Cuencas. Se requiere evaluar la gobernanza bajo las políticas hídricas actuales, estipuladas en la LAN, para compararla con las políticas de la

reforma hídrica por implementarse bajo la Ley General del Agua. Se inicia este estudio con la evaluación de índices (sociales, ambientales y económicos) de gestión en los recursos hídricos de la CVM. El uso de índices numéricos en el manejo de los recursos hídricos es indispensable y necesario para convertir grandes volúmenes de datos en información útil, dentro de una escala de medición.

- Realizando la modelación numérica del ciclo hidrológico. En su primera etapa, se busca representar los procesos físicos que suceden en una cuenca, como generación de escurrimiento, precipitación pluvial, evapotranspiración y recarga a los sistemas acuíferos. Algunos modelos numéricos en evaluación son: WEAP21 (<https://www.weap21.org/>) que es un sistema de planificación y evaluación de los recursos hídricos, con amplia gama de conceptos sobre gestión del agua, integración de oferta y demanda, costos financieros, calidad de agua y consideraciones ecológicas, como el requerimiento de caudales ambientales, además de incluir un algoritmo para calcular lluvia-escurrimiento en cuencas; MODFLOW (<https://www.usgs.gov/software/modflow-6-usgs-modular-hydrologic-model>) que simula el flujo de agua subterránea para diferentes condiciones en que se encuentren las capas del acuífero (libre, parcialmente convertible y/o confinado); FREEWAT (<http://www.freewat.eu/>) que es una plataforma dedicada para QGIS (software de SIG) para la planificación y gestión de los recursos de agua superficial y subterránea; PHABSIM (<https://www.usgs.gov/node/279289>) que es un sistema de Simulación de Hábitat Físico, que simula la relación

entre el caudal y el hábitat físico para varios estadios de vida de especies de peces; el modelo Weather Research and Forecasting Model-Hydro (WRF-Hydro) (https://ral.ucar.edu/projects/wrf_hydro), permite analizar los procesos de flujos de agua y energía entre la superficie terrestre y la atmósfera.

- Evaluando el manejo de las aguas subterráneas (transvases entre acuíferos) para contar con mayor disponibilidad, durante el estiaje, en áreas de mayor demanda de la zona metropolitana de la CDMX, mediante la implementación de sistemas de recarga-recuperación.
- Realizando análisis de optimización mensual del abastecimiento de agua sustentable en la CVM, aplicando Programación Dinámica.
- Manufacturando industrialmente el dispositivo de medición de calidad del agua para uso público, con la finalidad de promover una cultura de medición y vigilancia de la calidad de agua que se consume en los hogares.
- Continuar la formación de especialistas en agua, tanto a nivel licenciatura, a través del programa académico de Ingeniería Hidrológica, como a nivel posgrado, ya sea la Especialización en Economía y Gestión del Agua (EEGA) o bien el Posgrado en Energía y Medio Ambiente (PEMA).

Referencias

Armas Vargas, F., Nava, L.F., Escolero, O., Gómez Reyes, E., Sandoval Solis, S. *Watershed Sustainability: An Integrated River Basin Perspective*. In: The Palgrave Encyclopedia of Urban and Regional Futures. Palgrave Macmillan, Cham.

Armas Vargas, F., Escolero, O., Sandoval Solis, S., Nava, L.F., Mazari Hiriart, M., Rojas Serna, C., López-Corona, O., A Quantitative Approach to the Watershed Governance Prism: The Duero River Basin, Mexico. *Water*, 15[4], 743, pp 1-26, 2023.

De Miguel A., Lado, J.J., Martínez, V., Leal, M., y García, R., El Ciclo Hidrológico: Experiencias Prácticas para su Comprensión. *Ense. Cien. Tie.*, [17.1], pp. 78-85, 2009.

Escolero O., Kralisch, S., Martínez, S.E., y Perevochtchikova, M., Diagnóstico y análisis de los factores que influyen en la vulnerabilidad de las fuentes de abastecimiento de agua potable a la Ciudad de México, México. *Bol. Soc. Geol. Mex.*, 68[3], pp. 409-427, 2016.

Estadísticas del Agua en México, Edición 2018. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, CONAGUA, México, 2018.

FAO. *El riego en América del Sur, Centroamérica y Caribe en cifras [Irrigation in South America, Central America and the Caribbean in numbers]*. Encuesta AQUASTAT 2015. Rome, FAO. (In Spanish), 2016.

Sosa-Rodríguez, F.S., Castro-Ruiz, J.L., y Sotelo-Núñez, E.I., *La implementación del modelo de Gestión Integrada de los Recursos Hídricos en las subregiones de estudio y sus retos en materia institucional y legal*. En: Aguilar-Benítez I. (Coordinador), *La Gestión de los Usos del Agua en Tres Subregiones Hidrológicas: Río San Juan, Valle de México y Bajo Grijalva*. Tijuana, El Colegio de la Frontera Norte, pp. 284-321, 2020.