



U N I V E R S I D A D
Panamericana

CAMPUS GUADALAJARA

Facultad de Ciencias Económicas y Empresariales

**GESTIÓN DEL AGUA: UNA VISIÓN URBANA Y RURAL
PARA EL CRECIMIENTO ECONÓMICO DE MÉXICO**

TESIS

Que para obtener el grado de:

DOCTOR EN CIENCIAS EMPRESARIALES

Presenta:

RODRIGO NAVARRO GUERRERO

Director:

**DR. HUGO BRISEÑO RAMÍREZ
DR. EDGAR DEMETRIO TOVAR GARCÍA**

Con Reconocimiento de Validez Oficial de Estudios de la SEP
según acuerdo 20200055, con fecha del 01-VII-2019, en modalidad escolarizada

Zapopan, Jal., México, _____2025

Agradecimientos

El agua es vida.

Uno de los grandes desafíos del doctorado fue encontrar el tema de investigación, mismo que logré a través del vital líquido y de la Dra. Susana Ochoa de Rojas (gracias por la sugerencia y el apoyo); el estudio del agua, no como lo vemos los ingenieros civiles (llevar y traer, venciendo la gravedad), sino mediante una visión holística, abarcando diferentes dimensiones de su problemática, como son los aspectos: social, económico, financiero, técnico, legal e, inclusive, espiritual. También, el Dr. Omar Rojas Altamirano, quien me motivó a estudiar en empresariales (gracias por la perspectiva), y no olvido al Dr. Manuel Montenegro Fragoso, Dr. Samuel Nucamendi Guillén y Dr. Alberto Rosa Sierra, de la Facultad de Ingeniería, quienes estuvieron en el proceso. Gracias a ambos.

En lo que respecta al estudio de los Organismos Operadores de Agua, Alcantarillado y Saneamiento (OOAPAS), me ha permitido unificar mis grandes pasiones profesionales y académicas; en los OOAPAS he logrado ver a la empresa y sus circunstancias, y el desarrollo de infraestructura en todas sus dimensiones. Me motiva que cualquier ciudadano pueda tener agua en cantidad y calidad en su casa, convirtiéndolo en un igualador social y la base de un México cada vez más justo y próspero. En este sentido, agradezco a la Fundación Gonzalo Río Arronte y al Lic. Francisco Mayorga Castañeda por involucrarnos en el proyecto de las Comunidades de Práctica del Sistema de Información de la Calidad del Agua Abastecimiento en México, así como a mis compañeros, la Dra. Ligia García Béjar y el Dr. Julián Ochoa García, con quien logré este proyecto.

Al Dr. Hugo Briseño Ramírez y al Dr. Edgar Demetrio Tovar García, ambos han sido los cimientos para mis estudios. Agradezco al Dr. Guillermo Sosa Gómez (sin sus consejos no habría sobrevivido) y a la Mtra. Carolina Chavarría Bravo (por su disposición y la forma para ver “cómo sí”). A todos mis profesores y compañeros del doctorado, muchas gracias por la paciencia y dedicación para con un servidor. Este estudio aporta un granito de arena en el estratégico sector hídrico. Junto con la visión del Dr. Abraham Mendoza Andrade y la Dra. Daniela Salgado Gutiérrez, podremos construir en la Universidad Panamericana un observatorio del agua, de grandes miras para el beneficio de nuestra ciudad, estado y país.

A mi familia, Lina, Patricio y Paloma, se los he dicho de muchas maneras, todos los días, son mi razón de ser, mi inspiración y sin su amor no habría terminado mis estudios doctorales. A mis padres, que formaron parte de lo que soy.

Y agradezco a Dios. Reconozco la inspiración ética y espiritual que encontré en la encíclica *Laudato si'*, del papa Francisco, “Sobre el cuidado de la Casa Común” (2015). No solo reavivó mi compromiso personal con la justicia ambiental, también iluminó el trasfondo moral de los desafíos asociados a la gestión del agua. Su llamado a una ecología integral, que reconcilie el cuidado del medio ambiente con la dignidad humana y la equidad social, ha sido un referente constante durante el desarrollo de esta investigación. El reconocimiento del acceso al agua potable como un derecho humano esencial reafirma la urgencia de construir sistemas de gestión del agua más justos, sostenibles e inclusivos...

Gracias totales.

Declaración de autoría

El que suscribe declara que el material de este documento, que ahora presento, es fruto de mi propio trabajo. No se ha utilizado el trabajo de ninguna otra persona sin el debido reconocimiento en el texto principal de la tesis. Hago esta declaración en conocimiento de que un incumplimiento de las normas relativas a la presentación de trabajos puede llevar a graves consecuencias. Soy consciente de que el documento no será aceptado a menos que esta declaración haya sido entregada junto al mismo.

Excepto cuando se hace referencia en el texto de la tesis, esta no contiene material publicado en otro lugar o extraído en su totalidad o en parte de una tesis presentada para la obtención de cualquier otro título o diploma. Esta tesis no se ha presentado para la obtención de ningún título o diploma en ninguna otra institución terciaria.

Fecha:

Firma:

Rodrigo Navarro Guerrero

Resumen

La gestión del agua enfrenta un nuevo paradigma global, impulsado por el cambio climático, el crecimiento urbano, la competencia entre usos (doméstico, industrial, agropecuario y energético), el uso ineficiente, la contaminación y la infraestructura obsoleta. Como recurso limitado, el agua ha adquirido relevancia estratégica, exigiendo enfoques integrales que trascienden lo técnico para incorporar dimensiones sociales, económicas y políticas.

Esta tesis analiza el papel del agua como recurso económico escaso y valioso, combinando perspectivas micro y macroeconómicas. A nivel micro, se estudia la autosuficiencia financiera de organismos operadores y la diversificación productiva en distritos de riego como indicadores de eficiencia y sostenibilidad. A nivel macro, se examina cómo la disponibilidad y calidad del agua inciden en el crecimiento económico subnacional.

El análisis empírico se basa en tres estudios: 1) una base de datos en panel de 31 organismos urbanos (2017–2019) revela que la autosuficiencia financiera se asocia positivamente con tarifas domésticas y eficiencias operativas, y negativamente con la ubicación en el sureste del país; 2) un modelo dinámico para las 32 entidades federativas (2005-2020) muestra que la disponibilidad de agua guarda relación positiva con el PIB per cápita, aunque no se observa una correlación significativa con las tasas de crecimiento, y 3) en 86 distritos de riego, se demuestra que la diversificación de cultivos mejora el rendimiento hídrico, con efectos estadísticamente significativos.

Los hallazgos confirman que el problema del agua en México debe abordarse como un desafío económico integral, con implicaciones para la gestión pública, la economía aplicada y el diseño de políticas hídricas.

Abstract

Water management faces a new global paradigm, driven by climate change, urban growth, competition among uses (domestic, industrial, agricultural, and energy), inefficient use, pollution, and obsolete infrastructure. As a limited resource, water has acquired strategic relevance, demanding comprehensive approaches that go beyond technical aspects to incorporate social, economic, and political dimensions.

This thesis analyzes the role of water as a scarce and valuable economic resource, combining micro and macroeconomic perspectives. At the micro level, it studies the financial self-sufficiency of operating agencies and productive diversification in irrigation districts as indicators of efficiency and sustainability. At the macro level, it examines how water availability and quality affect subnational economic growth.

The empirical analysis is based on three studies: 1) a panel database of 31 urban agencies (2017–2019) reveals that financial self-sufficiency is positively associated with domestic tariffs and operational efficiencies, and negatively with location in the southeast of the country; 2) a dynamic model for the 32 federal entities (2005-2020) shows that water availability is positively related to per capita GDP, though not to growth rates; and 3) in 86 irrigation districts, it is demonstrated that crop diversification improves water yield, with statistically significant effects.

The findings confirm that the water problem in Mexico must be addressed as a comprehensive economic challenge, with implications for public management, applied economics, and water policy design.

Índice

Capítulo 1. Introducción.....	11
1.1. Antecedentes.....	11
1.1.1. <i>El agua en México</i>	12
1.1.2. <i>Organismos operadores de agua</i>	13
1.1.3. <i>Crecimiento económico y el agua</i>	14
1.1.4. <i>Distritos de riego</i>	15
1.2. Justificación.....	16
1.3. Propósito de la tesis.....	18
1.4. Partes de la tesis.....	19
Capítulo 2. Determinantes de la autosuficiencia financiera de los organismos operadores de agua mexicanos.....	22
2.1. Introducción.....	22
2.2. Estudios previos sobre el desempeño de los organismos operadores de agua.....	23
2.3. Construcción de la base de datos y metodología.....	29
2.4. Modelos y resultados.....	33
2.5. Conclusiones.....	39
Capítulo 3. El impacto de la disponibilidad y la contaminación del agua en el crecimiento económico a nivel subnacional: evidencia de México.....	42
3.1. Introducción.....	42
3.2. Revisión de la literatura.....	45
3.2.1. <i>El agua en México</i>	45
3.2.2. <i>Crecimiento económico, disponibilidad y contaminación del agua a nivel subnacional</i>	47
3.3. Datos y metodología.....	51
3.4. Especificación empírica y método.....	61
3.5. Resultados.....	64
3.6. Discusión.....	69
3.7. Observaciones finales.....	74

Capítulo 4. Análisis de la relación entre la diversificación de cultivos y el rendimiento hídrico en los distritos de riego mexicanos.....	76
4.1. Introducción.....	76
4.2. Panorama de los distritos de riego en México.....	77
4.3. Revisión de literatura.....	80
4.4. Metodología.....	84
4.4.1. <i>Recolección datos y variables</i>	84
4.4.2. <i>Matriz de correlación y análisis estadístico</i>	85
4.4.3. <i>Especificación empírica de un modelo para valorar el rendimiento hídrico</i>	86
4.5. Resultados.....	86
4.5.1. <i>Análisis descriptivo de las variables</i>	86
4.5.2. <i>Modelo econométrico</i>	90
4.6. Discusión.....	92
4.7. Conclusiones.....	93
Capítulo 5. Conclusiones.....	95
5.1. Limitaciones de la tesis y propuestas para investigaciones futuras.....	99
Referencias.....	101

Índice de tablas, figuras y gráficas

Tablas

Tabla 1. Sintaxis de búsqueda sobre desempeño de los organismos operadores de agua (OOAs)	24
Tabla 2. Variables, fuente y estadística descriptiva.....	31
Tabla 3. Matriz de correlación.....	32
Tabla 4. Modelos de regresión de panel para explicar la autosuficiencia financiera (AFIN).....	34
Tabla 5. Matriz de correlación de las variables utilizadas en el modelo.....	36
Tabla 6. Interpretación de los resultados (variables explicativas de AFIN)	38
Tabla 7. Definición de variables.....	52
Tabla 8. Estadísticas descriptivas.....	56
Tabla 9. Resultados de la regresión (tasa de crecimiento del PIB per cápita)	65
Tabla 10. Resultados de la regresión (PIB per cápita)	67
Tabla 11. Antecedentes de los DR en México.....	78
Tabla 12. DR por RHA, año agrícola 2017-2018.....	79
Tabla 13. Variables y estadística descriptiva.....	88
Tabla 14. Matriz de correlación (n = 404, tamaño uniforme)	89
Tabla 15. Modelos de panel para explicar el rendimiento hídrico (RH).....	90
Tabla 16. Matriz de correlación de las variables utilizadas en el modelo (n = 404, tamaño uniforme)	91
Tabla 17. Interpretación de los resultados (variables explicativas de l_RH)	92

Figuras

Figura 1. Relación entre las extracciones de agua y los recursos hídricos renovables (ρ) de 32 estados mexicanos en 2020.....	57
Figura 2. Demanda biológica de oxígeno (DBO_Bueno) de 32 estados de la República mexicana en 2020.....	57
Figura 3. Tasas de crecimiento del PIB per cápita de 32 estados mexicanos en 2020....	58
Figura 4. PIB per cápita de 32 estados mexicanos en 2020.....	58

Gráficas

Gráfica 1. Rho (ρ), DBO_Bueno y DBO_Malo . Promedio, 32 estados de la República de 2005 a 2020.....	55
Gráfica 2. Dispersión de la tasa de crecimiento del PIB per cápita y ρ de 32 estados mexicanos de 2005 a 2020.....	59
Gráfica 3. Dispersión de la tasa de crecimiento del PIB per cápita y de la DBO_Bueno de 32 estados mexicanos de 2005 a 2020.....	59
Gráfica 4. Dispersión del PIB per cápita y ρ de 32 estados mexicanos de 2005 a 2020.....	60
Gráfica 5. Dispersión del PIB per cápita y DBO_Bueno de 32 estados mexicanos de 2005 a 2020.....	60

Capítulo 1. Introducción

1.1. Antecedentes

La escasez de agua es una situación compleja y multifacética que tiene causas interrelacionadas, como el crecimiento poblacional, el cambio climático, el uso ineficiente del recurso, la contaminación de las fuentes, la extracción excesiva, la gestión inadecuada, la infraestructura obsoleta y la falta de conciencia y educación (Barbier, 2004; Damania, 2020; Duarte et al., 2014; Lee et al., 2023; Novotny et al., 2010; Zhang y Shen, 2022). Por ello, el recurso hídrico se ha vuelto un asunto prioritario en la agenda global debido a su importancia esencial para la vida, su rol estratégico en el desarrollo económico y los crecientes desafíos asociados a su gestión (ONU, 2021).

Esta situación ha obligado a los gobiernos a acelerar el ritmo actual de progreso mediante enfoques integrados y holísticos en la gestión del agua (ONU, 2021). Muchos países han implementado estrategias respaldadas por normativas, políticas y regulaciones con el objetivo de fortalecer la gobernanza del agua. Un ejemplo es la Directiva Marco del Agua, que obliga a los Estados miembros de la Unión Europea a proteger y restaurar sus recursos hídricos para asegurar su disponibilidad (Comisión Europea, 2017). De forma similar, existen marcos regulatorios nacionales como la Ley del Agua de Canadá (Environment and Climate Change Canada, 2022) y la Iniciativa Nacional del Agua en Australia (Productivity Commission, 2021).

La Organización de las Naciones Unidas (ONU) ha asumido el compromiso de “garantizar la disponibilidad y la gestión sostenible del agua y el saneamiento para todos” como parte del Objetivo de Desarrollo Sostenible número 6 (ONU, 2015). Este objetivo —parte de la Agenda 2030— contempla metas como el acceso universal al agua potable, el saneamiento e higiene

adecuados, la calidad del agua, el uso eficiente, la gestión integrada, la protección de los ecosistemas y la participación ciudadana. Cada año se publica el *Informe Mundial sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos de las Naciones Unidas*, el cual busca ofrecer una evaluación integral y fundamentada sobre el estado, uso y gestión del agua dulce a nivel global (Rosegrant et al., 2002).

1.1.1. El agua en México

La escasez de agua en México representa un problema crítico que exige soluciones integrales de gestión desde una perspectiva económica. De acuerdo con la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE), durante la Reunión de la Red Parlamentaria 2015 (CEIGB, 2015), se reconoció que en todo el territorio mexicano existe una fuerte presión sobre los recursos hídricos, y que en algunas regiones la escasez puede estar ralentizando la actividad económica.

Esto se confirma en el estudio “Sequía en México y su Potencial Impacto en la Actividad Económica” elaborado por el Banco de México (2022), el cual señala que en la última década se ha observado una intensificación en la duración, severidad y extensión geográfica de las sequías en el país. Además, la escasez hídrica en un año genera efectos acumulativos en los siguientes, afectando la disponibilidad futura. Si bien la sequía de 2022 fue menos grave que la de 2021, los niveles de almacenamiento en presas no han retornado a los valores observados a principios de 2020. El cambio climático agrava este fenómeno, elevando los costos económicos. Las pérdidas en el sector agrícola, el alza en los precios de alimentos y la necesidad de importar productos agropecuarios son solo algunos de sus impactos (Banco de México, 2022; Stern, 2008).

1.1.2. Organismos operadores de agua

Los organismos operadores de agua cumplen un papel fundamental en la gestión del recurso hídrico, tanto en México, como en otras regiones del mundo. Estos organismos realizan grandes esfuerzos económicos, técnicos y humanos para garantizar la continuidad del servicio, como la entrega de agua potable y el tratamiento de aguas residuales. A su vez, enfrentan el desafío de atender a una población creciente, lo que incrementa la demanda de infraestructura hidráulica. La gestión del agua urbana se ha convertido en uno de los grandes retos globales).

Los organismos operadores de agua aplican estrategias para asegurar la calidad del servicio, y en años recientes, el desempeño ambiental y económico de dichas estrategias ha cobrado mayor relevancia debido al cambio climático, las emisiones ambientales y los Objetivos de Desarrollo Sostenible (Mian et al., 2023). Según Molinos-Senante et al. (2021), los organismos juegan un rol clave en la gobernanza del agua, al ser el vínculo entre las políticas públicas y las necesidades sociales. En México, la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) revisa la operación de los organismos que en su mayoría son de carácter municipal —derivado del proceso de descentralización—, aunque también existen los de índole estatal (Briseño y Sánchez, 2018).

La insuficiencia financiera en los organismos limita la calidad del servicio que ofrecen, ya que impide invertir en infraestructura y tecnología necesarias para su adecuado funcionamiento, como lo menciona Salazar-Adams (2021). Por su parte, Martínez y Vargas, 2017 agregan que existen también otros problemas como la presión sobre las fuentes de abastecimiento, el cambio climático y la urbanización desmedida, así como la falta de transparencia y eficiencia administrativa. Briseño y Sánchez (2018) señalan que la descentralización en México requería políticas adicionales para eliminar barreras estructurales, esto ha generado desigualdades entre zonas urbanas y rurales. Además, los organismos operadores de agua enfrentan un contexto

complejo que exige fortalecer sus instituciones e incorporar tecnología innovadora (Martínez y Vargas, 2017).

1.1.3. Crecimiento económico y el agua

El agua es fundamental para el crecimiento económico, pero su escasez puede inducir en la disminución de la producción agrícola, el patrimonio de los individuos (Barbier, 2004). Algunas investigaciones han analizado cómo la disponibilidad y calidad del recurso hídrico afectan al crecimiento económico (Barbier, 2015; Brown et al., 2013; El Khanji y Hudson, 2016; Parliamentary Network, 2015; Sadoff et al., 2015), además, se ha dicho que los lazos entre el agua y las variables macroeconómicas son endebles (Damania, 2020) y que su relación en el largo plazo no es significativa.

Por una parte, la escuela neoclásica sostiene que el crecimiento económico depende de los factores de producción y el progreso tecnológico. Por otra parte, con frecuencia se asume que la tierra —y por extensión algunos recursos naturales como el agua— es constante, por lo que se excluye del análisis tradicional de contabilidad del crecimiento (Barbier, 1999; Barro, 1991; Romer, 1994; Solow, 1956). No obstante, en la actualidad, los recursos naturales y las preocupaciones ambientales han cobrado mayor relevancia y requieren una atención más profunda.

Barbier (1999), teorizó sobre la necesidad de cuantificar la contribución de los recursos naturales al crecimiento económico y el rol de la tecnología para mitigar su escasez, dentro de un modelo de crecimiento endógeno. Posteriormente, Barbier (2004), analizó el nexo entre agua y crecimiento económico, en un trabajo fundamental, encontrando que el uso del agua —al ser un bien público, no excluible y sujeto a congestión— en un inicio genera un impulso al crecimiento, pero al alcanzar ciertos niveles, la escasez de agua impone mayores costos de extracción y uso

ineficiente, resultando en un impacto negativo. Esta relación se representa con una curva en forma de u invertida.

El mismo autor también subraya la necesidad de realizar estudios que analicen las diferencias regionales dentro de un país en torno a la relación agua-crecimiento. Hasta donde se sabe, no existen investigaciones que prueben dicha relación con el agua como insumo a nivel subnacional, lo que resalta la pertinencia de estudiar el caso de México, considerando la cantidad y calidad del agua en los 32 estados de la República.

1.1.4. Distritos de riego

Según el Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos (UNESCO, 2019), el sector agropecuario representa el 69 % de las extracciones de agua dulce a nivel mundial. En México, esta cifra se eleva al 76 % del uso total del recurso (CONAGUA, 2019). Los distritos de riego a nivel nacional e internacional han sido de gran interés en la gestión del recurso hídrico, derivado del papel que juegan en la agricultura y su responsabilidad de regular, distribuir y optimizar el uso del agua en sus comunidades.

Para México, los distritos de riego son de gran importancia por considerarse claves para la seguridad alimentaria (Altamirano et al., 2017; Palacios-Vélez et al., 2019; Villalobos-Cano et al., 2024), Aunque existen desafíos importantes como la infraestructura obsoleta y la falta de adopción de tecnologías innovadoras para optimizar el uso del agua (Altamirano et al., 2019), se destaca la necesidad de fortalecer las instituciones para mejorar su desempeño. En lo que respecta a nivel internacional, se considera que los distritos de riego son decisivos para el desarrollo de la agricultura en los países, en especial en los países de desarrollo (Domínguez et al., 2019).

Los distritos de riego enfrentan retos de carácter técnico, institucional y ambiental. Uno de los principales problemas en México es la infraestructura deteriorada, misma que obstaculiza la

eficiencia del sistema y amenaza la seguridad alimentaria (Altamirano et al., 2017; Fuentes y Coll, 1980), aunado a la falta de modernización tecnológica que agrava aún más esta situación (Altamirano et al., 2019).

La tesis justifica su estudio considerando organismos de agua urbanos, distritos de riego rurales y el impacto del crecimiento económico según la cantidad y calidad del agua.

1.2. Justificación

El agua es un recurso limitado y de alto valor. Dado que la economía estudia la asignación eficiente de recursos escasos, su aplicación es fundamental para analizar las decisiones racionales sobre el uso del agua dentro de una gestión integral (Pulido et al., 2014). La gestión del agua comprende políticas, prácticas y decisiones orientadas al uso, distribución y conservación del recurso para garantizar el suministro en usos doméstico, industrial, agropecuario y energético (Lele, 2022). Su escasez genera impactos tanto a nivel microeconómico como macroeconómico.

El agua constituye un recurso limitado y estratégico cuya gestión es un reto global. Factores como el cambio climático, el crecimiento poblacional acelerado en zonas urbanas, la competencia entre usos domésticos, industriales, agropecuarios y energéticos, la contaminación de cuerpos de agua y la obsolescencia en infraestructura hidráulica han configurado un escenario de crisis hídrica sin precedentes (Damania, 2020; Lee et al., 2023; ONU, 2021).

Desde un punto de vista microeconómico, el estudio se concentra en cómo el individuo, la empresa y demás entidades toman decisiones en relación con el uso y valoración del vital líquido. Tal es el caso de los hogares que pueden enfrentar mayores costos para obtener agua potable, mientras que los operadores de agua y los distritos de riego invierten en tecnología o fuentes alternas, lo que genera mayores costos y repercute en la tarifa al consumidor. Según Rogers et al. (1998), la microeconomía aborda la gestión hídrica en tres temas claves: el precio, el costo

(incluyendo los costos de oportunidad y externalidades) y el valor del agua (uso e intrínseco), además menciona que el costo total debería equiparse con su valor para maximizar el beneficio social.

Además, se exploran los sucesos del agua sobre variables agregadas como el crecimiento económico, la inflación, el empleo y la estabilidad financiera. Sadoff et al. (2015) señalan que la seguridad hídrica está vinculada a la infraestructura, la productividad agrícola y la competitividad industrial. Además, destacan que una mejor infraestructura hídrica fortalece la resiliencia ante el cambio climático y tiene efectos positivos en el empleo y la recaudación fiscal.

En lo que respecta a Brown y Lall (2006), consideran que en sectores como la agricultura, la inestabilidad hídrica disminuye la productividad y como consecuencia el desempeño macroeconómico. Por otro lado, Damania et al. (2019) resaltan que la contaminación y la escasez del recurso hídrico acrecientan la fragilidad financiera de los sectores productivos, afectando la balanza comercial y la recaudación fiscal. El World Bank Group (2016), coincide, alertando que el cambio climático podría agravar estos efectos en países desarrollados y en desarrollo.

En cuanto a la seguridad alimentaria, Ringler et al. (2010) afirman que la disponibilidad de agua es crucial para la oferta agrícola y la estabilidad de precios. Rosegrant et al. (2002) señalan que la creciente demanda hídrica y el aumento poblacional suponen importantes desafíos en materia de inversión pública, generando presión sobre el gasto e incluso el endeudamiento. Aunque Ostrom (2015) se enfoca en bienes comunes, su teoría de acción colectiva subraya el rol de las instituciones locales en prevenir la sobreexplotación del agua, con implicaciones macroeconómicas de largo plazo.

En México, la problemática adquiere una dimensión aún más compleja. El país enfrenta una distribución desigual del recurso hídrico, mientras el sureste concentra el 67 % del agua renovable, en el norte y centro —donde habita más del 77 % de la población y se genera el 83 %

del PIB— se dispone solo del 33 % (CONAGUA, 2019). A ello se suman los altos niveles de sobreexplotación de acuíferos, deficiencias en los sistemas de saneamiento y cobertura insuficiente de los servicios de agua potable, lo que repercute en la calidad de vida de la población y en el desarrollo económico (Banco de México, 2022).

En el ámbito urbano, los organismos operadores de agua enfrentan una falta de autosuficiencia financiera causada por tarifas inadecuadas, baja eficiencia en la recaudación y ausencia de incentivos regulatorios (Briseño y Sánchez, 2018; Silva et al., 2018). Mientras que en el ámbito macroeconómico, la literatura muestra que la disponibilidad y calidad del agua influyen en los niveles de ingreso, aunque la relación con las tasas de crecimiento económico presenta resultados heterogéneos (Barbier, 1999, 2004, 2015; El Khanji y Hudson, 2016). Finalmente, en el sector agrícola —responsables del 76 % del consumo nacional de agua— enfrentan pérdidas significativas por infraestructura deteriorada y baja tecnificación, al tiempo que la diversificación de cultivos aparece como una estrategia clave para optimizar la productividad hídrica y garantizar la seguridad alimentaria (Almagro et al., 2023; Altamirano et al., 2017; Hoque et al., 2023; Jaleta et al., 2020).

La integración de estas dos dimensiones (microeconómica y macroeconómica) permite justificar esta tesis como un esfuerzo por ofrecer una visión de la gestión del agua que no se limite a soluciones técnicas, sino que incorpore enfoque económico.

1.3. Propósito de la tesis

El objetivo de este estudio es analizar al agua como recurso limitado de alto valor, desde una perspectiva que combine enfoques microeconómicos y macroeconómicos, con el fin de generar aportaciones teóricas y prácticas para la economía, la gestión y las políticas públicas en materia hídrica en México. En el enfoque microeconómico se analiza la autosuficiencia financiera de los

organismos operadores de agua y la diversificación de cultivos en los distritos de riego, mientras que en el macroeconómico se estudia la relación entre la disponibilidad y calidad del recurso hídrico y el crecimiento económico, contribuyendo desde cada perspectiva al estudio del agua en la economía.

1.4. Partes de la tesis

La tesis se compone de tres capítulos que corresponden a tres artículos de investigación, en los que el autor de esta tesis es primer autor: en el capítulo 2 de esta tesis, se plantea la hipótesis sobre los factores que inciden en la autosuficiencia financiera de los organismos operadores de agua en México. En capítulo 3 de esta tesis, se analiza la relación entre la disponibilidad y la contaminación del agua con el crecimiento económico en los 32 estados de la República. Y, por último, en el capítulo 4 de esta tesis, se examina cómo la diversificación de cultivos incide en el rendimiento hídrico de los distritos de riego en México.

Cada capítulo incluye una revisión de la literatura, la metodología, la hipótesis y la correspondiente pregunta de investigación, así como una descripción de los instrumentos, procedimientos y análisis de datos empleados. Cabe destacar que las bases de datos fueron desarrolladas en específico para cada investigación. A continuación, presento el título de los artículos, sus autores, y su aporte al objetivo de la tesis.

En el capítulo titulado “Determinantes de la autosuficiencia financiera de los organismos operadores de agua mexicanos” (Navarro-Guerrero y Briseño, 2024), escrito en coautoría con el director de tesis Hugo Briseño Ramírez, se estudian los factores que determinan la sostenibilidad financiera de los organismos operadores de agua, pieza clave de la gestión hídrica urbana, desde la perspectiva microeconómica. Al analizar tarifas, eficiencia física y comercial, subsidios cruzados y la localización regional se generan evidencias empíricas sobre las condiciones que favorecen o

limitan la autosuficiencia financiera. Dichos hallazgos no solo permiten comprender la problemática urbana, sino que también aportan insumos para vincular la gestión microeconómica con la sostenibilidad global del recurso, contribuyendo así a la construcción de propuestas de política hídrica en México. Para ello, se elabora una base de datos en panel utilizando información pública disponible de 31 organismos que prestan servicio en grandes ciudades y atienden aproximadamente a un tercio de la población urbana del país, abarcando el periodo de 2017 a 2019.

El capítulo nombrado “El impacto de la disponibilidad y la contaminación del agua en el crecimiento económico a nivel subnacional: evidencia de México” (Navarro-Guerrero et al., 2025), elaborado en coautoría con Edgar Demetrio Tovar García (codirector de tesis) y Triga Alicia Dávila Sandoval, se complementa la visión microeconómica con un enfoque macroeconómico, al analizar cómo la disponibilidad y la calidad del agua se relacionan con el crecimiento económico en México. El uso de datos subnacionales para los 32 estados entre 2005 y 2020 permite ofrecer evidencia empírica más precisa sobre las desigualdades territoriales en la gestión del recurso. Los resultados, que muestran una asociación positiva entre disponibilidad de agua y PIB per cápita —aunque sin relación robusta con las tasas de crecimiento—, refuerzan la idea de que el agua es un factor estructural del desarrollo. Además, al destacar la subutilización en el sur y la sobreexplotación en el centro-norte, el estudio aporta elementos para diseñar políticas diferenciadas que promuevan innovación, eficiencia y posibles esquemas de comercio interregional del recurso. Estos hallazgos no solo enriquecen la literatura económica sobre agua y crecimiento, sino que también se integran al marco analítico de la tesis, fortaleciendo la articulación entre perspectivas microeconómicas, macroeconómicas y de gestión sostenible.

El capítulo denominado “Análisis de la relación entre la diversificación de cultivos y rendimiento hídrico en los distritos de riego mexicanos”, investigación inédita elaborada en coautoría con el director de tesis Hugo Briseño Ramírez, analiza cómo diversificar cultivos mejora

la eficiencia y sostenibilidad del uso del agua en estos distritos desde una perspectiva microeconómica rural. El análisis empírico, sustentado en bases de datos especializadas y técnicas de panel econométrico, evidencia que la productividad hídrica y la diversificación se relacionan positivamente con el rendimiento hídrico. Los hallazgos cuantitativos muestran que el agua, además de ser un recurso vital, funciona como un insumo económico cuyo manejo estratégico fortalece la rentabilidad agrícola y la seguridad alimentaria. En el marco del objetivo general, esta evidencia se integra con los hallazgos urbanos y macroeconómicos, aportando un enfoque integral de la escasez de agua en México. De manera complementaria, orienta el diseño de políticas públicas dirigidas a optimizar la gestión hídrica en el sector agropecuario, fomentar la resiliencia de los distritos de riego y contribuir a un desarrollo económico más equilibrado y sostenible.

La investigación presenta un marco analítico que integra la visión microeconómica urbana, enfocada en la autosuficiencia financiera de los organismos operadores de agua; la perspectiva microeconómica rural, orientada hacia la diversificación de cultivos y la productividad hídrica en los distritos de riego; así como el enfoque macroeconómico, que examina la interacción entre la disponibilidad y calidad del recurso hídrico y el crecimiento económico. Esta integración ayuda a comprender la escasez de agua como un asunto multifacético, que va más allá de los aspectos técnicos y se ubica en el centro de las decisiones económicas y políticas públicas. Por ello, la tesis aspira no solo a aportar evidencia empírica original, sino también a brindar propuestas que refuercen una gestión sostenible del recurso, fomenten la igualdad territorial en el acceso al agua y apoyen el desarrollo económico nacional.

Capítulo 2. Determinantes de la autosuficiencia financiera de los organismos operadores de agua mexicanos

2.1. Introducción

Dados los crecientes procesos de urbanización en las ciudades, así como los problemas de escasez de agua que existen en algunos centros poblacionales, es fundamental estudiar a las entidades encargadas de administrar el recurso en las ciudades. En el caso de México, estas entidades son llamadas organismos operadores de agua (OOAs). Derivado de la reforma al artículo 115 constitucional, en 1983, el municipio es la instancia facultada para administrar el agua. Sin embargo, dado que algunos municipios carecen de capacidades económicas o institucionales, el estado puede hacerse cargo de esta importante tarea. Asimismo, existen algunas ciudades en las que el servicio de agua potable es administrado, al menos en algunas funciones, por empresas privadas. Por lo anterior, en México existen organismos operadores municipales, estatales y con participación privada en la administración. La gran mayoría de estos son organismos públicos descentralizados municipales.

El desempeño de los organismos operadores de agua, a partir de ahora OOAs, ha sido estudiado tradicionalmente con la metodología del análisis envolvente de datos (DEA, por sus siglas en inglés), en el que a través de entradas (*inputs*) y salidas (*outputs*) se observa qué organismos logran una mayor eficiencia. Sin embargo, se carece de estudios que analicen el desempeño financiero de los organismos, mismo que también es muy importante porque permite que este cubra sus gastos operativos y pueda hacer frente a las necesidades de infraestructura para proveer de agua a los ciudadanos.

El objetivo de este capítulo es explorar los factores que están asociados al adecuado manejo financiero de los organismos operadores de agua (medido a través de la autosuficiencia financiera), así como su impacto.

En los siguientes apartados se realiza una revisión de literatura sobre los factores que impactan en el desempeño de los organismos operadores de agua y se propone un enfoque de evaluación de la gestión desde la autosuficiencia financiera; se explica la construcción de una base de datos y se analizan diferentes modelos econométricos; y, para finalizar, se exponen las conclusiones acerca de los principales factores que influyen en la autosuficiencia financiera de los OOA's en México.

2.2. Estudios previos sobre el desempeño de los organismos operadores de agua

En este apartado se lleva a cabo una revisión de la literatura sobre los principales estudios que abordan el desempeño de los OOA's a nivel internacional, también llamados *water utilities* en el idioma inglés. Para lo anterior, se realizó una búsqueda en el campo “título del artículo” del motor de búsqueda de la base de datos *Scopus*. Las palabras clave de búsqueda incluyeron “water utilities”, con la posibilidad de utilizar adicionalmente las palabras “performance”, “non revenue water”, “unaccounted for water”, “efficiency”, “UFW” o “unaccounted-for water”; con la limitante de solo artículos y *journal*. Se consideró que los trabajos con estos términos específicos en el título, resumen o palabras clave cumplieran con los requisitos del estudio. Además, abarcó el periodo de 2017 a 2022. El código de búsqueda completo se muestra en la tabla 1.

Tabla 1*Sintaxis de búsqueda sobre desempeño de los organismos operadores de agua (OOAs)*

Base de datos	Sintaxis	Resultados
<i>Scopus</i>	TITLE (“water utilities” AND (“performance” OR “non revenue wáter” OR “Unaccounted for Water” OR “efficiency” OR “UFW” OR “Unaccounted-for Water”)) AND (LIMIT-TO (PUBYEAR, 2022) OR LIMIT-TO (PUBYEAR, 2021) OR LIMIT-TO (PUBYEAR, 2020) OR LIMIT-TO (PUBYEAR, 2019) OR LIMIT-TO (PUBYEAR, 2018) OR LIMIT-TO (PUBYEAR, 2017) AND (LIMIT-TO (DOCTYPE, “ar”)) AND (LIMIT-TO (SRCTYPE, “j”))	32

Nota. Elaboración propia con base en Scopus.

Se analizó la metodología de todos los artículos encontrados en esta búsqueda, así como los principales hallazgos. La metodología más utilizada para analizar el desempeño de los organismos operadores de agua es el análisis envolvente de datos (DEA, por sus siglas en inglés) (Cetrulo et al., 2020; Gidion et al., 2019b; Güngör-Demirci et al., 2017; Ngobeni y Breitenbach, 2021; Robles-Velasco et al., 2022; Romano et al., 2017, 2018); y el análisis de frontera estocástica (SFA por sus siglas en inglés), como complemento del DEA (Molinos-Senante et al., 2021). Algunos autores llaman la atención sobre las limitaciones del DEA y el SFA, y la importancia de caracterizar el contexto del sector de los OOAs (Estruch-Juan et al., 2020), así como presentar una visión más holística (Akimov y Simshauser, 2020). Cetrulo et al. (2020) mencionan que en el DEA la inversión para alcanzar una cobertura universal podría penalizar los resultados de eficiencia, cuando esto es algo positivo para el organismo. Por lo anterior quizás no sea la mejor herramienta para medir el desempeño de los OOAs.

En menor medida se utilizan otros métodos como el involucramiento estocástico no paramétrico de datos (StoNED, por sus siglas en inglés) (Molinos-Senante et al., 2021); el DEA de

red, en el que se busca hacer análisis comparativos entre organismos de diferentes segmentos (Gidion et al., 2019a); el DEA en dos etapas (Güngör-Demirci et al., 2018a); el doble *bootstrap* DEA, con la finalidad de caracterizar grupos según variables contextuales (Nithammer et al., 2022; Salazar-Adams, 2021); el *bootstrap* DEA combinado con una regresión truncada, también con la finalidad de incluir variables del contexto (Ablanedo-Rosas et al., 2020); análisis de regresión de panel de datos (Angeles-Castro et al., 2018; Güngör-Demirci et al., 2018b; Li, 2018); regresiones múltiples y redes neuronales artificiales (Nafi y Brans, 2018); y panel de datos con factores dinámicos (Zirogiannis y Tripodis, 2018).

En algunos artículos se proponen metodologías diferentes para evaluar a los organismos. (Tskhai, 2020) propone evaluar a los OOA's según una matriz que combina recursos externos e internos contra resultados externos e internos, concluyendo que es importante tomar en cuenta las características de la región en donde se encuentra el organismo. D'Inverno et al. (2021) señalan la importancia de generar indicadores de desempeño más globales que integren aspectos financieros, económicos, ambientales y de calidad en el servicio con la finalidad de evaluar al organismo desde una visión más amplia. Berg (2020), hace énfasis en la relevancia de generar información precisa, confiable y relevante que permita construir indicadores clave del desempeño (*Key Performance Indicators, KPIs*) para medir la gestión y mejorarla en el largo plazo. Pinto et al. (2017) ven pertinente definir indicadores para determinar categorías de calidad en el servicio.

También existen otro tipo de estudios que abordan distintos aspectos importantes a considerar en los organismos. Por ejemplo, subrayar la importancia de que los OOA's cumplan con su mandato de suministrar agua a todos los ciudadanos incluidos los de escasos recursos (Kemendi y Tutusaus, 2018; Guerrini et al., 2018) señalan la necesidad de generar incentivos para ahorrar costos y mejorar la productividad, así como mejorar la inversión en los organismos. Kayaga et al. (2018) hablan sobre la importancia de tener un diseño organizacional que clarifique los roles y

responsabilidades de los actores dentro del organismo para lograr un mejor desempeño (Pereira y Mata-Lima, 2021), así como Walker et al. (2020) subrayan la necesidad de mejorar la eficiencia en el uso de energía en la provisión del servicio de agua en los OOA. Tskhai (2022), sugiere que el desempeño de los organismos puede medirse a través de indicadores externos (características de los consumidores), e internos (características de la empresa). Mientras que Ferreira et al. (2022) recomiendan que los sistemas de agua tengan un marco de evaluación de desempeño para detectar vulnerabilidades ante inundaciones y prever inversiones en rehabilitación.

Sobre los principales hallazgos de los estudios antes mencionados, se encuentra que las variables que influyen de manera positiva en el desempeño de los OOA, de manera general, son: razón de conexiones con medición sobre aquellas sin medición (Nithammer et al., 2022), tamaño del organismo (D'Inverno et al., 2021; Ngobeni y Breitenbach, 2021), organismos con varias funciones u organismos múltiples (D'Inverno et al., 2021), organismos privados (Li, 2018; Salazar-Adams, 2021), cortar el servicio a usuarios que no pagan por el mismo (Salazar-Adams, 2021), el número de conexiones por unidad de volumen de agua perdida (Ablanado-Rosas et al., 2020), facturación, recolección y rentabilidad (Angeles-Castro et al., 2018), longitud de la red e ingresos operativos (Güngör-Demirci et al., 2018b), número de directores y directores con conexiones políticas (Romano et al., 2018), y empresas públicas cuando se excluye la calidad pero empresa con participación privada cuando la calidad del servicio es considerada (Romano et al., 2017).

En cuanto a las variables que impactan negativamente en el desempeño destacan las fugas de agua (Güngör-Demirci et al., 2018b; Molinos-Senante et al., 2021), miembros de la junta no graduados o empresas medianas (Romano et al., 2018), y el número de conexiones, así como la precipitación (Güngör-Demirci et al., 2017).

Los estudios se han realizado en varias países del mundo como España (Robles-Velasco et al., 2022), Sudáfrica (Ngobeni y Breitenbach, 2021; Nithammer et al., 2022), Italia (D'Inverno et

al., 2021; Guerrini et al., 2018; Romano et al., 2018), México (Ablanedo-Rosas et al., 2020; Angeles-Castro et al., 2018; Salazar-Adams, 2021), Brasil (Cetrulo et al., 2020), Rusia (Tskhai, 2020), Tanzania (Gidion et al., 2019b), China (Li, 2018) y Estados Unidos (California) (Güngör-Demirci et al., 2017; Güngör-Demirci et al., 2018a; Güngör-Demirci et al., 2018b).

Dado que el presente estudio es sobre OOA's de México, se considera relevante retomar los hallazgos de los estudios más importantes en los últimos años. Angeles-Castro et al. (2018) realizan un análisis de panel de datos de 368 OOA's durante el periodo 2010 a 2014, para explicar la eficiencia total (volumen de agua cobrado entre producido), encontrando que las empresas pequeñas son más eficientes y que la facturación, cobranza y rentabilidad son factores muy relevantes para mejorar la eficiencia. Ablanedo-Rosas et al. (2020) realizan un método de dos etapas combinando Bootstrap DEA y un análisis de regresión truncada generando evidencia de que el número de conexiones por unidad de volumen pérdida tiene un impacto significativo positivo en la eficiencia operativa de los OOA's en México. Salazar-Adams (2021), a través de un doble Bootstrap DEA, y con información de 359 organismos, sugiere que los pocos OOA's privados son más eficientes que los públicos. También señala que cortar el agua ante la falta de pago tiene una relación positiva con la eficiencia (Salazar-Adams, 2021).

Como se ha visto anteriormente, las investigaciones enfocadas en el desempeño de los OOA's tanto en México como en el mundo se centran en calcular la eficiencia técnica a través de los diferentes tipos de DEA, y en menor medida en buscar explicaciones contextuales que puedan tener una relación positiva o negativa con dicha eficiencia. En los últimos años, solo se detectó para México que el estudio de Angeles-Castro et al. (2018) se enfoca en estudiar la eficiencia total o global (volumen de agua cobrado entre producido), en lugar de calcular la eficiencia técnica generada por el DEA.

En la presente investigación se busca un enfoque en el desempeño financiero del organismo operador. En concreto, se busca calcular los factores que están asociados a la autosuficiencia financiera del mismo en función de variables como la tarifa y las eficiencias física, comercial y global. No se detectaron estudios similares al que se propone, mismo que tiene como limitaciones la poca información publicada por los OOA's en México considerando que puede haber un efecto de las diferentes coberturas de macro y micro medición que dan origen a parte de los datos publicados.

Estudios previos como el de Briseño y Sánchez (2018), señalan que a los municipios se les asignó una responsabilidad de administrar el agua para uso urbano, pero ha hecho falta que desarrollen los recursos y capacidades institucionales necesarios para ello. Es muy importante que cuenten con medición, facturación y cobranza adecuadas para tener unas finanzas sanas para hacer frente a los costos operativos y a las necesidades de infraestructura. Briseño (2018), menciona que la tarifa de agua debe ser determinada con criterios técnicos e ir acompañada con eficiencia en la operación del organismo, pues de nada sirve incrementar los ingresos de este si estos no se utilizarán adecuadamente. Es importante señalar que cuando hay una percepción en la población de que la autoridad tiene un buen desempeño, hay una mayor disposición a pagar por el servicio (Briseño y Macedo, 2021).

En el siguiente apartado se describe la construcción de una base de datos sobre OOA's en México con información sobre autosuficiencia financiera, tarifas y eficiencias, con la finalidad de analizar, a través de modelos econométricos, cuáles son los factores que impactan en que los organismos tengan una mejor relación de ingresos entre egresos.

2.3. Construcción de la base de datos y metodología

Con la finalidad de encontrar las principales variables que impactan en la autosuficiencia financiera de los OOA's en México, se lleva a cabo una base de datos con la información disponible de organismos de diferentes ciudades durante 2017, 2018 y 2019. El criterio para definir cuáles serían las observaciones fue que el organismo en cuestión tuviera al menos información sobre su tarifa doméstica, pues es una variable fundamental para explicar los ingresos; y un indicador de autosuficiencia financiera. En concreto, se obtuvieron las tarifas domésticas, industrial y comercial de la página del Sistema Nacional de Información del Agua (SINA) (CONAGUA, 2022). Con las tarifas, se propone un indicador que llamamos nivel de subsidio cruzado (NSC) que es la división del promedio de las tarifas comercial e industrial, entre la tarifa doméstica. El subsidio cruzado, en esencia, es imponer una tarifa que supera con creces la estándar a los usuarios comerciales e industriales con la finalidad de subsidiar a los domésticos cobrándoles una tarifa más baja. El número de OOA's de los que se obtuvo la información es de 31, mismos que atienden a una cuarta parte de la población total del país y a una tercera parte de la población urbana según el Sistema Urbano Nacional (SUN).

La variable autosuficiencia financiera (variable a explicar o dependiente) se obtuvo del “Sistema de información para incentivar el cobro-pago del agua”. Una iniciativa de la fundación Río Arronte en conjunto con el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA). En esta iniciativa se busca incentivar las mejores prácticas en la gestión del agua entre los OOA's y los distritos de riego. De este mismo sistema, se obtuvieron otras variables relevantes para evaluar la correcta administración de los OOA's como son: eficiencia física, eficiencia comercial, eficiencia de cobro y eficiencia global. La eficiencia física es un porcentaje que se obtiene de la división del agua facturada entre el agua producida (ambas en metros cúbicos); la eficiencia comercial es la

división del agua cobrada entre el agua facturada (medidas en metros cúbicos); la eficiencia de cobro es el porcentaje de agua cobrada sobre el agua facturada (medidas en pesos); y la eficiencia global es el porcentaje de agua cobrada entre producida (en metros cúbicos), o el producto de la eficiencia física y la eficiencia comercial (Río Arronte e IMTA, 2021).

Para medir el impacto de zonas con alta disponibilidad de agua, se construyó una variable dicotómica que toma el valor de uno cuando el organismo pertenece a alguna Entidad Federativa del sureste del país y cero en otro caso. La idea que subyace con esta variable es que las zonas del sureste mexicano tienen menos incentivos para ser eficientes en la gestión del agua pues no tienen el problema de la escasez de este recurso en la magnitud que se tiene en estados del centro y del norte del país. En la tabla 2 se observan las variables, su fuente, su descripción y su estadística descriptiva.

Tabla 2*Variables, fuente y estadística descriptiva*

Variable	Descripción	Fuente	Obs.	Media	Mediana	Desviación estándar	Mínimo	Máximo
AFIN (%)	Ingresos por venta de agua entre egresos reportados por el OOA	Río Arronte e IMTA (2021)	90	65.17	67.19	29.69	5.33	175.1
TARIFAD	Tarifa para un consumo doméstico de 30 m ³ por mes	Sistema Nacional de Información del Agua (SINA) de la CONAGUA	147	16.36	14.92	8.85	1.02	68.33
TARIFAC	Tarifa para un consumo comercial de 30 m ³ por mes		148	29.42	25.56	16.50	3.95	76.58
TARIFAI	Tarifa para un consumo industrial de 30 m ³ por mes		142	33.51	29.20	18.99	4.62	97.36
NSC	División del promedio de la tarifa comercial e industrial entre la tarifa doméstica	Elaboración propia con datos de CONAGUA	142	2.16	1.81	1.28	0.86	8.68
EFISICA (%)	Volumen facturado entre volumen producido en metros cúbicos	Río Arronte e IMTA (2021)	96	56.88	56.71	13.05	25.14	84.44
ECOMERCIAL (%)	Volumen cobrado entre volumen facturado en metros cúbicos. También llamada eficiencia en cobro volumétrico		81	75.60	78.03	17.56	34.21	114.5
ECOBRO (%)	Ingresos por venta de agua entre ingresos esperados de agua facturada		93	78.10	81.54	17.06	35.81	114.5
EGLOBAL (%)	Volumen cobrado entre volumen producido en metros cúbicos		82	44.22	40.49	15.65	15.66	76.78
SURESTE	Organismo en los estados de Yucatán, Quintana Roo, Campeche, Tabasco, Chiapas, Veracruz o Oaxaca = 1; En otro caso = 0	Mapa de la República mexicana	159	0.17	0.00	0.38	0	1

Nota. Elaboración propia.

Para observar el grado de asociación entre las variables se lleva a cabo una matriz de correlación, misma que se observa en la tabla 3. Podemos observar que las variables que mayor correlación tienen con la autosuficiencia financiera son eficiencia de cobro (0.63), eficiencia comercial (0.47) y eficiencia global (0.47). En cuanto a las relaciones entre las posibles variables explicativas de la autosuficiencia financiera, se observa que los grados de asociación más altos se encuentran entre los diferentes tipos de tarifas; y entre los pares de variables eficiencia física y eficiencia global (0.76), eficiencia comercial y eficiencia cobro (0.63), y eficiencia comercial con eficiencia global (0.78).

Tabla 3

Matriz de correlación

	AFIN	TARIFAD	TARIFAC	TARIFAI	NSC	EFISICA	ECOMERCIAL	ECOBRO	EGLOBAL
AFIN	1								
TARIFAD	0.31	1							
TARIFAC	0.23	0.63	1						
TARIFAI	0.13	0.59	0.88	1					
NSC	-0.22	-0.33	0.28	0.36	1				
EFISICA	0.19	-0.09	0.16	0.21	0.36	1			
ECOMERCIAL	0.47	0.08	0.17	0.23	-0.01	0.23	1		
ECOBRO	0.63	0.14	0.21	0.22	0.00	0.15	0.63	1	
EGLOBAL	0.47	-0.00	0.25	0.29	0.25	0.76	0.78	0.48	1

Nota: Elaboración propia.

Con la base de datos antes mencionada y analizada, se realizan varios modelos econométricos de panel con la finalidad de encontrar cuáles son las variables que explican de mejor manera la autosuficiencia financiera de los OOAs. En el siguiente apartado se describen los diferentes modelos, así como sus respectivas pruebas de validación.

2.4. Modelos y resultados

Dada la naturaleza de la información de la base de datos en la cual existen unidades de medición (OOAs) y unidades de tiempo (2017, 2018 y 2019), se procede a realizar regresiones de panel de datos. Se encontró que, para cumplir con la prueba de validación de correcta especificación, la variable dependiente debía estar en nivel y la mayoría de las explicativas, salvo algunos casos, en logaritmo. Los modelos con los mejores ajustes, así como sus pruebas de validación, se observan en la tabla 4. Es importante señalar que los modelos de panel son de tipo *Pooled*. No se reportan efectos fijos y aleatorios debido a que las variables resultaron con coeficientes contrarios a los esperado en la mayoría de los casos.

Tabla 4*Modelos de regresión de panel para explicar la autosuficiencia financiera (AFIN)*

Concepto	(Modelo 1) AFIN	(Modelo 2*) AFIN	(Modelo 3*) AFIN	(Modelo 4) AFIN
Constante	-28.7576 (0.1876)	-41.1077 (0.2049)	-187.894 (0.0045)	-113.467 (0.0075)
TARIFAD			0.768049 (0.0302)	
I_TARIFAD	8.31395 (0.0118)			
I_TARIFAC		8.33014 (0.0642)		
I_NSC		-10.8304 (0.0096)		
I_EFISICA			27.7403 (0.0359)	27.4261 (0.0027)
I_ECOMERCIAL			28.9707 (0.0836)	15.7876 (0.0475)
I_EGLOBAL	18.7594 (0.0003)	22.8665 (0.0015)		
SURESTE	-23.2960 (0.0100)	-20.9793 (0.0152)		-36.5681 (0.0000)
Observaciones / OOA	74 / 31	72 / 31	74 / 30	78 / 30
Coefficiente R ²	0.49	0.50	0.35	0.46
R ² ajustada	0.47	0.47	0.33	0.43
Valor p prueba de normalidad	0.31	0.15	0.14	0.10
Valor p prueba Reset de Ramsey	0.58	0.77	0.29	0.80
Valor p prueba de White	0.06	0.04	0.04	0.09
TARIFAD			1.019	
VIF I_TARIFAD	1.427			
VIF I_TARIFAC		1.504		
VIF I_NSC		1.163		
VIF I_EFISICA			1.046	1.054
VIF I_ECOMERCIAL			1.052	1.108
VIF I_EGLOBAL	1.082	1.153		
VIF SURESTE	1.524	1.565		1.079

Nota: valor p entre paréntesis. *Desviaciones típicas robustas para corregir heteroscedasticidad. Elaboración propia.

En el modelo 1 se utilizaron como variables explicativas de autosuficiencia financiera (AFIN) las variables tarifa doméstica (TARIFAD) y eficiencia global (EGLOBAL) en forma funcional logarítmica; así como la variable dicotómica SURESTE. En este modelo se eliminó la observación de Ensenada para 2018 pues se consideró un dato atípico por tener un residuo superior a 2.5 desviaciones alrededor de la media. En este modelo resulta significativa positiva al uno por ciento la variable $l_EGLOBAL$ y al cinco por ciento la variable $l_TARIFAD$. Asimismo, la variable SURESTE es significativa negativa al cinco por ciento. El coeficiente R^2 de 0.49 nos indica que el 49 % de la variabilidad en la variable dependiente autosuficiencia financiera (AFIN) es explicada por los cambios en las variables independientes utilizadas en el modelo. Dado que los factores de inflación de la varianza (VIF) son menores a 10 y la correlación entre las variables involucradas en el modelo son menores a 0.5, se asume que no hay multicolinealidad. El modelo cuenta con normalidad en los errores, correcta especificación y homocedasticidad.

Respecto al modelo 2 se utilizan como variables explicativas la tarifa comercial (TARIFAC), el nivel de subsidio cruzado (NSC) y la eficiencia global (EGLOBAL), todas en forma funcional logarítmica. Además, se introduce la variable dicotómica SURESTE. Resulta significativa positiva al uno por ciento $l_EGLOBAL$, y al diez por ciento $l_TARIFAC$. Por otro lado, SURESTE es significativa negativa al cinco por ciento y l_NSC al uno por ciento. La bondad de ajuste medida a través del R^2 es de 0.50. Se asume que no hay multicolinealidad dado que los factores de la inflación de la varianza (VIF) son menores a 10 y las correlaciones entre pares de variables incluidas en el modelo son menores a 0.5. El modelo cuenta con normalidad en los errores y correcta especificación. Dado que no cumple con homocedasticidad, se utilizaron desviaciones típicas robustas.

El modelo 3 incluye como variables explicativas la tarifa doméstica (TARIFAD) sin logaritmo; y la eficiencia física (EFISICA) y comercial (ECOMERCIAL) en forma funcional

logarítmica. Las variables TARIFAD y I_EFISICA resultan significativas positivas al cinco por ciento; y I_ECOMERCIAL al diez por ciento. El coeficiente R^2 es de 0.35. Se asume que no hay multicolinealidad dado que los VIF son menores a 10 y la correlación entre pares de variables es menor a 0.5. El modelo cumple con normalidad y correcta especificación. Se utilizaron desviaciones típicas robustas ante la presencia de heterocedasticidad. En el modelo 4 se utilizan las variables EFISICA y ECOMERCIAL con forma funcional logarítmica. También se agrega la variable dicotómica SURESTE. La variable I_EFISICA resulta significativa positiva al uno por ciento y I_ECOMERCIAL al cinco por ciento. SURESTE es significativa negativa al uno por ciento. El coeficiente R^2 es 0.46. Se asume que no hay multicolinealidad porque los VIF son menores a 10 y la correlación entre pares de variables es menor a 0.5. El modelo cumple con normalidad, correcta especificación y homocedasticidad.

Tabla 5

Matriz de correlación de las variables utilizadas en el modelo

	AFIN	TARIFAD	I_TARIFAD	I_TARIFAC	I_NSC	I_EFISICA	I_ECOMERCIAL	I_EGLOBAL
AFIN	1							
TARIFAD	0.31	1						
I_TARIFAD	0.42	0.88	1					
I_TARIFAC	0.33	0.67	0.77	1				
I_NSC	-0.27	-0.34	-0.40	0.24	1			
I_EFISICA	0.22	-0.06	-0.13	0.04	0.31	1		
I_ECOMERCIAL	0.46	0.10	0.23	0.23	0.01	0.21	1	
I_EGLOBAL	0.46	0.04	0.08	0.21	0.21	0.73	0.81	1

Nota. Elaboración propia.

En la tabla 5 se observa la matriz de correlación de las variables transformadas como fueron utilizadas en los modelos de regresión. Como se señaló anteriormente, no hay una alta correlación (mayor a 0.5) entre las variables utilizadas en cada uno de los modelos. En cuanto a la interpretación de los coeficientes, es importante atender a la forma funcional en la que se encuentra tanto la variable dependiente como cada una de las independientes. En ese orden de ideas, y para facilitar la comprensión de los resultados, se realizaron algunas conversiones para que los coeficientes puedan ser interpretados como elasticidades. El tipo de modelo según la forma funcional, los coeficientes, la elasticidad y su interpretación se observan en la tabla 6. Cabe mencionar que los incrementos o decrementos en las variables explicativas están acotados por lo que es importante considerar los máximos y mínimos señalados en la estadística descriptiva.

Tabla 6*Interpretación de los resultados (variables explicativas de AFIN)*

Variables X's	Forma funcional	Coefficientes β 's	Elasticidad	Interpretación
TARIFAD	Nivel - nivel	0.768049	$\beta \left(\frac{X}{Y}\right)^* = 0.768 \left(\frac{17.62}{62.50}\right) = 0.2165$	En términos de un modelo nivel – nivel, un incremento de un peso en la tarifa doméstica aumenta 0.77 por ciento la autosuficiencia financiera.
I_TARIFAD	Nivel - log	8.31395	$\beta \left(\frac{1}{Y}\right)^* = 8.314 \left(\frac{1}{61.50}\right) = 0.1352$	En términos de elasticidad, un incremento del uno por ciento en la tarifa doméstica aumenta entre 0.14 y 0.22 por ciento la autosuficiencia financiera
I_TARIFAC	Nivel - log	8.33014	$\beta \left(\frac{1}{Y}\right)^* = 8.330 \left(\frac{1}{62.29}\right) = 0.1337$	Un incremento del uno por ciento en la tarifa comercial aumenta en 0.13 por ciento la autosuficiencia financiera
I_NSC	Nivel - log	-10.8304	$\beta \left(\frac{1}{Y}\right)^* = -10.83 \left(\frac{1}{62.29}\right) = -0.1739$	Un incremento del uno por ciento en el nivel de subsidio cruzado disminuye en 0.17 por ciento la autosuficiencia financiera
I_EFISICA	Nivel - log	27.4261 a 27.7403	$\beta \left(\frac{1}{Y}\right)^* = 27.43 \left(\frac{1}{61.97}\right)$ a $27.74 \left(\frac{1}{62.50}\right)$	Un incremento del uno por ciento en la eficiencia física aumenta en 0.44 por ciento la autosuficiencia financiera
I_ECOMERCIAL	Nivel - log	15.7876 a 28.9707	$\beta \left(\frac{1}{Y}\right)^* = 15.79 \left(\frac{1}{61.97}\right)$ a $28.97 \left(\frac{1}{62.50}\right)$	Un incremento del uno por ciento en la eficiencia comercial aumenta entre 0.25 y 0.46 por ciento la autosuficiencia financiera
I_EGLOBAL	Nivel - log	18.7594 a 22.8665	$\beta \left(\frac{1}{Y}\right)^* = 18.76 \left(\frac{1}{61.50}\right)$ a $22.87 \left(\frac{1}{62.29}\right)$	Un incremento del uno por ciento en la eficiencia global aumenta entre 0.31 y 0.37 por ciento la autosuficiencia financiera
SURESTE	Nivel - D	-20.9793 a -36.5681	No aplica	Cuando el organismo pertenece a un estado del sureste mexicano la autosuficiencia financiera disminuye entre 21 y 37 unidades porcentuales

Nota: Según Gujarati y Porter (2010) se pueden medir las elasticidades utilizando promedios de X y Y. Elaboración propia con base en Gujarati y Porter (2010).

Como se ha señalado, y dado lo expuesto en la tabla 6, se puede apreciar que incrementos en las tarifas (doméstica y comercial) y en las eficiencias (física, comercial y global) generan aumentos en la autosuficiencia financiera, y viceversa. Por el contrario, incrementos en el subsidio cruzado hacen que disminuya la autosuficiencia financiera. De manera complementaria, la pertenencia a algún estado del sureste también provoca que disminuya la variable AFIN.

Respecto a la tabla 6, es importante considerar que los cambios en la variable dependiente corresponden a cambios alrededor de valores promedio de las variables explicativas. Considerar cambios en las variables explicativas que hicieran que se alejaran bastante del punto de los valores promedio puede propiciar predicciones erróneas de los cambios en la variable dependiente.

Con la finalidad de ejemplificar la utilidad práctica de los modelos expuestos, se sustituyeron los valores promedio de la estadística descriptiva en la ecuación del modelo 3, arrojando una autosuficiencia financiera del 62.08 por ciento, muy cercana al 65.17 por ciento observada. En el siguiente apartado se ofrecen algunas conclusiones sobre los hallazgos de esta investigación.

2.5. Conclusiones

En el presente capítulo se realiza una revisión de la literatura sobre los factores que inciden en el desempeño de los OOA. Se encuentra un hueco en la literatura sobre la exploración de los determinantes del desempeño financiero en los OOA y se propone un estudio sobre la gestión del agua para uso urbano en México desde el punto de vista de la autosuficiencia financiera.

Se lleva a cabo un modelo econométrico en el que la variable dependiente es la autosuficiencia financiera (ingresos entre egresos), y las explicativas con signo positivo son la tarifa (doméstica o comercial) y la eficiencia (física, comercial o global). Por otro lado, las variables

independientes con relación negativa con la autosuficiencia financiera son el nivel de subsidio cruzado y estar ubicado en el sureste mexicano.

Cabe señalar, que existen otras variables que pueden impactar en la autosuficiencia financiera de los OOA, mismas que no se incluyen en los modelos pero que son susceptibles de una reflexión, por ejemplo, las tomas clandestinas, las decisiones políticas al fijar la tarifa y la protección a la población vulnerable.

Las tarifas deben cubrir el costo del servicio y la mejora de la infraestructura, y definirse según criterios técnicos, no políticos. Un esquema tarifario adecuado fortalece las finanzas y reduce el consumo de agua. Se recomienda crear consejos independientes para definir tarifas con base técnica, evitando intereses políticos, y proteger a los sectores vulnerables.

Es muy común en México que las tarifas comerciales e industriales suelen ser mucho más altas que las domésticas. A este fenómeno se le llama subsidio cruzado. En el presente estudio se obtuvo un indicador llamado nivel de subsidio cruzado que es la división del promedio de las tarifas industriales y comerciales entre la tarifa doméstica. La relación con la autosuficiencia financiera resultó negativa. Lo anterior nos indica que tener tarifas comerciales e industriales muy altas respecto a la tarifa doméstica puede ser contraproducente. Por un lado, puede generar una dependencia financiera en menos cantidad de usuarios (comerciales e industriales); y por otro, incentivar el consumo irresponsable de agua en los usuarios domésticos al no valorar el servicio, incrementando así los costos de producción.

En este estudio se muestra evidencia de que la eficiencia en el organismo, medida como porcentaje de facturación sobre producción (eficiencia física), como cobro entre facturación en volumen (eficiencia comercial) y como cobro entre producción en volumen (eficiencia global), Contribuye de forma notable a la autosuficiencia financiera del OOA. Es importante, por lo tanto, fortalecer el nivel de facturación del organismo a través de la detección y reparación de fugas,

colocación y calibración de medidores para los diferentes tipos de usuarios, e identificación de tomas clandestinas. También, es conveniente incrementar la cobranza del agua a los usuarios, protegiendo siempre a la población en situación de vulnerabilidad, con la finalidad de desincentivar el consumo desmedido del recurso y mejorar las finanzas del organismo.

Resulta también de interés el hallazgo encontrado en esta investigación, sobre el menor desempeño financiero que tienen los OOAs ubicados en las entidades federativas ubicadas en el sureste mexicano. Lo anterior, debido a que no existe una necesidad imperante por la eficiencia dado que el agua no es un recurso escaso en comparación con los estados del centro y del norte del país. Por lo anterior, es importante que en las ciudades donde hay un problema real de escasez de agua, exista el conocimiento de la sociedad y de las autoridades sobre el mismo, para promover la eficiencia de los OOAs con la finalidad de evitar en un futuro no contar con este preciado líquido.

Para finalizar, se considera relevante impulsar a los OOAs a generar y publicar información que permita a las autoridades, académicos y sociedad civil y cualquier *stakeholder* en general, conocer el desempeño en materia de gestión y disponibilidad de agua, para prever posibles problemas futuros en esta materia y mejorar la resiliencia de las ciudades ante el cambio climático.

Capítulo 3. El impacto de la disponibilidad y la contaminación del agua en el crecimiento económico a nivel subnacional: evidencia de México

3.1. Introducción

Los medios de comunicación mexicanos han resaltado las preocupaciones socioeconómicas de la escasez de agua. Monterrey, reconocida como una de las principales ciudades del país por su tamaño e influencia, sufrió una grave escasez de agua para consumo urbano, doméstico e industrial en el verano de 2022. De hecho, el norte de México se ha visto afectado por sequías históricas en los últimos 10 años, y los próximos 10 años parecen ser aún más complicados. El sur de Estados Unidos tiene problemas similares, y la sequía en Europa en 2022 a 2023 también ha sido histórica. Además, se prevé que el estrés hídrico dulce aumentará con mayor intensidad en los países en desarrollo (Barbier, 2024). La escasez de agua y las sequías son preocupaciones importantes en todo el mundo, en consecuencia, su sostenibilidad y disponibilidad están establecidas en el sexto objetivo de la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible, adoptada por todos los Estados Miembros de las Naciones Unidas en 2015. La crisis mundial del agua fue enfatizada hace 20 años (Barbier, 2004; Duarte et al., 2014, 2020) y parece que esta crisis apenas está comenzando (Barbier, 2024; UNESCO, 2020).

El agua es un insumo productivo escaso, que se asigna entre usos alternativos, y su importancia para las actividades económicas es obvia, como lo respalda la evidencia microeconómica (Damania, 2020). En contraste, a nivel macroeconómico, los vínculos entre el agua y las variables macroeconómicas son débiles (Damania et al., 2020). En particular, el nexo agua-crecimiento económico parece ser insignificante en el largo plazo. Por un lado, la escuela

neoclásica afirma que el crecimiento económico depende de los factores de producción y la tecnología. Por otro lado, a menudo se asume que la tierra es una constante, por lo que se la excluye del análisis tradicional de la contabilidad del crecimiento (Barbier, 1999; Barro, 1999; Romer, 1994; Solow, 1956). Sin embargo, hoy en día, los recursos naturales y las preocupaciones ambientales juegan un papel más relevante y merecen más atención.

Barbier (1999), señala la importancia de cuantificar la contribución de los recursos naturales al crecimiento económico, y el papel de la tecnología para superar su escasez en un modelo de crecimiento endógeno. En investigaciones posteriores, Barbier (2004), se centra en el nexo agua-crecimiento económico, proporcionando un artículo seminal para esta discusión. Encontró que el uso del agua —un bien público, no excluible, sujeto a congestión— aumenta el crecimiento económico, pero se trata de una relación en forma de u invertida. En sus fases iniciales, el uso del agua tiende a estimular la economía, estresando los suministros de agua dulce, luego la escasez de agua requerirá más recursos (*output*) para su extracción, distribuyendo la producción sin criterios de eficiencia, lo que genera un impacto negativo, *ceteris paribus*. En síntesis, el crecimiento económico tiende a incrementarse con un bajo consumo de agua y, posteriormente, presenta una disminución a medida que dicho consumo alcanza niveles elevados.

Utilizando no solo medidas de utilización del agua (disponibilidad), sino también de calidad del agua (contaminación) y precipitación varios investigadores han probado el nexo agua-crecimiento económico (Barbier, 2015; Brown et al., 2013; El Khanji y Hudson, 2016; Khan et al., 2017; Russ et al., 2022; Sadoff et al., 2015). Sin embargo, en esta literatura aún escasa, los resultados no son concluyentes y altamente sensibles a las variables de control, la metodología y la muestra. Damania (2020), presenta una revisión concisa de esta literatura, destacando las dificultades metodológicas, entre ellas la causalidad inversa. Nótese que también está bien establecido que el PIB per cápita determina el uso del agua (Hao et al., 2019; Katz, 2015; Sebri,

2016; Zhao et al., 2017). Es decir, la ecuación de crecimiento económico *versus* la ecuación de utilización del agua, nos enfocamos en la primera, la segunda es una investigación de los mismos autores (Dávila-Sandoval et al., 2024)¹. Dicho esto, el objetivo principal de esta investigación es probar la relación entre la disponibilidad de agua, la contaminación y el crecimiento económico a nivel subnacional en México.

Orientamos nuestra investigación utilizando hallazgos recientes que indican que la debilidad de la evidencia del nexo entre el agua y el crecimiento económico se debe a la movilidad y agregación de factores en un espacio grande. Es decir, para capturar la heterogeneidad, es necesaria la desagregación espacial. Utilizando datos subnacionales a escala global (nivel de cuadrícula, que abarca 82 países), Damania et al. (2020) muestran que la agregación espacial de los datos sobre el crecimiento y el agua explica los resultados mixtos anteriores. Utilizando regresiones de panel de efectos fijos, sus hallazgos empíricos sugieren una relación positiva entre las precipitaciones y el crecimiento económico local (crecimiento PIB per cápita), que se vuelve insignificante a nivel nacional. Además, sus hallazgos respaldan la relación en forma de u invertida. Curiosamente, el nexo es más marcado en los países de bajos ingresos.

Barbier (2004), también señaló la necesidad de estudios que examinen las diferencias regionales en materia de agua y crecimiento dentro de un país. Sin embargo, hasta donde sabemos, no existen otros estudios que prueben la ecuación de crecimiento económico con el agua como

¹ El doctorado en Ciencias Empresariales de la Universidad Panamericana incitaba a los alumnos a colaborar en proyectos de investigación, lo que provocó que junto con la alumna Triga Alicia Dávila Sandoval y el Dr. Edgar Demetrio Tovar García se realizarán dos artículos durante los estudios de doctorado: El primero artículo correspondiente al tercer capítulo de esta tesis: Navarro-Guerrero, R., Dávila-Sandoval, T. A. y Tovar-García, E. D. (2025). El impacto de la disponibilidad y la contaminación del agua en el crecimiento económico a nivel subnacional: evidencia de México [The Impact of Water Availability and Pollution on Economic Growth at the Sub-National Level: Evidence from Mexico]. *Water Economics and Policy*. <https://doi.org/10.1142/S2382624X25400090>; el artículo segundo el que nos ocupa en este pie de página: Dávila-Sandoval, T. A., Navarro-Guerrero, R. y Tovar-García, E. D. (2024). Economic Growth's Impact on Water Use and Pollution in Mexican Regions. *Water, Air, and Soil Pollution*, 235(687), 1-15. <https://doi.org/10.1007/s11270-024-07489-4>.

insumo a nivel subnacional. En ese sentido, la investigación actual es un intento de replicar y extender (Damania et al., 2020). La investigación actual contribuye a esta literatura al estudiar un país emergente, usar otras medidas de agua y controlar las preocupaciones de endogeneidad (utilizando técnicas de panel dinámico).

El resto del presente capítulo se estructura de la siguiente manera: en la sección 3.2 se revisa la literatura sobre el papel del agua en el proceso de crecimiento económico, así como el contexto específico de México; en la sección 3.3 se presentan los datos y la metodología utilizados en este estudio de investigación; en la sección 3.4 se presentan la especificación empírica y métodos; en la sección 3.5 se comentan los principales resultados; en la sección 3.6 se discuten los principales hallazgos de nuestro estudio, y, finalmente, en la sección 3.7, el capítulo concluye con una reflexión sobre las contribuciones e implicaciones para la teoría y la práctica, y con la identificación de direcciones para futuras investigaciones.

3.2. Revisión de la literatura

3.2.1. El agua en México

México tiene cuatro características que son importantes para el estudio: 1) está conformado por 32 entidades federativas, lo que permite la desagregación espacial; 2) es un país en vías de desarrollo; 3) experimenta sequías cíclicas, con mayor frecuencia en el centro y norte del territorio, sin embargo, en los últimos años estas sequías se han intensificado, y 4) se logró construir una base de datos con la solidez necesaria, con fuentes oficiales y variables, tanto de utilización, como de calidad del agua.

En términos de producto interno bruto (PIB), México ocupa el segundo lugar entre las economías de América Latina y se sitúa como la decimoquinta economía a nivel global. Se

considera una economía en desarrollo, con una población de alrededor de 125 millones de habitantes, lo que lo convierte en el undécimo país más poblado del mundo. México es el quinto país más extenso del continente americano y el decimocuarto a nivel mundial, abarcando cerca de 2 millones de kilómetros cuadrados. Como se comentó, se conforma de 32 entidades federativas, que se dividen en 2,476 municipios. Baja California Sur es la entidad federativa con el menor número de municipios, con solo 5; mientras que Oaxaca cuenta con el mayor número, con 570. Sin embargo, desde el 2015, la sequía representa un fenómeno recurrente en México, con énfasis en las zonas áridas del centro y norte del país; asimismo, la severidad de las sequías ha ido en aumento, tanto en duración, como en intensidad. Dichos efectos se reflejan en el mediano y largo plazo, por ejemplo, el porcentaje de almacenamiento de agua en presas ha registrado una tendencia hacia la baja (Banco de México, 2022).

Según el Banco de México (2022), en 2018, el 7.0 % de los municipios de México, de 11 entidades federativas presentaron niveles de sequía en categoría emergencia²; para 2019, los municipios afectados por sequía en categoría de emergencia aumentaron al 18 % en 18 entidades; en julio de 2022, 19 entidades con al menos un municipio que se situaba en categoría de emergencia. Para la población en 2018, el 14.1 % de los habitantes de un municipio se encontraban en emergencia por la sequía; para 2019 y 2020 esta misma proporción se situó en 11.7 % y 44.6 %, respectivamente, lo que implicó en el 2021, cerca del 50 % de la población en algún municipio tuviera una disminución del 20% de agua. En julio de 2022, se estimó que el 15.1 % de la población del país enfrentaron problemas de escasez de agua. En lo que respecta al producto interno bruto (PIB) para el 2018, se consideró que el 22.1 % del PIB se encontraba en un municipio que contaba con algún grado de sequía y en 2021, este mismo concepto representó 31.1 %.

² La Comisión Nacional de Agua en México supervisa la situación de la sequía en cada municipio del país, clasificándolos en una escala de sequía anormalmente seca, moderada, severa, extrema o excepcional.

3.2.2. Crecimiento económico, disponibilidad y contaminación del agua a nivel subnacional

En el contexto mexicano, donde se observan marcadas diferencias en la disponibilidad y calidad del agua según la región, es importante entender la relación con el crecimiento económico, por lo que se realizará una revisión literaria de esta relación en tres vertientes: primero, la escasez de agua como limitante al crecimiento económico por disponibilidad (Barbier, 1999, 2005; Damania, 2020; El Khanji y Hudson, 2016); segundo, la contaminación como afecta a la escasez de agua (El Khanji y Hudson, 2016; Russ et al., 2022); por último, debido a la extensión territorial de México, que se divide en 32 entidades federativas, es una oportunidad para estudiar no solo el uso y calidad del agua como eslabón del crecimiento económico, sino también para entender la movilidad y agregación de factores en un espacio (Damania, 2020). De esta manera podemos responder al objetivo de esta investigación.

La teoría del crecimiento económico es un campo de estudio en economía que se centra en comprender los factores que impulsan el aumento sostenido del PIB de una economía a lo largo del tiempo. Esta área examina cómo se generan, acumulan y distribuyen los recursos productivos, como el capital físico y humano, la tecnología y los recursos naturales, para promover el desarrollo económico de largo plazo; por eso es importante partir de la teoría neoclásica, que postula que el crecimiento económico depende de los factores de producción y la tecnología, considerando la tierra como una constante, lo que la excluye del análisis de la contabilidad del crecimiento (Solow, 1956). El debate en economía sobre la importancia de la innovación (cambio tecnológico) en el crecimiento económico ha impulsado estudios empíricos, con el fin de analizar los factores que influyen en el crecimiento económico de largo plazo. Romer (1994), a través de su teoría del crecimiento endógeno, cambió el enfoque de la economía del crecimiento al poner la innovación y el cambio tecnológico como factores endógenos, es decir, que surgen dentro del propio sistema

económico, a diferencia de las teorías anteriores que consideraban la tecnología como un factor externo e independiente. Si bien, Barro (1999), destaca el papel de los factores macroeconómicos e institucionales, enfatiza que el crecimiento económico de largo plazo está influenciado no solo por el capital físico y los recursos humanos, sino también por el entorno institucional y las políticas públicas que inciden en la inversión, el ahorro y la innovación.

La literatura sobre crecimiento económico ha prestado atención a la contribución de los recursos naturales al crecimiento (Barbier, 1999; Barro, 1999; Romer, 1994; Solow, 1956). Es un hecho que los recursos naturales, en particular el agua, han adquirido gran relevancia; Barbier (1999), señala la importancia de cuantificar la contribución de los recursos naturales al crecimiento económico, siendo una importante implicación política que las economías de bajos ingresos que dependen de recursos naturales pueden eludir limitaciones de recursos si disminuyen su uso a largo plazo y fomentan el desarrollo del capital humano enfocado en la innovación tecnológica, este último comentario puede ser muy importante para el caso de México.

Como ya se comentó, para nuestra investigación, es importante la pregunta planteada por Barbier (2004): ¿Puede el aumento de la escasez de agua imponer restricciones al crecimiento de los países? El mismo Barbier (2015), comenta que los países con abundantes recursos hídricos en relación con sus extracciones tienden a experimentar una disminución del crecimiento económico cuando aumentan el uso de agua. Sin embargo, este crecimiento puede repuntar a medida que aumentan las tasas de uso de agua en relación con los suministros de agua dulce. La principal razón de este impacto negativo inicial es la ineficiencia de las políticas e instituciones responsables de la gestión del agua. En resumen, cualquier mejora en la productividad económica derivada del mayor uso del agua parece verse contrarrestada por el aumento de los costos ambientales y sociales, en especial cuando los países invierten más en infraestructura e instituciones para garantizar una mayor disponibilidad de agua.

Otros autores estudian el crecimiento económico en relación con el cambio climático y sus efectos sobre la escasez de agua, Brown et al. (2013) analizan los efectos del crecimiento económico en relación con las tendencias de las precipitaciones en las naciones africanas en comparación con otros países en desarrollo, mostrando que las precipitaciones han sido un factor determinante para el crecimiento económico en África, pero no en otros países en desarrollo. Brown et al. (2013) utilizan estadísticas de precipitaciones, temperaturas y extremos de precipitaciones (sequías e inundaciones) como variables explicativas del crecimiento económico a lo largo de varias décadas en diferentes países; se evidenció que los riesgos hidroclimáticos constituyen un factor determinante en el desempeño económico de múltiples países, siendo la variabilidad de las precipitaciones el efecto más significativo.

Por otro lado, la urbanización y la industrialización están poniendo una gran presión sobre los recursos hídricos, no solo a través del uso, sino también a través de la contaminación que estos fenómenos ejercen sobre el recurso hídrico. El crecimiento económico eleva la demanda de agua y, si no se gestiona bien, puede aumentar su contaminación. El Khanji y Hudson (2016), utilizan la demanda biológica de oxígeno como un indicador de la calidad del agua, puesto que se emplea con frecuencia en estudios relacionados con la contaminación hídrica, dicho estudio abarca 177 países entre 1960 y 2009, revela que el uso del agua influye en el crecimiento económico siguiendo una curva en forma de u invertida. Además, se destaca que la calidad del agua tiene un impacto aún más relevante en dicho crecimiento, lo que sugiere que el aumento de la contaminación hídrica podría ser un factor adicional por el cual la escasez de recursos hídricos disponibles afecta negativamente al crecimiento económico. Russ et al. (2022) analizaron el impacto de la contaminación de los ríos en el crecimiento económico de 17 naciones durante un periodo de 24 años, de 1990 a 2014, centrándose en las cuencas hidrográficas. Sus hallazgos revelan una

correlación negativa entre la destrucción de la calidad del agua y el desarrollo económico regional, con disminuciones del crecimiento que van desde el 1.4 % al 2.5 %.

Finalmente, es una oportunidad para estudiar, en el caso de México, no solo el uso y calidad del agua que se vincula con el crecimiento económico, sino también entender este mismo vínculo en relación con la movilidad y agregación de factores en un espacio. Damania et al. (2020) demostraron que la variabilidad de la lluvia influye en el crecimiento económico a nivel subnacional, tanto en países desarrollados como en desarrollo entre 1991 y 2014. Este efecto destaca en los países en desarrollo, debido a la influencia de la lluvia en la agricultura. Sin embargo, al analizar datos a escalas espaciales más amplias, la importancia de este impacto disminuye hasta desaparecer. En contraste, la influencia de la temperatura en el crecimiento económico se observa tanto a nivel subnacional como nacional. Los autores atribuyen estos resultados a la alta variabilidad espacial de la lluvia y la disponibilidad de agua en comparación con la temperatura al interior de los países, lo que provoca que los impactos globales en el PIB a nivel nacional se compensen debido a los diferentes patrones de lluvia y estrés hídrico entre regiones. Mientras que El Khanji y Hudson (2016), examinaron la relación entre la variabilidad climática del agua (precipitación, escorrentía superficial y temperatura) y el crecimiento económico en 502 unidades hidrográficas a nivel nacional durante el periodo de 1991 a 2012. Sus hallazgos sugieren que estas variables climáticas ejercen una influencia significativa en el desempeño económico regional.

En un estudio reciente, Barbier (2024), indica que la relación entre el estrés hídrico y el crecimiento económico es compleja y aún no se ha establecido de manera concluyente. Sin embargo, los estudios sugieren que el estrés hídrico a nivel de cuenca y subnacional puede tener un impacto negativo en el crecimiento económico. Desvincular el crecimiento económico del consumo de agua requerirá reformas significativas en la gestión del agua. Dos reformas clave son

la eliminación de los subsidios excesivos para el riego y la reasignación de subsidios para mejorar el suministro de agua potable y el saneamiento, en particular en los países en desarrollo.

3.3. Datos y metodología

Los datos se toman de diferentes fuentes, para los 32 estados de la República mexicana de 2005 a 2020. Las variables de agua se toman de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), y esta fue una tarea agotadora que permitió la construcción de una base de datos única, lo cual es una de las fortalezas de este trabajo, debido a que esta información no se encontraba accesible en el ámbito estatal. Las variables macroeconómicas se toman del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). Nos centramos en el PIB per cápita y su tasa de crecimiento, utilizando la población, tomada del Consejo Nacional de Población (CONAPO), para las estimaciones per cápita. Las variables institucionales (corrupción y participación ciudadana) se toman del Instituto Mexicano para la Competitividad (IMCO). La tabla 7 presenta la definición de las principales variables utilizadas en este estudio.

Tabla 7*Definición de variables*

Variable	Definición	Fuente
PIB per cápita	Relación entre el PIB y la población, por entidad federativa (estado), millones de pesos mexicanos, base 2013.	INEGI
Rho (ρ)	Porcentaje de agua utilizada en usos consuntivos respecto del agua renovable. Es un indicador del grado de presión que se ejerce sobre los recursos hídricos de un país, cuenca o región.	CONAGUA
Calidad del agua DBO_Bueno / DBO_Malo	La demanda biológica de oxígeno (DBO) de 5 días mide la materia orgánica biodegradable. Es una medida de la condición del agua en relación con los requerimientos de una o más especies bióticas o con cualquier necesidad o propósito humano. La CONAGUA la reporta como un porcentaje en cinco categorías (muy contaminada, contaminada, aceptable, buena y excelente). DBO_Bueno = aceptable + buena + excelente. DBO_Malo = muy contaminada + contaminada.	CONAGUA
Participación del PIB	Participación de la entidad federativa (estado) en el PIB del país, base 2013.	INEGI
Coeficiente de Gini	Es una medida de concentración del ingreso. Toma valores entre cero y uno; cuando el valor es cercano a uno, indica que hay una mayor concentración del ingreso.	INEGI
Participación ciudadana	El porcentaje de votos emitidos sobre la lista nominal. Mide la intensidad con la que los ciudadanos del estado participan en las elecciones para gobernador del estado.	OMI
Corrupción	Porcentaje de la población urbana de 18 años y más que considera que las prácticas corruptas en el gobierno estatal son frecuentes y muy frecuentes.	OMI
Población	Población total por entidad federativa con base en años censales (1990 a 2020) y pronósticos anuales del CONAPO.	CONAPO/ INEGI

Nota. CONAGUA, INEGI, CONAPO e IMCO.

No hay suficientes datos de panel históricos y a nivel subnacional sobre las precipitaciones, como en Damania et al. (2020), pero siguiendo a Barbier (2004) y El Khanji y Hudson (2016), medimos la disponibilidad de agua (Rho o ρ) —un indicador del estrés y la escasez de agua—

como la relación entre las extracciones de agua y los recursos hídricos renovables, anualmente en términos per cápita (esta variable también se conoce como uso del agua o demanda relativa de agua). Nótese que utilizamos recursos hídricos renovables, es decir, fuentes de agua naturales que se reponen a través del ciclo hidrológico, como la precipitación (lluvia, nieve, aguanieve, granizo), la escorrentía (agua superficial que fluye hacia arroyos, ríos y lagos), la recarga de aguas subterráneas (agua que se filtra en el suelo y recarga los acuíferos). En contraste, otros estudios utilizan recursos hídricos, refiriéndose a la cantidad total de agua disponible para su uso en una región en particular (carecemos de esta medida). Como tal, las fuentes de agua renovables se reponen naturalmente, mientras que los recursos hídricos incluyen fuentes renovables y no renovables. En otras palabras, todas las fuentes de agua renovables son recursos hídricos, pero no todos los recursos hídricos son renovables.

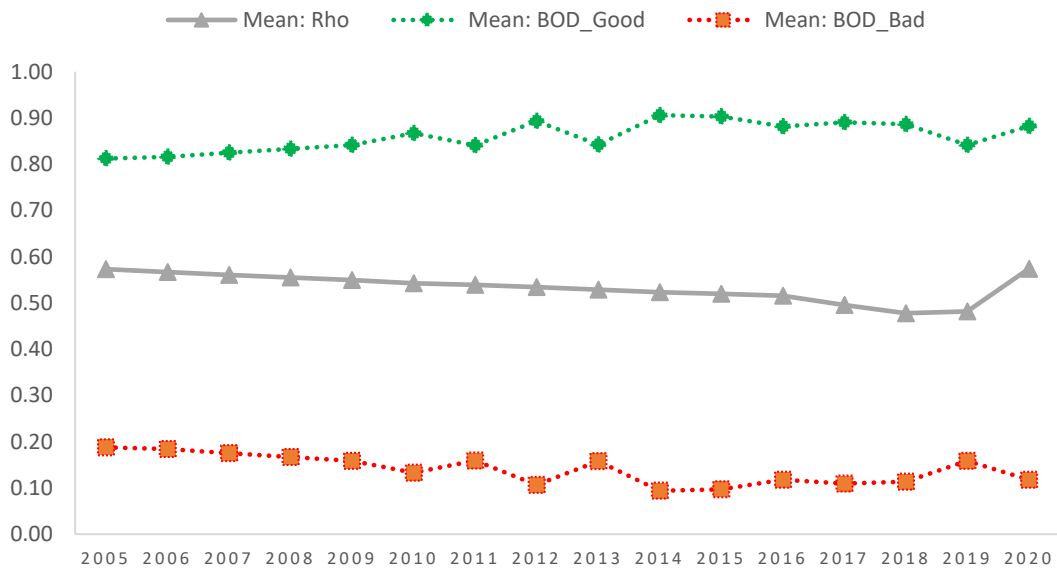
Además, para medir la contaminación del agua (también conocida como calidad del agua), utilizamos la demanda biológica (o bioquímica) de oxígeno (DBO) de cinco días que mide la materia orgánica biodegradable. Nótese que la DBO se considera un “contaminante paraguas” porque es un proxy de muchos parámetros diferentes de calidad del agua e indica la salud ambiental general de los cuerpos de agua (Russ et al., 2022). Inicialmente, la variable DBO se distribuyó en 7,500 puntos de monitoreo de calidad del agua en México dentro de 13 regiones hidrológicas (un marco administrativo utilizado por el gobierno mexicano para la gestión del agua). Para abordar esto, se automatizó la georreferenciación de cada punto, asignándolos a las 13 regiones dentro de cada uno de los 32 estados. Esto permitió estimar el porcentaje de contaminación (calidad) del agua por entidad federativa. En consecuencia, la DBO se informa como un porcentaje en cinco categorías: altamente contaminada, contaminada, aceptable, buena y excelente. A menudo, no hay observaciones en la categoría más baja (altamente contaminada, 0 %) o en la categoría más alta (excelente, 0 %), y algunos casos muestran una concentración del 100 % en la categoría “buena”.

Dada la falta de heterogeneidad en la categorización de los datos de DBO, es lógico analizar esta variable en un contexto dicotómico. Utilizamos dos categorías DBO_Bueno (aceptable, buena y excelente) y DBO_Malo (altamente contaminada y contaminada). Sin embargo, tenga en cuenta que no se trata de una variable discreta; es un porcentaje: el porcentaje de agua buena (o mala) como porcentaje del agua total. Como tal, el porcentaje de agua buena más el porcentaje de agua mala es igual al 100 %. En el análisis empírico, la DBO a veces se presenta como una proporción en lugar de como un porcentaje.

La figura 1 muestra la tendencia de Rho y DBO de 2005 a 2020. La disponibilidad de agua (ρ) muestra una tendencia decreciente suave, desde valores de 0.57 en 2005 hasta 0.47 en 2018, seguida de un fuerte repunte, hasta llegar a 0.57 en 2020. Esto coincide con el inicio de los años más severos de estrés y escasez de agua (ver sección anterior). La falta de agua representa un desafío creciente en todo México. No obstante, es claro que algunas zonas han experimentado problemas de disponibilidad de agua por varios decenios, especialmente en la región Norte, que se caracteriza por su aridez, y en el Centro del país, sobre todo en la Ciudad de México. Además, la contaminación del agua ha ido disminuyendo de forma leve pero sostenida a lo largo de los años en estudio. En promedio, el porcentaje de agua buena (DBO_Bueno) aumenta de 81 % en 2005 a 88 % en 2020, o el porcentaje de agua mala (DBO_Malo) disminuye de 19 % a 12 %. Nuevamente, la situación varía al considerar a los estados por separado, siendo las regiones centrales de México las que tienen el agua más contaminada, aunque con tendencias positivas. Además, cabe señalar que la disponibilidad de agua y la contaminación no se mueven en la misma dirección. La disponibilidad de agua mostró un efecto rebote, mientras que la calidad del agua ha ido mejorando.

Gráfica 1

Rho (ρ), DBO_Bueno y DBO_Malo. promedio, 32 estados de la República, de 2005 a 2020



Nota. CONAGUA.

En la tabla 8 se muestran estadísticas descriptivas básicas y las figuras 1 a 4 proporcionan una forma práctica de visualizar las variables clave en la geografía de México. En promedio, durante el periodo de análisis, la tasa de crecimiento del PIB per cápita es de 5 %, y el PIB per cápita medio es de \$ 160,000 pesos mexicanos, que son aproximadamente USD 8,000 dólares asumiendo un tipo de cambio de USD 1 dólar = \$ 20 pesos (en 2023, el PIB per cápita real de México fue de alrededor de USD 10,327 dólares, según los Indicadores de Desarrollo Mundial del Banco Mundial). El coeficiente de correlación entre Rho y DBO_Good es de -0.23, lo que apoya el hallazgo antes mencionado de que estas variables se mueven en direcciones opuestas. Además, los coeficientes de correlación de Pearson y la exploración gráfica de las variables de interés no sugieren una relación significativa entre el agua y las tasas de crecimiento del PIB (gráficas 2 y 3). Por el contrario, parece que existe una relación positiva y significativa entre el agua y el PIB per cápita (gráficas 4 y 5). En otras palabras, el agua es relevante para explicar los niveles de ingresos,

pero parece ser irrelevante para explicar sus cambios. Estos hallazgos son robustos al uso de tasas de crecimiento o primeras diferencias de ρ y DBO. En la siguiente sección, proporcionamos más evidencia de estos patrones.

Tabla 8

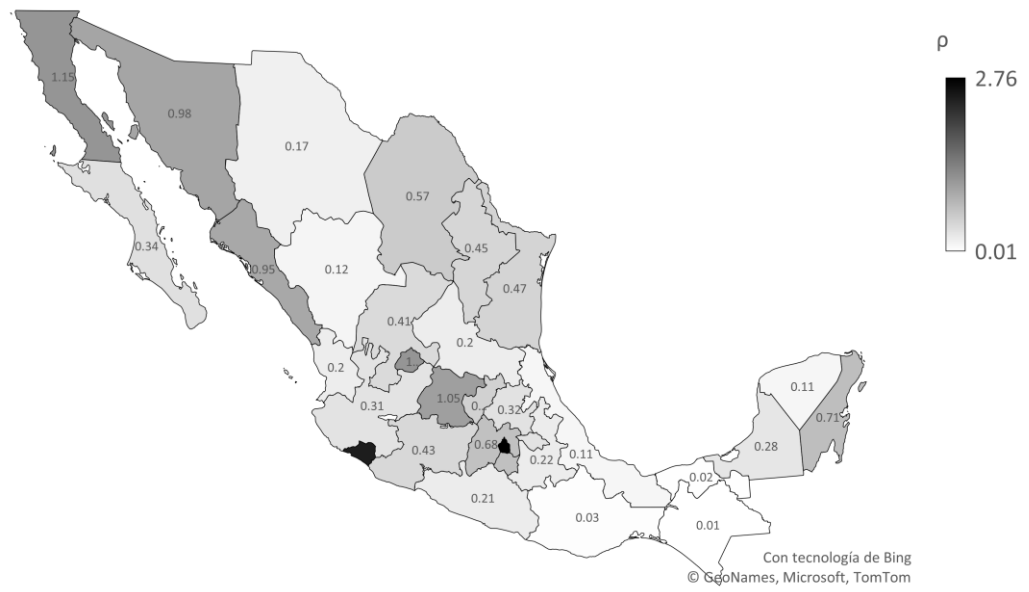
Estadísticas descriptivas

Variable	Obser.	Media	Desv. estándar	Mín.	Máx.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
PIB per cápita (1)	512	0.16	0.13	0.04	0.97	1										
Tasa de crec. del PIB per cápita (2)	480	0.05	0.08	-0.38	0.25	-0.09	1									
Rho (3)	512	0.53	0.48	0.00	2.99	0.12	0.01	1								
DBO_Bueno (4)	512	0.86	0.21	0	1	0.12	-0.02	-0.23	1							
DBO_Malo (5)	512	0.14	0.21	0	1	-0.12	0.02	0.23	-1	1						
Participación del PIB (6)	512	0.03	0.03	0.01	0.18	0.32	0.00	0.50	-0.33	0.33	1					
Coefficiente de Gini (7)	416	0.47	0.04	0.37	0.58	0.05	0.07	-0.07	0.20	-0.20	0.11	1				
Participación ciudadana (8)	512	0.56	0.08	0.30	0.78	0.19	-0.07	-0.04	-0.003	0.003	0.12	0.04	1			
Corrupción (9)	512	0.84	0.07	0.65	0.96	-0.06	-0.01	0.16	-0.002	0.002	0.25	-0.12	-0.06	1		
Población (10)	512	3600518	3011542	512170	17000000	-0.12	0.01	0.12	-0.38	0.38	0.70	0.00	-0.10	0.36	1	
Tasa de crec. de la población (11)	512	0.02	0.01	0.00	0.05	-0.03	0.00	-0.10	0.05	-0.05	-0.28	0.00	-0.15	-0.42	-0.31	1

Nota. Un millón de pesos mexicanos (precios constantes 2013). Cálculos de los autores con datos de CONAGUA, INEGI, CONAPO e IMCO.

Figura 1

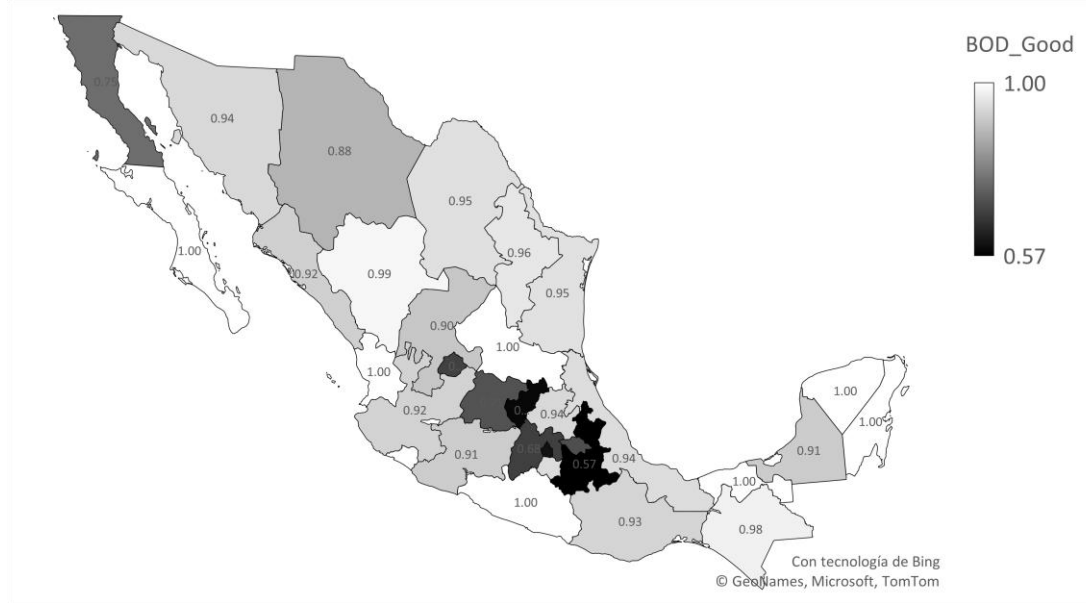
Relación entre las extracciones de agua y los recursos hídricos renovables (ρ) de 32 estados mexicanos en 2020



Nota. CONAGUA.

Figura 2

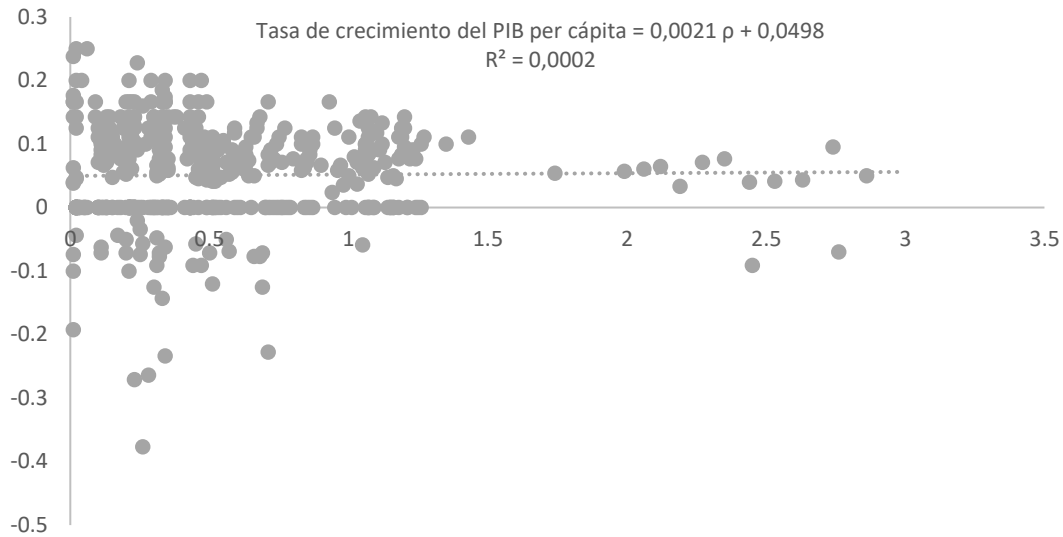
Demanda biológica de oxígeno (DBO_Buena) de 32 estados de la República mexicana en 2020



Nota. CONAGUA.

Gráfica 2

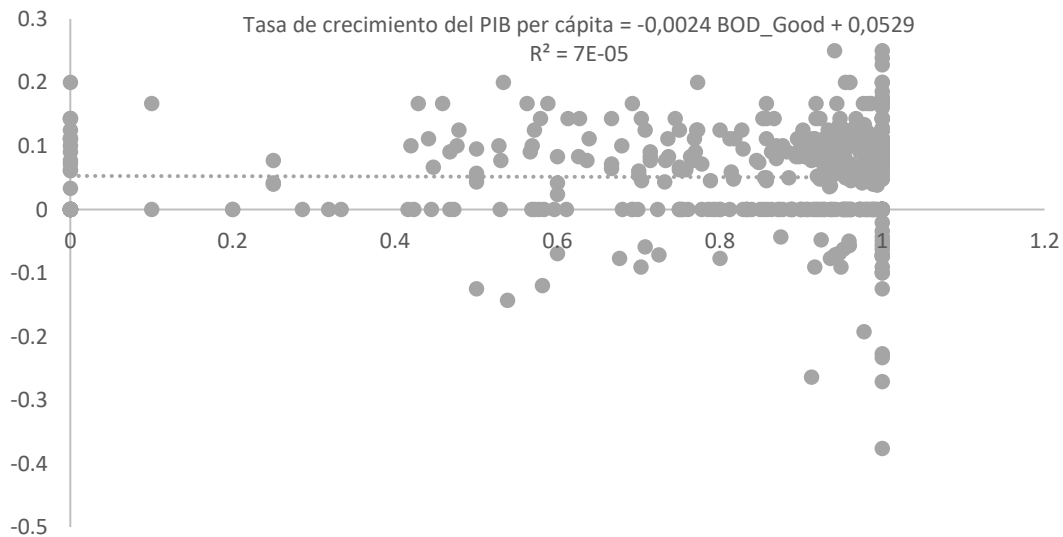
Dispersión de la tasa de crecimiento del PIB per cápita y ρ de 32 estados mexicanos de 2005 a 2020



Nota. INEGI y CONAGUA.

Gráfica 3

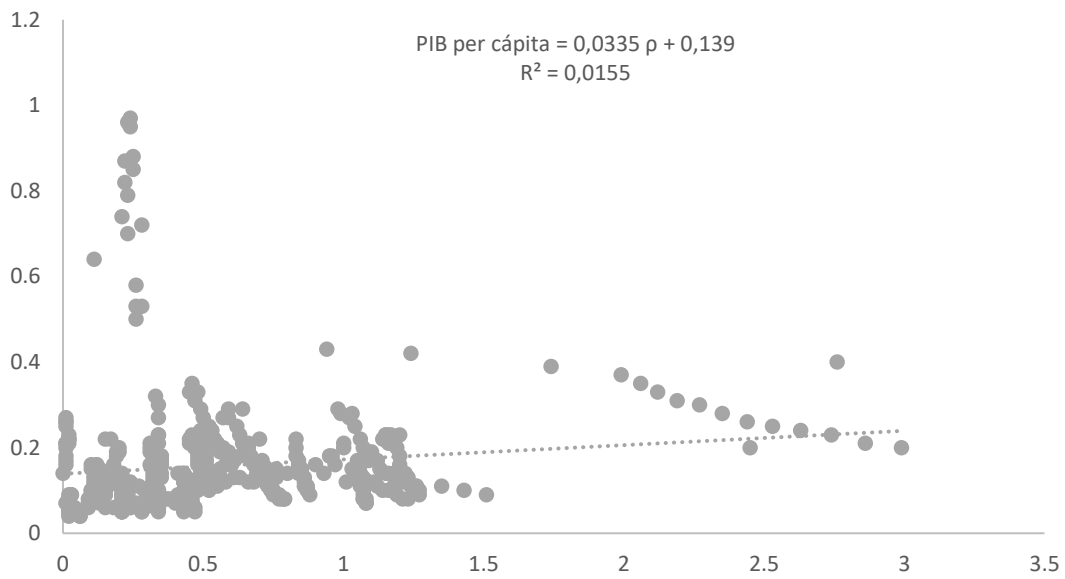
Dispersión de la tasa de crecimiento del PIB per cápita y de la DBO_Bueno de 32 estados mexicanos de 2005 a 2020



Nota. INEGI y CONAGUA.

Gráfica 4

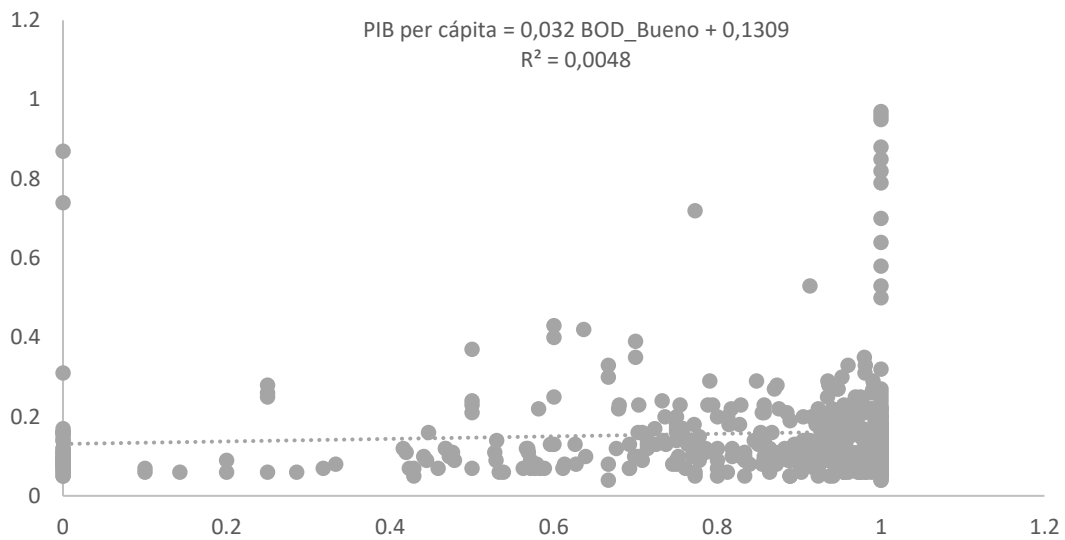
Dispersión del PIB per cápita y ρ de 32 estados mexicanos de 2005 a 2020



Nota. INEGI y CONAGUA.

Gráfica 5

Dispersión del PIB per cápita y DBO_Bueno de 32 estados mexicanos de 2005 a 2020



Nota. INEGI y CONAGUA.

3.4. Especificación empírica y método

Siguiendo estudios empíricos previos (Barbier, 1999, 2004; Damania et al., 2020; El Khanji y Hudson, 2016), nuestra ecuación principal es (1):

$$GDP_{it} = \beta_0 + \beta_1\rho_{it} + \beta_2\rho_{it}^2 + \beta_3BOD_{it} + \beta_4BOD_{it}^2 + \beta_5X_{it} + u_{it} \quad (1)$$

Donde u es el término de error de ruido blanco de la regresión, para el estado i y el periodo t . La variable dependiente es el PIB per cápita o su tasa de crecimiento. Nótese la inclusión del cuadrado de ρ y DBO, para probar el efecto no lineal del agua y la forma de u invertida esperada.

Varios estudios previos utilizaron modelos de forma reducida sin variables de control (Hao et al., 2019; Katz, 2015). En cambio, aquí X incluye la participación del Estado en el PIB del país (GDP_share), la desigualdad (coeficiente de Gini), la corrupción y la participación ciudadana (las dos últimas son variables proxy del entorno institucional, que pueden afectar el proceso de crecimiento económico). Nótese que estas variables de control son utilizadas con frecuencia en la literatura empírica sobre crecimiento económico. Sin embargo, no se incluyen otras variables independientes relevantes, como el capital humano, el número de empresas y las participaciones de la agricultura, la manufactura o los servicios en el PIB. Esta omisión se debe a la disponibilidad de datos y a un alto número de observaciones faltantes —una preocupación importante a nivel subnacional— que obstruyen la construcción de un conjunto de datos de panel robusto a lo largo de los años en estudio.

Por lo tanto, priorizamos una serie de tiempo grande en nuestro conjunto de datos de panel (un requisito para probar las curvas de Kuznets), asumiendo que las variables de control omitidas son invariantes en el tiempo o cambian lentamente. Como tal, las técnicas econométricas de panel

ayudan a controlar estas variables omitidas. Por ejemplo, en la nueva teoría económica institucional, este supuesto es aceptable con respecto a las reglas informales (costumbres, hábitos, normas sociales, cultura y factores históricos), que pueden tardar siglos en cambiar. Asimismo, las reglas formales (leyes y regulaciones) cambian más rápidamente, pero su aplicación lleva tiempo. De manera similar, se espera que las participaciones de los principales sectores económicos en la actividad económica total a nivel estatal cambien lentamente. En otras palabras, se espera que la importancia general de la agricultura como actividad económica se mantenga estable a nivel estatal, incluso cuando cambie la producción agrícola. Lo mismo puede decirse de la manufactura y los servicios. Por ejemplo, la manufactura ha sido significativa en el estado de Nuevo León en el pasado reciente y en el presente, mientras que la agricultura sigue siendo significativa en Sinaloa, y así sucesivamente. Así, es bien sabido que la agricultura es un importante consumidor de agua, y es conveniente saber cuánta agua consume cada sector económico. Esta es una limitación de la investigación actual; no obstante, los datos de panel pueden ayudar a controlar estas cuestiones, suponiendo que la relevancia de cada sector económico cambia lentamente a nivel estatal.

Para evitar el análisis de relaciones espurias y evidencia estadística engañosa de una relación lineal —específicamente, el análisis de variables dependientes e independientes no estacionarias— primero exploramos pruebas de raíz unitaria de panel de primera generación, asumiendo independencia transversal (Maddala y Wu, 1999), así como de segunda generación asumiendo dependencia transversal (Pesaran, 2007). Como se esperaba, las pruebas indican que el PIB per cápita y la participación en el PIB no son estacionarios. En el caso de Gini, corrupción y participación ciudadana, las pruebas presentan resultados mixtos. Por el contrario, las pruebas indican que los paneles son estacionarios en el caso de ρ , DBO y crecimiento del PIB per cápita.

Estos resultados no respaldan por completo el uso del análisis de cointegración para examinar la relación a largo plazo entre el agua y el crecimiento económico, ya que todas las series

deben ser no estacionarias en los niveles $I(0)$ y estacionarias en las primeras diferencias $I(1)$. Sin embargo, para fines de exploración, calculamos las siete estadísticas de prueba de Pedroni para determinar si las variables están cointegradas (Neal, 2014; Pedroni, 1999, 2004). Cuatro de los siete estadísticos sugieren que las variables de interés presentan cointegración. Sin embargo, debemos reconocer que estos resultados indican la necesidad de otro enfoque, y los resultados, por ejemplo, del Panel Dynamic Ordinary Least Squares (PDOLS, por sus siglas en inglés) de Pedroni deben tomarse con cautela. No obstante, vale la pena mencionar que DBO presenta coeficientes significativos con el signo esperado (no se informa en las tablas).

Además, es importante abordar las preocupaciones de endogeneidad, en particular la causalidad inversa entre el agua y el crecimiento económico. Esta cuestión es una preocupación importante no solo en la literatura sobre ecuaciones de utilización del agua, sino también en la literatura empírica más amplia sobre el crecimiento económico. En nuestro caso, el uso de variables instrumentales (la estrategia tradicional) es bastante desafiante a nivel subnacional debido a la disponibilidad de datos. Las ecuaciones simultáneas se han utilizado antes en modelos básicos para el crecimiento económico y las ecuaciones de utilización del agua (Hao et al., 2019). Sin embargo, esta estrategia no puede abordar las preocupaciones de endogeneidad con otras variables independientes en la ecuación (1). Además, también es posible argumentar que el PIB presenta características autorregresivas, es decir, el pasado del PIB podría ser un buen predictor del PIB actual.

Dadas estas preocupaciones, la literatura econométrica sugiere el uso del método generalizado de momentos para estimar modelos dinámicos con datos de panel. Explícitamente, utilizamos el estimador SYS GMM (Blundell y Bond, 1998) para permitir la inclusión de variables invariantes en el tiempo (dummies de estado o año). El SYS GMM incluye rezagos de la variable dependiente como regresores y utiliza rezagos y primeras diferencias de las variables

independientes como instrumentos, controlando las preocupaciones de endogeneidad y la heterogeneidad individual no observada. Es un sistema de dos ecuaciones, la ecuación (1) es la primera ecuación en niveles, y las primeras diferencias de la ecuación (1) proporcionan la segunda ecuación del sistema. Las diferencias rezagadas del PIB se utilizan como instrumentos para la ecuación de niveles y los niveles rezagados de las variables independientes se utilizan como instrumentos para la ecuación de diferencias.

Nos ocupamos del problema de que demasiados instrumentos seleccionan automáticamente el número óptimo de rezagos como instrumentos (Roodman, 2009). Las pruebas de Hansen y Sargan se utilizan para validar los instrumentos internos (bajo la hipótesis nula de que los instrumentos son exógenos como grupo). Además, se realizan las pruebas de correlación serial de Arellano-Bond para verificar la falta de autocorrelación de segundo orden, que es necesaria para garantizar la eficiencia y la consistencia.

Por lo tanto, el estimador principal es el SYS GMM de dos pasos con error estándar robusto (errores estándar corregidos por Windmeijer). Nótese que el SYS GMM proporciona coeficientes de corto plazo. Dividiendo el coeficiente de corto plazo por 1 menos el coeficiente de las variables dependientes rezagadas se obtienen los coeficientes de largo plazo.

3.5. Resultados

En la siguiente tabla se resumen los principales resultados de la regresión utilizando el crecimiento del PIB per cápita como variable dependiente. En general, el nexo entre las variables del agua y las tasas de crecimiento no es sólido (lo que concuerda con el análisis correlacional y gráfico inicial). Sin embargo, en un par de especificaciones, ρ es positivo y ρ^2 es negativo, como se había planteado en la hipótesis. Un aumento de un punto en ρ eleva el crecimiento del PIB en 0.05; sin embargo, hay un punto de inflexión cuando ρ es igual a 1.06, más allá del cual la relación se vuelve negativa.

No obstante, todas estas estimaciones e interpretaciones deben tomarse con cautela dada la falta de significancia y solidez.

Tabla 9

Resultados de la regresión (tasa de crecimiento del PIB per cápita)

	1	2	3	4	5	6
Tasa de crecimiento del PIB per cápita $t-1$	0.05	-0.11 **	0.05	-0.11**	0.11*	0.11
Rho	0.05***	-0.07	0.05***	-0.07	-0.32	-0.32
Rho al cuadrado	-0.03 **	0.02	-0.03**	0.02	0.14*	0.14
DBO_Bueno	-0.002	0.14			0.52	
DBO_Bueno al cuadrado	-0.01	-0.01			-0.68	
DBO_Malo			0.02	-0.12		0.83*
DBO_Malo al cuadrado			-0.01	-0.01		-0.68
Participación del PIB	0.01	0.95	0.01	0.95	-4.01	-4.01
Coefficiente de Gini	0.20**	-2.05	0.20 **	-2.05	1.42	1.42***
Participación ciudadana	0.01	-0.03	0.01	-0.03	3.41***	3.41***
Corrupción	0.07	-0.01	0.07	-0.01	-0.55	-0.55**
Constante	-0.13	0.97*	-0.14	1.10	-1.65	-1.82***
Punto de inflexión rho	1.06	1.52	1.06	1.52	1.11	1.11
Punto de inflexión DBO	-0.11	7.41	1.11	-6.41	0.39	0.61
Dummies de año	No	Sí	No	Sí	No	No
Dummies para estado	No	No	No	No	Sí	Sí
Observaciones	416	416	416	416	416	416
N x T	32x13	32x13	32x13	32x13	32x13	32x13
Prueba de Sargan (valor p)	69.20 (0.00)	14.95 (0.31)	69.20 (0.00)	14.95 (0.31)	67.70 (0.00)	67.70 (0.00)
Prueba de Hansen (valor p)	27.76 (0.01)	6.27 (0.93)	27.76 (0.01)	6.27 (0.93)	3.93 (0.99)	3.93 (0.99)
Serie de primer orden prueba de correlación (valor p)	-3.33 (0.00)	-4.06 (0.00)	-3.33 (0.00)	-4.06 (0.00)	-2.81 (0.00)	-2.51 (0.01)
Serie de segundo orden prueba de correlación (valor p)	0.27 (0.79)	-2.12 (0.03)	0.27 (0.78)	-2.12 (0.03)	-1.34 (0.18)	-1.18 (0.24)

Nota. Punto de inflexión = $-b / 2a$ (b es el coeficiente de X; a es el coeficiente de X^2). Para probar el efecto no lineal del agua y la forma de U invertida esperada, los cuadrados de ρ y DBO se incluyen en las regresiones. Estimador SYS GMM de dos pasos, utilizando errores estándar corregidos por Windmeijer. (*) [**] y [***] indican significancia estadística en los niveles (10 %) [5 %] y {1 %}. Elaboración propia.

La evidencia es más favorable a una relación entre las variables del agua y los niveles de PIB per cápita, como se reporta en la tabla 10, lo cual se alinea con el análisis correlacional y gráfico inicial. ρ y ρ^2 presentan los signos esperados y son estadísticamente significativos en la mayoría de las regresiones (excluyendo regresiones con variables ficticias de estado). Un incremento de un punto en ρ incrementa el PIB per cápita en 0.03 a 0.07 (millones de pesos mexicanos), en una relación en forma de u invertida (punto de inflexión de ρ entre 1.12 y 1.26). Por su parte, la DBO presenta resultados mixtos, con unos pocos coeficientes significativos. Se puede decir que los incrementos en la contaminación del agua incrementan el PIB per cápita, con un punto de inflexión (una relación en forma de U utilizando DBO_Malo). Sin embargo, la evidencia es débil, y estos resultados deben tomarse con cautela.

Además, hay más variables de control con coeficientes significativos en relación con el PIB per cápita en niveles como variable dependiente. En particular, la participación del estado en el PIB muestra coeficientes positivos y significativos en todas las regresiones.

Tabla 10*Resultados de la regresión (PIB per cápita)*

	1	2	3	4	5	6
PIB per cápita $t-1$	0.37***	0.69***	0.37***	0.69***	0.34*	0.34*
Rho	0.07**	0.03*	0.07**	0.03	-0.02	-0.02
Rho al cuadrado	-0.03**	-0.01**	-0.03**	-0.01**	-0.01	-0.01
DBO_Bueno	-0.01	-0.06**			0.23*	
DBO_Bueno al cuadrado	0.08	0.08***			-0.19*	
DBO_Malo			-0.15	-0.10***		0.15*
DBO_Malo al cuadrado			0.08	0.08***		-0.19*
Participación del PIB	1.29***	0.65***	1.29***	0.65***	5.07**	5.07**
Coefficiente de Gini	-0.16	0.10*	-0.16	0.10*	-0.16	-0.16
Participación ciudadana	0.12	-0.02	0.12	-0.02	0.33*	0.33*
Corrupción	-0.17	-0.20***	-0.17	-0.18***	0.20*	0.20*
Constante	0.13	-0.18***	0.20*	0.17***	-0.28	-0.28
Punto de inflexión rho	1.12	1.26	1.12	1.26	-0.84	-0.84
Punto de inflexión DBO	0.04	0.38	0.96	0.62	0.60	0.40
Dummies de año	No	Sí	No	Sí	No	No
Dummies para estado	No	No	No	No	Sí	Sí
Observaciones	416	416	416	416	416	416
N x T	32x13	32x13	32x13	32x13	32x13	32x13
Prueba de Sargan (valor p)	272.03 (0.00)	353.38 (0.00)	272.03 (0.00)	353.38 (0.00)	302.71 (0.00)	302.71 (0.00)
Prueba de Hansen (valor p)	21.69 (0.08)	19.76 (0.14)	21.69 (0.08)	19.76 (0.14)	6.96 (0.93)	6.96 (0.93)
Serie de primer orden prueba de correlación (valor p)	-1.05 (0.29)	-1.06 (0.29)	-1.05 (0.29)	-1.06 (0.29)	-1.40 (0.16)	-1.41 (0.16)
Serie de segundo orden prueba de correlación (valor p)	-0.93 (0.35)	-1.07 (0.28)	-0.93 (0.35)	-1.07 (0.28)	-1.43 (0.15)	-1.43 (0.15)

Nota. Punto de inflexión = $-b / 2a$ (b es el coeficiente de X ; a es el coeficiente de X^2 . Para probar el efecto no lineal del agua y la forma de u invertida esperada, los cuadrados de ρ y DBO se incluyen en las regresiones. Estimador SYS GMM de dos pasos, utilizando errores estándar corregidos por Windmeijer. (*) [**] y {***} indican significancia estadística en los niveles (10 %) [5 %] y {1 %}. Elaboración propia.

Para controlar la autocorrelación espacial, se incluyen variables ficticias de estado en una primera etapa (ver columnas 5 y 6 en las tablas 3 y 4). Sin embargo, estos resultados de regresión deben tomarse con precaución porque 25 de los 32 estados se omiten (eliminan) debido a problemas de colinealidad. Esto también significa que otras variables independientes ya reflejaban efectos espaciales. En una segunda etapa, se exploran modelos de datos de panel espaciales utilizando una matriz de ponderación espacial basada en la contigüidad de la reina (Belotti et al., 2017). Debido a las observaciones faltantes, solo se puede estimar una forma reducida de los modelos con variables de agua. Estos resultados son mixtos, pero sufren de sesgo de variable omitida y problemas de endogeneidad (no se informa en las tablas, pero están disponibles a pedido).

Tenga en cuenta que los modelos de regresión incluyen las variables de control más influyentes disponibles. Sin embargo, reconocemos los sesgos de las variables no observables (Altonji et al., 2005; Oster, 2019). Para probar el sesgo potencial de las variables omitidas, en el caso de ρ y DBO en modelos de efectos fijos, se encuentra que la cantidad de focalización en variables no observadas (estadística δ) es aproximadamente 0.06 y 0.13, respectivamente. Por lo tanto, el δ calculado está por debajo del límite superior estándar de $\delta = 1$, lo que sugiere que el papel de los no observables debería ser débil (Oster, 2019).

Como comprobaciones adicionales de robustez, el análisis de regresión se replica utilizando modelos de efectos aleatorios y fijos, estructura de rezago de un año (para controlar la causalidad inversa) y logaritmos (para linealizar las relaciones). En general, los hallazgos principales son cualitativamente los mismos (no se informan en las tablas). Curiosamente, utilizando la transformación logarítmica del PIB per cápita (que es similar al uso de las tasas de crecimiento del PIB, aunque no idénticas debido a las diferencias en escala, unidades de medida, estimación, interpretación, etcétera), la evidencia suele indicar una relación positiva entre ρ y el crecimiento

económico. Sin embargo, las funciones log-lineales o log-log no son adecuadas para analizar relaciones no lineales, donde se esperan relaciones en forma de u invertida.

3.6. Discusión

La relación entre el crecimiento económico y el agua es profunda y compleja. El agua es un recurso esencial para la vida, la producción, el consumo, su disponibilidad y calidad influyen en el desarrollo económico de un país. Es una realidad que el cambio climático, el crecimiento poblacional, el desarrollo de megaciudades, así como el uso alternativo del agua para el consumo humano, la industria y la agricultura están generando un mayor estrés hídrico en las regiones y países. Por estas razones, resulta importante analizar el vínculo entre el crecimiento económico y el agua; por sus características de PIB, población y geografía, el caso mexicano destaca por su interés analítico.

Siguiendo los artículos previos de Barbier (2004), Damania (2020) y El Khanji y Hudson (2016), que analizan el vínculo entre el crecimiento económico y el agua, se conforma el marco teórico de esta investigación. Para ello, se construyó una base de datos única, a partir de diferentes fuentes oficiales, para los 32 estados de la República mexicana, de 2005 a 2020. En este sentido, la presente investigación replicó (uso de agua, siendo Rho o ρ un indicador de estrés y escasez de agua) y extendió (calidad del agua a través de la DBO) una ecuación de crecimiento económico (tasa de crecimiento per cápita y niveles de PIB) con el agua como insumo a nivel subnacional (desagregación espacial). Nuestro análisis se centró en si estas variables impactan en el crecimiento. ¿El uso del agua y la contaminación del agua tienen impactos en el crecimiento económico a nivel subnacional, en el caso de México? Se prestó especial atención a las preocupaciones de endogeneidad para este tipo de análisis econométrico, utilizando técnicas de panel dinámico.

En cuanto al caso mexicano, el vínculo entre las variables relacionadas con el agua y las tasas de crecimiento no es consistente, por lo que se deben de tomar con cautela los resultados. Sin embargo, en algunas especificaciones, ρ es positivo y ρ^2 es negativo, tal como se sugería en la hipótesis. Un incremento de un punto en ρ aumenta el crecimiento del PIB en 0.05; pero hay un punto crítico cuando ρ alcanza 1.06, a partir del cual la relación se vuelve negativa. La evidencia favorece una relación entre las variables del agua y los niveles de PIB per cápita, donde ρ y ρ^2 muestran los signos previstos y son estadísticamente significativos en la mayoría de las regresiones. Un aumento de un punto en ρ eleva el PIB per cápita entre 0.03 y 0.07 millones de pesos mexicanos, siguiendo una relación de forma de u invertida, con un punto de inflexión para ρ entre 1.12 y 1.26. En ambos casos, tanto la tasa de crecimiento per cápita como los niveles de PIB muestran una u invertida, por lo que podemos considerar que se cumple la hipótesis de esta investigación; siendo así y contrastando los resultados con Barbier (2004), El Khanji y Hudson (2016). En México, los estados que no enfrentan restricciones en el uso del agua pueden experimentar un crecimiento económico. Sin embargo, aquellos que sufren “estrés hídrico” —es decir, que tienen recursos de agua dulce limitados en relación con sus poblaciones actuales y futuras— pueden tener dificultades para generar crecimiento adicional mediante un mayor uso de agua.

Respecto a la calidad del agua medida a través de la DBO, muestra resultados variados con pocos coeficientes significativos; sin embargo, se puede comentar que el aumento en la contaminación del agua eleva el PIB per cápita, presentando un punto de inflexión (siguiendo una relación en forma de U con DBO_Malo), esto coincide lo mencionado por El Khanji y Hudson (2016), podría considerarse el estudio más cercano al nuestro, ya que utilizan datos a nivel nacional para analizar la relación entre la calidad del agua y el crecimiento económico, utilizando la DBO como proxy de la calidad, como en nuestro estudio. A diferencia de Russ et al. (2022), quienes encuentran una correlación negativa entre la degradación de la calidad del agua y el desarrollo

económico regional, especialmente en cuencas hidrográficas, lo que dificulta la comparación de sus resultados con los nuestros. El crecimiento económico de los estados en México podría verse afectado si no gestionan de manera adecuada sus aguas residuales. La contaminación del agua puede seguir siendo un problema persistente vinculado a la actividad humana y por ende al crecimiento económico. Si bien el uso del agua puede gestionarse como un recurso económico, incluso con mayor eficiencia es difícil reducir su uso debido al crecimiento poblacional y la industrialización en el mundo actual. Sin embargo, la contaminación del agua puede mitigarse tanto en el corto como en el largo plazo.

Para México, los resultados no son concluyentes como se esperaba para el nivel subnacional, la evidencia debería apoyar los vínculos entre niveles y tasa de crecimiento económico como lo destacan Damania (2020). Esto puede deberse a que las entidades federativas mexicanas aún son demasiado grandes en términos de territorio para compensar el estrés hídrico en la región, lo que no permite una desagregación suficiente. Los datos a nivel municipal o a nivel de cuenca podrían proporcionar evidencia más sólida sobre la relación entre el agua y el crecimiento económico (Russ et al., 2022).

Después de la pandemia, México se ha vuelto muy atractivo en el contexto global, derivado de la relocalización de la cadena de valor y la cercanía con Estados Unidos, que es el mayor socio comercial de este país. Sin embargo, existe la preocupación de que el aumento de la escasez de agua en México afecte las perspectivas de crecimiento en México y con ello no aprovechar el momento actual que supone el *nearshoring*, que consiste en la transferencia de servicios o procesos de diversas industrias a nivel mundial a territorio mexicano. Los hallazgos de nuestra investigación podrían ser benéficos para los estados mexicanos que subutilizan el agua, como los del sur de México, y para aquellos con niveles de ρ que se acercan a puntos críticos, como los del norte y centro del país.

En el sur de México, la región más pobre del país, la evidencia indica que un mayor uso del agua puede impulsar el crecimiento económico. Sin embargo, esta región debe ser consciente de que el comercio de agua con el norte y el centro de México, las zonas más ricas, es necesario para apoyar el desarrollo económico de todas las partes involucradas, tanto públicas como privadas. Dicho esto, es importante señalar que el estado de Campeche, ubicado al sur, tiene el PIB per cápita más alto del país gracias a la producción petrolera, aunque sus indicadores socioeconómicos son bajos. Por lo tanto, es fundamental evitar que se repita esta situación en el caso del comercio del agua. Como se mencionó, en relación con la contaminación del agua, los estados mexicanos deben desarrollar políticas para el tratamiento de las aguas residuales, con la idea de no desincentivar el crecimiento económico, e incluso incentivar la reutilización del agua tratada, para mejorar tanto la disponibilidad como la contaminación del vital líquido.

Por todo lo anterior, el contexto mexicano, la relación entre crecimiento económico, disponibilidad de agua y contaminación presenta grandes retos debido a la diversidad geográfica, económica y climática del país. La situación varía significativamente entre las diferentes regiones subnacionales (estados y municipios), lo que genera un panorama complejo para la gestión del agua y su impacto en el desarrollo económico, al ser una economía en desarrollo y para que el *nearshoring* sea lo más conveniente para el crecimiento económico del país, un factor mitigante es la efectividad de las políticas, instituciones e incentivos para la gestión del agua. Barbier (2024), destaca que una gestión inadecuada de los recursos hídricos puede llevar a una situación en la que las limitaciones de disponibilidad se conviertan en un freno estructural al crecimiento económico, en especial en las regiones con mayor vulnerabilidad hídrica. Para contrarrestarlo, es fundamental que México desarrolle políticas de gestión del agua que se integren con sus estrategias de crecimiento económico, asegurando que la disponibilidad del recurso no se convierta en un factor limitante en el largo plazo.

Cabe mencionar que los datos sobre el agua representan un gran desafío para la investigación actual y futura. Mejorar la recopilación de datos sobre el agua abre oportunidades para que futuras investigaciones empleen diversos métodos econométricos, como el método OLS de dos pasos con variables instrumentales. Además, los datos sobre días secos, días húmedos, días lluviosos y otros factores relevantes deben recopilarse durante largos periodos y desagregarse por niveles geográficos, incluidos municipios, regiones y estados.

Hemos construido y desarrollado indicadores del agua en diferentes niveles, pero carecemos de datos a nivel municipal. Tal vez, los datos a nivel estatal mexicano no presentan suficiente desagregación para proporcionar evidencia sólida en el caso de las tasas de crecimiento y un estudio de replicación, incluyendo modelos de datos de panel espacial, a nivel municipal podría ser más apropiado (una limitación del estudio actual y una tarea para futuras investigaciones). En consecuencia, los datos municipales pueden proporcionar mejores estimaciones de los puntos de inflexión. Sin embargo, la movilidad del agua entre municipios es grande, el agua no siempre reconoce fronteras políticas y la formulación de políticas económicas a menudo ocurre en niveles superiores de gobierno. Por lo tanto, para futuras investigaciones, también deberíamos preguntarnos qué relevancia podrían tener estos nuevos hallazgos.

En México, la economía, el acceso al agua y la contaminación están interrelacionados. El desafío consiste en encontrar un equilibrio entre el desarrollo económico y la gestión sostenible del agua, en un contexto donde las diferencias subnacionales son notorias. Las políticas que promuevan una mejor gestión del agua y el desarrollo económico inclusivo son fundamentales para garantizar la sostenibilidad en el largo plazo. En resumen, la escasez de agua es un desafío crítico para el crecimiento económico en México, sobre todo a causa de la variabilidad geográfica en la disponibilidad del recurso. Los estudios de Barbier (1999, 2004), Damania (2020) y El Khanji y Hudson (2016), enfatizan que la gestión inadecuada de los recursos hídricos puede llevar a una

situación en la que las limitaciones de disponibilidad se convertirán en un freno estructural para el crecimiento económico, especialmente en las regiones con mayor vulnerabilidad hídrica. Para contrarrestar esto, es fundamental que México desarrolle políticas de manejo del agua que se integren con sus estrategias de crecimiento económico, asegurando que la disponibilidad del recurso no se convierta en un factor limitante a largo plazo.

3.7. Observaciones finales

Siguiendo la literatura previa Barbier (2004), Damania (2020), El Khanji y Hudson (2016) y en particular los hallazgos recientes de Damania et al. (2020), la investigación actual replicó y extendió una ecuación de crecimiento económico con el agua como insumo a nivel subnacional para México. Se ha afirmado que la falta de evidencia sólida a favor del nexo agua-crecimiento económico se debe a la movilidad de los factores y la agregación de actividades económicas en un espacio grande (Damania et al., 2020). No obstante, los hallazgos de estudios recientes únicamente apoyan esta declaración de manera parcial. La evidencia mexicana está a favor de una relación sistemática entre la disponibilidad de agua y los niveles de ingreso, pero los vínculos con las tasas de crecimiento son mixtos. Además, el papel de la contaminación del agua (DBO) tampoco está claro. Asimismo, la relación en forma de u invertida entre el agua y el PIB está bien respaldada en niveles, pero no en tasas. En la literatura se han observado resultados similares a nivel de país (Damania, 2020; El Khanji y Hudson, 2016), pero la ventaja de la investigación actual es un mejor control de las preocupaciones de endogeneidad.

Así, el PIB per cápita de los estados mexicanos aumenta con la disponibilidad de agua (ρ) cuando esta es relativamente baja y luego el PIB per cápita disminuye cuando ρ se encuentra en niveles relativamente altos (los puntos de inflexión estimados de ρ están entre 1 y 1.5). Estos hallazgos son útiles para los estados mexicanos con subutilización de agua (sur de México) y para

aquellos con niveles de ρ cercanos a los puntos de inflexión (norte y centro de México). Para el sur de México —la región más pobre del país— la evidencia sugiere que un mayor uso del agua apoyará el crecimiento económico. No obstante, esta región debe ser consciente de que el comercio de agua con el norte y el centro de México —las regiones más ricas del país— debe realizarse para ayudar a los procesos de desarrollo económico de todos los participantes (incluidos los sectores público y privado). Dicho esto, cabe señalar que el estado de Campeche, en el sur de México, tiene el PIB per cápita más alto del país, lo que se explica por la producción de petróleo. Sin embargo, Campeche tiene bajos indicadores de estatus socioeconómico. En consecuencia, debemos evitar situaciones similares en el caso del comercio de agua.

En general, a nivel macro, los responsables de las políticas deberían aceptar el vínculo positivo entre el agua y el crecimiento económico, y formular políticas para apoyar la innovación y la eficiencia en el uso del agua y las políticas para conservar y mejorar la calidad del agua. Para ello, las instituciones y el cambio institucional son muy importantes, en particular en los países en desarrollo y en los diferentes niveles de gobierno. Deberíamos hacer hincapié en las reformas de la gestión del agua que impliquen un reexamen y una posible reasignación de los subsidios para el saneamiento y el suministro de agua (Barbier, 2024). Además, no deberíamos subestimar las actitudes hacia el medio ambiente, porque muchos cambios relevantes comienzan con reglas informales simples, como el cuidado del uso del agua a nivel individual. Otros cambios serán más complicados, por ejemplo, la corrupción detrás de la infraestructura hídrica y la contaminación. Todas estas variables exigen más atención en futuras investigaciones.

Capítulo 4. Análisis de la relación entre la diversificación de cultivos y el rendimiento hídrico en los distritos de riego mexicanos

4.1. Introducción

A nivel mundial, según datos del Informe sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos en el Mundo, de la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO, 2019a), la gran mayoría de extracciones de agua se realizan en áreas rurales. En los países menos desarrollados, el porcentaje puede llegar a ser hasta más del 90 % (UNESCO, 2019). En México, según datos del Censo Agropecuario 2022 (INEGI, 2022), la superficie dedicada a la producción agrícola era de 25.7 millones de hectáreas, de las cuales el 26 % correspondía a áreas de riego, mientras que el resto dependía de las condiciones del temporal. En la agricultura de riego, el rendimiento en toneladas por hectárea fue estimado entre 2.0 y 2.5 veces mayor que en las áreas de temporal, y su valor económico fue siete veces superior. De esta forma, la superficie irrigada abarcó 6.17 millones de hectáreas, de las cuales algo más de la mitad se encontraban en 86 distritos de riego (DR), mientras que el resto estaba en más de 40 mil unidades de riego (CONAGUA, 2019). Dado que la agricultura de riego representa uno de los principales consumidores de agua, optimizar la eficiencia en su uso es crucial para abordar la problemática de la escasez hídrica, siendo esta una cuestión central en la evaluación de la eficiencia del agua agrícola (Huang y Qu, 2021). Dentro de este tema es dónde este capítulo busca contribuir al analizar el rendimiento hídrico en los distritos de riego mexicanos.

Este capítulo 4 de la tesis está organizado de la siguiente manera: primero se expone la relevancia del tema y justificación de la investigación. Luego, se incluye una revisión de la literatura para comprender lo que se ha estudiado sobre los DR, especialmente en cuanto a su

rendimiento y experiencias tanto nacionales como internacionales. Después, se explica la metodología utilizada, cómo se formó la base de datos, la especificación empírica de un modelo econométrico y el procedimiento para analizar los datos recolectados. A continuación, se presentan los resultados obtenidos, y más adelante se realiza la discusión. Por último, el capítulo concluye con las principales conclusiones y algunas implicaciones derivadas de los hallazgos.

4.2. Panorama de los distritos de riego en México

Los distritos de riego (DR) son proyectos de irrigación promovidos por el Gobierno federal desde 1926, año en que se estableció la Comisión Nacional de Irrigación. Estos proyectos integran una amplia gama de infraestructuras hidráulicas esenciales para su operación. En los DR, los productores agrícolas contribuyen mediante cuotas destinadas al mantenimiento y funcionamiento de dicha infraestructura. Gracias a estas inversiones y a la gestión colectiva del recurso, los DR cumplen una función estratégica en la producción nacional de alimentos, al garantizar la disponibilidad del vital líquido para la agricultura (Fuentes y Coll, 1980). La tabla 11 resume los principales acontecimientos y marcos legales que han configurado la evolución institucional de los DR en México.

Tabla 11*Antecedentes de los distritos de riego en México*

Año	Hecho histórico
1916	Creación del Departamento de Irrigación, mismo que dependía de la Secretaría de Agricultura y Fomento.
1926	Promulgación de la Ley de Irrigación con Aguas Federales y creación de la Comisión Nacional de Irrigación.
1935	El Banco de Crédito Agrícola se encarga del manejo de los DR.
1944	La Comisión Nacional de Irrigación controla los DR.
1946	Creación de la Secretaría de Recursos Hidráulicos.
1951	Creación de la Dirección General de Distritos de Riego, dependiente de la Secretaría de Recursos Hidráulicos.
1974	154 DR en operación en el país.
1977	Creación de la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos. La Dirección General de los Distritos de Riego se integra a la Dirección General de Economía Agrícola.
1989	Creación de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA).
1992	Promulgación de la Ley de Aguas Nacionales (LAN). Se inicia la transferencia de los DR a los usuarios.
2018	99 % de la superficie de los DR se habían transferido a los usuarios.
A la fecha	Existen 86 Distritos de Riego en el país.

Nota. Elaboración propia en base a lo consultado en Fuentes y Coll (1980) y CONAGUA (2019).

Para la gestión de los recursos hídricos en México existen unidades básicas conocidas como Región Hidrológica Administrativa (RHA), mismas que están formadas por agrupaciones de cuencas, siendo los municipios esos límites de las RHA. Esto último para facilitar la integración de la información socioeconómica. De esta forma, en la tabla 12, se observa la distribución de los DR por cada una de las trece RHA existentes en México; así como datos de su superficie, volumen

distribuido de agua y productividad económica del año agrícola 2017-2018. Se aprecia que para ese periodo se generaron en promedio \$ 4.76 pesos mexicanos de valor de cosecha por metro cúbico de agua.

Tabla 12

DR por RHA, año agrícola 2017-2018

Num.	RHA	Número de DR	Superficie total (ha)	Superficie Física (ha)	Volumen distribuido (km ³)	Valor de cosecha (millones de)	Productividad económica (\$/m ³)
I	Península de Baja California	2	245,693	199,677	2,492	11,978	4.12
II	Noroeste	7	466,870	395,617	4,110	25,125	5.31
III	Pacífico Norte	10	848,434	780,144	8,890	45,457	4.69
IV	Balsas	9	199,330	164,706	2,657	7,850	3.11
V	Pacífico Sur	5	73,053	30,814	476	1,510	1.02
VI	Río Bravo	13	465,791	384,225	3,018	12,509	4.71
VII	Cuencas Centrales del Norte	1	71,964	65,612	1,050	3,160	2.78
VIII	Lerma-Santiago Pacífico	13	451,684	298,906	3,380	19,337	5.67
IX	Golfo Norte	11	230,494	126,266	1,373	6,774	5.30
X	Golfo Centro	2	41,622	31,357	609	1,611	2.14
XI	Frontera Sur	4	37,158	28,522	339	3,039	8.67
XII	Península de Yucatán	2	17,955	14,424	89	711	8.42
XIII	Aguas Valle de México	7	125,626	94,311	1,569	4,010	2.34
	Total	86	3,275,674	2,614,581	30,052	143,071	4.76

Nota. Estadísticas del Agua en México 2019 (CONAGUA, 2019).

Durante el año agrícola 2017-2018, en los DR, los principales cultivos por superficie cosechada fueron el maíz grano, trigo grano y sorgo grano, mismos que en conjunto representaron

el 52.43 % del total. Además, estos tres cultivos concentraron el 23.4 % de la producción total en toneladas y el 29.3 % del valor económico de la producción, medido en miles de pesos mexicanos (CONAGUA, 2019). No obstante, en la mayoría de los DR, el abastecimiento de agua a las parcelas se realiza predominantemente mediante sistemas de riego por gravedad, lo que provoca pérdidas de hasta 30 % del volumen de agua debido a ineficiencias en la conducción y distribución. Dichas pérdidas se asocian principalmente al deterioro de la infraestructura hidráulica y a la insuficiencia de las estructuras de control dentro de la red de canales de los distritos (Altamirano et al., 2019).

Desde que fueron constituidos, los DR han atraído la atención de diferentes investigadores pues han sido relevantes en términos económicos y sociales, es por eso su importancia de estudiarlos para ayudar a superar los retos mencionados y contribuir a mejorar su gestión. Lo anterior se amplía en el siguiente apartado, llamado “4.3. Revisión de la literatura”. Así, este estudio tiene como objetivo analizar la relación entre la diversificación de cultivos con la rentabilidad hídrica en los DR en México.

4.3. Revisión de literatura

Con la idea de tener una visión clara de lo que ya se ha estudiado es que se llevó a cabo la revisión de literatura sobre los principales estudios que han abordado el rendimiento de los DR a nivel nacional e internacional, también llamados en inglés “*irrigation districts*”. Para esto, se realizaron búsquedas en la base de datos de Scopus, utilizando las palabras claves: “*irrigation districts*” o “*rural water*”, que adicionalmente se fueron combinando con las palabras “*yield*”, “*crop diversification*”, “*performance*”, “*efficiency*” y “*profitability*”. Se limitó la búsqueda a los títulos de los artículos publicados en alguna revista. Además, la búsqueda abarcó el periodo de 2010 al 2024, en idioma inglés y español. Después de realizar dicha búsqueda, con los criterios antes mencionados, se encontraron 48 documentos. Con esta revisión de esta literatura, se buscó

comprender con mayor profundidad el estado actual del conocimiento y, además, identificar lo que se sabe sobre el tema. Adicionalmente, se exploraron las metodologías más usadas para el estudio del tema. A continuación, se mencionan los hallazgos más relevantes y asociados al objetivo de esta investigación.

En este sentido, para el estudio de los DR, se toman en cuenta distintas metodologías, siendo las más recurrentes el Análisis Envolvente de Datos (DEA, por sus siglas en inglés). Al respecto del uso del DEA, Yan (2019), analiza el espacio temporal para la eficiencia de inversión de la conservación de agua rural de China, la investigación reveló que la eficiencia promedio de inversión en la conservación del agua rural en China fue de 0.732 por año durante el periodo analizado, con fluctuaciones en la eficiencia de inversión atribuidas a la eficiencia de escala. Además, entre 2011 y 2015, esta eficiencia experimentó una disminución promedio del 1.2 %, atribuida a cambios tecnológicos. Por su parte, Cao et al. (2014) estudian la eficiencia de producción de los DR tomando como ejemplo la provincia de Jiangsu en China, los resultados indicaron que la eficiencia global en la provincia de Jiangsu no alcanzó niveles altos, con marcadas disparidades entre las distintas áreas de riego. El valor promedio de eficiencia integral en Jiangsu se situó en 0.634, y solo tres distritos de riego demostraron ser eficientes. De esta forma, se observó que la comparación de la eficiencia relativa mediante el análisis DEA ofrece una metodología para optimizar la eficiencia en la producción de riego y estimar el potencial de ahorro de agua en la agricultura.

Adicionalmente, González-Gómez et al. (2013) desarrollaron la externalización y eficiencia en la gestión de servicios rurales de agua con el análisis de ochenta empresas públicas, privadas o público-privadas de servicio de agua en el sur de España. Los resultados indican que las asociaciones público-privadas tienen un nivel de eficiencia comparable al de las empresas completamente privadas o públicas. Por último, Ali y Klein (2014) estudian la eficiencia y

productividad de los factores del uso de agua para doce distritos de riego en el sur de Alberta, Canadá, de 2008 a 2012, según los resultados del modelo DEA enfocado en los insumos, los distritos de riego alcanzaron, en promedio, un 84.3 % de eficiencia técnica en el uso de recursos, siendo el agua neta desviada el principal insumo evaluado. Siguiendo con la metodología que utiliza el DEA, en México, Altamirano et al. (2019) analizan la evolución de la eficiencia técnica de 42 DR, como son la infraestructura con la que cuentan, distribución de agua y prácticas agrícolas. Dicho análisis permitió observar las eficiencias de escala y las métricas de rendimiento, mostrando fortalezas y debilidades para seis grupos de DR homogéneos.

Otros artículos proponen metodologías diferentes, tal es caso de Mohanty y Rout (2022), que hablan sobre la sostenibilidad financiera del suministro de agua rural, analizando los factores que afectan la recaudación de ingresos, descubriendo que la baja participación comunitaria, la noción de suministro de agua gratuito y el pago irresponsable son las principales razones de la deficiente recaudación de ingresos. Huang y Qu (2021), llevaron a cabo una evaluación integral de la eficiencia del uso del agua en los DR para proporcionar una base para la toma de decisiones para la reconstrucción y construcción de los DR para lo cual se desarrolló un modelo acoplado de análisis de componentes principales y la técnica de orden de preferencias por similitud, la integración de los métodos aumentó la precisión en la evaluación de la eficiencia del uso del agua agrícola.

Siendo un tema importante para este estudio la diversificación de cultivos se identificó lo que se sabe sobre este tema y los DR. Distintos documentos han abordado esta relación y se ha estudiado la diversificación de cultivos en los DR, entre ellos, destacamos a Almagro et al. (2023), quienes utilizan la diversificación como una estrategia de gestión para combatir la degradación del suelo, mitigar el cambio climático y contribuir a la seguridad alimentaria, lo cual tiene un impacto positivo. Por otro lado, diferentes autores como Alam et al. (2021), Assefa et al. (2021) y Hoque

et al. (2023), tratan la diversificación del cultivo de arroz para mejorar la rentabilidad de estos, encontrado una productividad, rentabilidad y sostenibilidad significativamente mayor derivado de la diversificación. Otros cultivos analizados en la diversificación de cultivos a través de la rotación son el maíz, trigo y mijo (Jaleta et al., 2020; Lal et al., 2018; Sammauria et al., 2020), estas investigaciones muestran que los cultivos que se intercalan tienen el rendimiento promedio más alto.

El otro tema que hemos considerado en esta investigación es el tema hídrico, debido a que diversos trabajos hacen referencia a este eje para mejorar la rentabilidad de los cultivos junto con la rotación de estos (Bhargavi et al., 2019; Lenssen et al., 2014), destacando además que el agotamiento de la calidad del suelo y la disminución de la disponibilidad de agua limitan la producción.

Siguiendo en el interés que se tiene por los DR, Soto-García et al. (2013) estudian los efectos de la escasez de agua y la modernización en el rendimiento de los DR en el sureste de España: Los resultados evidencian de manera contundente que las limitaciones en el suministro de agua tuvieron un impacto significativamente mayor en los cambios de rendimiento observados a lo largo del tiempo, en comparación con el efecto del proceso de modernización. Asimismo, Negharchi y Shafaghat (2022), observaron la evolución de estrategias de regulación de la presión del servicio sobre el desempeño de una red de agua rural. La investigación indica que el uso del análisis hidráulico (mediante el método de las características, MOC, por sus siglas, para establecer áreas de gestión de presión) permitirá identificar las estrategias de control más efectivas. Por su parte, Bennett et al. (2015) estudian las ganancias en la eficiencia del sistema de conducción de agua en distritos de riego del sur de Alberta en Canadá, dichas eficiencias se encuentran en las mejoras de los sistemas de riego en la granja y la rehabilitación de las infraestructuras de transporte del agua de riego. Por otro lado, varios autores como Karimi et al. (2022), Huang et al. (2022) y

Jiang et al. (2022), estudian la eficiencia del uso del agua rural desde diferentes puntos de vista, por ejemplo, Karimi et al. (2022), estudian la vulnerabilidad de los sistemas operativos convencionales en la distribución de agua agrícola.

La revisión de la literatura sobre DR revela una gran diversidad de enfoques y puntos de vista. Esta variedad de investigaciones pone de manifiesto la complejidad de estos sistemas y las necesidades que enfrentan estos entes con relación a la gestión hídrica. Los DR y las zonas rurales son estudiadas con diferentes metodologías y enfoques, aunque el Análisis Envolvente de Datos o DEA fue el más utilizado. Asimismo, se puede observar que el tema de la diversificación es considerado dentro de la literatura académica, incluso poniendo interés en la rentabilidad de los cultivos.

Considerando la relevancia del riego para la producción de alimentos, el elevado porcentaje de agua destinada a la agricultura y los desafíos asociados con su gestión resulta esencial analizar el riego en México. De esta forma, este capítulo contribuye a este tema al analizar cómo la diversificación de cultivos está relacionada con la rentabilidad hídrica en los DR en México.

4.4. Metodología

4.4.1. Recolección de datos y variables

Con el objetivo de encontrar las principales variables que inciden en el rendimiento hídrico (RH) de los distritos de riego (DR) en México, se construyó una base de datos con información disponible de los mismos durante 2016 a 2021. La variable rendimiento hídrico (RH, variable a

explicar) se obtuvo del “Sistema de información para incentivar el cobro pago del agua” (Río Arronte e IMTA, 2021)³.

Adicionalmente, del mismo sistema de información se obtuvieron otras variables como son: productividad hídrica (PH), lámina de riego (LR), suficiencia financiera (SF), suficiencia general (SG), suficiencia por servicio de riego (SPSR) y recaudación por metro cúbico (RM3) (Río Arronte e IMTA, 2021). Con la finalidad de medir la diversificación de cultivos en los DR se construyó la variable DIV, misma que mide el número de diferentes cultivos que se cosechan al año en un DR.

4.4.2. Matriz de correlación y análisis estadístico

A continuación, se construyó la matriz de correlación, para lo cual se llevó a cabo un proceso estructurado en varias etapas: búsqueda y recopilación de datos (como ya se comentó), organización y depuración de la información, en la que se estructuraron los datos en una base tabulada en software estadístico, eliminando valores atípicos y datos incompletos, y realizando pruebas de consistencia y normalización (Field, 2013). Por otro lado, se realizó un procesamiento estadístico, aplicando el coeficiente de correlación de Pearson para evaluar la relación lineal entre las variables con el uso de Python, generando una matriz simétrica donde la diagonal principal contiene valores de 1 y los valores por debajo de la diagonal se establecieron en 0 para facilitar la interpretación (Hair et al., 2019). Asimismo, se visualizaron los resultados a través de una representación tabular para una mejor interpretación (Tabachnick y Fidell, 2019). Para finalizar, con el objetivo de analizar que no hubiera multicolinealidad entre los datos, se realizó un análisis

³ La Fundación Río Arronte y el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) para estimular buenas prácticas en la gestión del agua en México, tanto de organismos operadores de agua como de los distritos de riego, operan un “Sistema de información para incentivar el cobro pago del agua”.

de correlación y se asumió que valores menores a 0.5 en términos absolutos no presentaban un riesgo significativo para la construcción de un modelo econométrico (Gujarati y Porter, 2010).

4.4.3. Especificación empírica de un modelo para valorar el rendimiento hídrico

Se realizó un modelo econométrico de panel para lo cual se utilizó la ecuación (1):

$$RH_{it} = \beta_0 + \beta_1 x_{it} + u_{it} \quad (1)$$

Dado que u es el término de error para DR i y el periodo t , siendo la variable por explicar (o dependiente) el rendimiento hídrico (RH) y utilizando las siguientes variables explicativas (o independiente) en diferentes modelos: productividad hídrica (PH), lámina de riego (LR), suficiencia financiera (SF), suficiencia general (SG), suficiencia por servicio de riego (SPSR) y recaudación por metro cúbico (RM3) y diversificación de cultivos (DIV). Dado que los datos con los que se cuenta son de corte transversal; esto es, los datos provienen de la recopilación de los 86 DR en la República mexicana, durante un periodo de 5 años, de 2016 a 2020, se optó por realizar modelos de panel. Los datos de panel tienen como característica que permiten incluir datos de unidades de medición y unidades de tiempo, lo que también llamamos datos agrupados (Gujarati y Porter, 2010).

4.5. Resultados

4.5.1. Análisis descriptivo de las variables

En la tabla 13, se presentan los estadísticos descriptivos de las variables mencionadas anteriormente. Se agrega una breve descripción de cada una de ellas. Para entender cada variable,

se agregaron tanto estadísticos de posición como de dispersión. De esta forma, se logra observar la relevancia que tiene dichas variables para el objetivo que esta investigación persigue. En el mismo sentido, encontramos variables con niveles de variabilidad desde muy bajos hasta muy altos (ver columna del CV). Así, las variables con el mayor CV fueron (en orden de mayor a menor): la productividad hídrica (PH), la recaudación por metro cúbico (RM³) y el rendimiento hídrico (RH). Esta variabilidad nos proporciona elementos de interés para aplicar el modelo econométrico.

Tabla 13*Variables y estadística descriptiva*

Variable	Descripción	Obs¹	Mín	Máx	Media	DE²	CV(%)³
Rendimiento Hídrico (RH)*	Valor de la producción (\$) dividido entre el volumen de agua distribuido (m ³).	516	0.36	54.56	6.98	7.17	102.72
Productividad Hídrica (PH)*	Producción (kg) entre volumen de agua distribuido (m ³).	516	0.38	146.53	4.52	10.88	240.71
Lámina de Riego (LR)*	Volumen de agua distribuido (m ³) entre superficie sembrada (m ²).	516	10.52	392.43	114.48	10.88	9.50
Suficiencia Financiera (SF)*	Recaudación por cuota de servicio de riego (\$) entre egresos totales para dar el servicio de riego (\$).	512	0.11	227.21	46.74	32.18	68.85
Suficiencia General (SG)*	Recursos totales designados para el servicio de riego (\$) entre egresos totales para dar el servicio de riego (\$).	505	11.89	331.38	109.94	25.61	23.29
Suficiencia por Servicio de Riego (SPSR)*	Recaudación por cuota de servicio de riego (\$) entre egresos para cubrir gastos de operación, conservación, administración y pagos de servicio de agua en bloque.	502	0.74	182.20	85.58	22.27	26.02
Recaudación por metro cúbico (RM³)*	Recaudación por cuota de riego (\$) entre volumen distribuido de agua (m ³).	508	0.00	2.86	0.10	0.19	190.00
Diversificación (DIV)**	Número de diferentes cultivos que se cosechan en un año.	430	1.00	46.00	14.50	9.62	66.34

Nota. (1) Número de observaciones recabadas en cada variable. (2) DE: desviación estándar. (3) CV (%): coeficiente de variación en porcentaje. Elaboración propia con datos de Río Arronte e IMTA (2021)* y CONAGUA (2019)**.

Ya con las variables bien definidas y entendiendo sus características estadísticas principales (tabla 13). Se procedió a realizar un análisis de correlación, en la Tabla 14 se muestra la matriz de correlación. Se puede destacar una correlación de 0.67 entre la productividad y el rendimiento hídricos. Lo anterior tiene sentido porque, en términos generales, más kilogramos por metro cúbico acompañan más ingreso monetario por metro cúbico. Asumiendo que la variable a explicar es el rendimiento hídrico y dado que no se observan correlaciones mayores a 0.5 en términos absolutos entre las posibles variables explicativas, se infiere que no hay un riesgo importante de multicolinealidad para desarrollar y estimar el modelo econométrico.

Tabla 14

Matriz de correlación (n = 404, tamaño uniforme)

	RH	PH	LR	SF	SG	SPSR	RM3	DIV
RH	1	0.67	-0.39	-0.17	0.08	-0.34	0.18	0.01
PH		1	-0.27	-0.12	0.07	-0.33	0.13	-0.22
LR			1	0.03	-0.01	0.09	-0.18	0.19
SF				1	0.23	0.38	0.26	0.04
SG					1	0.18	0.28	-0.04
SPSR						1	0.25	-0.08
RM3							1	-0.04
DIV								1

Nota. Elaboración propia.

4.5.2 Modelo econométrico

En la tabla 15 se muestran varios modelos con diferentes variables dependientes. Los que obtuvieron el mejor ajuste cumpliendo con los supuestos son los que se muestran a continuación:

Tabla 15

Modelos de panel para explicar el rendimiento hídrico (RH)

Concepto	(Modelo 1 - Pooled*)	(Modelo 2 - EA)
	I_RH	I_RH
Constante	0.309617 (0.1427)	0.440893 (0.0140)
I_PH	0.597845 (0.0000)	0.744435 (0.0000)
I_DIV	0.306057 (0.0000)	0.197737 (0.0000)
Observaciones / OOA	430 / 86	430 / 86
Coefficiente R ²	0.41	
R ² ajustada	0.41	
Corr (y, y pronóstico)		0.39
Valor <i>p</i> prueba de normalidad	0.39	0.44
Valor <i>p</i> prueba Reset de Ramsey	0.21	
Valor <i>p</i> prueba de White	0.06	
Valor <i>p</i> prueba de Hausman		0.00
VIF I_PH	1.257	
VIF I_DIV	1.257	

Nota. valor *p* entre paréntesis. Pooled es mínimos cuadrados ordinarios (MCO) con datos agrupados y EA es efectos aleatorios. *Desviaciones típicas robustas para corregir posible heteroscedasticidad. Elaboración propia.

Se realizaron modelos de panel tipo Pooled y efectos aleatorios (EA). A pesar de que la prueba de Hausman indicó que era más conveniente el uso de efectos fijos, este modelo no se

incluyó pues no cumplía con normalidad y la variable DIV resultaba con signo diferente a los esperado además de no ser significativa.

Se puede observar, en la tabla 15, que los modelos fueron realizados con las variables en forma de logaritmo de esta manera se lograba un mejor ajuste. Los resultados obtenidos nos permiten confirmar que existe una relación significativa positiva entre el rendimiento hídrico (RH) y las variables productividad hídrica (PH) y diversificación de cultivos (DIV). La bondad de ajuste de los modelos ronda el 40 por ciento y, además, se cumplen las pruebas de normalidad. El modelo Pooled cumple con correcta especificación, sin embargo, se llevó a cabo con desviaciones típicas robustas porque la prueba de White aceptaba por muy poco la hipótesis nula de homocedasticidad al ser el valor p igual a 0.06.

En la tabla 16 se observa la matriz de correlación con las variables utilizadas en el modelo. Se asume que no existe riesgo de multicolinealidad dado que las variables explicativas tienen una correlación menor a 0.5 en términos absolutos y porque los factores de inflación de la varianza (VIF, por sus siglas en inglés) son menores a 10.

Tabla 16

Matriz de correlación de las variables utilizadas en el modelo (n = 404, tamaño uniforme)

	l_RH	l_PH	l_DIV
l_RH	1	0.57	-0.01
l_PH		1	-0.45
l_DIV			1

Nota. Elaboración propia.

En la tabla 17 se interpretan los resultados de los coeficientes de los modelos. Se observa que el rendimiento hídrico está influenciado tanto por la productividad hídrica como por la diversificación de cultivos.

Tabla 17*Interpretación de los resultados (variables explicativas de l_{RH})*

Variables X's	Forma funcional	Coefficientes β's	Interpretación
l _{PH}	log - log	0.597845 a 0.744435	Un incremento del uno por ciento en la productividad hídrica aumenta entre 0.6 y 0.7 por ciento el rendimiento hídrico.
l _{DIV}	log - log	0.197737 a 0.306057	Un incremento del uno por ciento en la diversificación de cultivos aumenta entre 0.2 y 0.31 por ciento el rendimiento hídrico.

Nota. Elaboración propia.

4.6. Discusión

La diversificación de cultivos en DR puede ser un camino para mejorar la eficiencia hídrica y la productividad agrícola. En contextos como el de México, el riego en la agricultura abarca solo el 18 % del área, pero genera rendimientos por hectárea 2.0 a 2.5 veces mayores que la agricultura de temporal y un valor económico hasta siete veces superior (INEGI, 2022). Este alto desempeño contrasta con problemas persistentes de gestión en dichos sistemas (Altamirano et al., 2019; Altamirano et al., 2017), lo que subraya la necesidad de estrategias innovadoras de manejo.

Nuestros hallazgos evidencian que aumentar la productividad hídrica tiene un efecto positivo significativo en el rendimiento general de los distritos de riego. En particular, los modelos econométricos desarrollados indican que un incremento de 1 % en la productividad hídrica se asocia con un aumento de aproximadamente 0.6 a 0.7 % en el rendimiento hídrico del distrito. Esto implica que mejoras relativamente pequeñas en la eficiencia con que se usa el agua pueden traducirse en incrementos notables de producción agrícola. En términos prácticos, estos resultados sugieren que diversificar las rotaciones o combinaciones de cultivos en un distrito de riego permite obtener más rendimiento por cada unidad de agua con escasez hídrica.

De esta forma, nuestros resultados se alinean con evidencia previa y estudios recientes que resaltan los beneficios de la diversificación en sistemas agrícolas irrigados. Almagro et al. (2023) reportan, por ejemplo, que, en un huerto bajo condiciones semiáridas, la diversificación (mediante cultivos intercalados con el cultivo principal) mejoró la retención de agua en el suelo y la disponibilidad de agua para las plantas, sin comprometer los rendimientos del cultivo principal. Esto sugiere que diversificar no solo aprovecha mejor el agua de riego, sino que también potencia la capacidad del suelo para conservar la humedad, reduciendo pérdidas por evaporación o escorrentía. De forma complementaria, Hoque et al. (2023) indican que una adecuada diversificación de cultivos eleva la productividad del agroecosistema y contribuye a la seguridad alimentaria regional. En la misma línea, Jaleta et al. (2020) muestran que la implementación de cultivos intercalados o rotaciones logra rendimientos promedio más altos en comparación con esquemas de monocultivo. La literatura coincide en términos generales, pues diversos autores han encontrado una relación positiva entre la diversificación de cultivos y el aumento de la productividad agrícola (Bhargavi et al., 2019; Lal et al., 2018; Sammauria et al., 2020). Estos estudios, junto con nuestros hallazgos, refuerzan la noción de que diversificar es una vía efectiva para intensificar la producción de forma sostenible, especialmente en áreas de riego donde el agua es un recurso limitante.

4.7. Conclusiones

En la presente investigación se lleva a cabo una breve descripción histórica de los distritos de riego hasta la actualidad. Se realiza una revisión de la literatura sobre los principales estudios del desempeño de los DR en México, así como de la importancia del rendimiento del agua utilizada en los cultivos a nivel internacional. A través de la base de datos de la plataforma “Sistema de información para incentivar el cobro-pago del agua 2021” (Río Arronte e IMTA, 2021), se lleva a

cabo un análisis estadístico y un modelo econométrico de panel de datos para encontrar los factores asociados al rendimiento hídrico de los DR.

Se encuentra evidencia de que existe una relación significativa positiva entre el rendimiento hídrico (RH) y las variables productividad hídrica (PH) y diversidad de cultivos (DIV). Se concluye que es muy importante seguir estudiando los distritos de riego en México pues existe poca investigación al respecto y más en el contexto mexicano.

Los resultados provistos en esta investigación han demostrado de manera sólida que la diversificación en distritos de riego es una estrategia altamente relevante y beneficiosa. Al conectar nuestros hallazgos con los de la literatura previa, queda claro que diversificar cultivos puede mejorar la eficiencia en el uso del agua y aumentar la productividad de las parcelas irrigadas, a la vez que fortalece la sostenibilidad del sistema agrícola. Estos resultados tienen implicaciones prácticas para el diseño de políticas y la gestión de los distritos de riego, pues incentivar esquemas de siembra más diversos podrían traducirse en “más cultivo por gota” —más producción por cada gota de agua— contribuyendo tanto a la seguridad alimentaria como a la conservación de los recursos hídricos. Fomentar la diversificación, acompañado de buenas prácticas de manejo del agua, puede ser un pilar para optimizar el desempeño de los distritos de riego en México, asegurando que la intensificación de la producción vaya de la mano con la eficiencia hídrica y la resiliencia ambiental.

Capítulo 5. Conclusiones

La escasez de agua es un problema global multifacético que impacta en el desarrollo económico (ONU, 2021). Factores como el crecimiento poblacional, el cambio climático, la ineficiencia en el uso del recurso hídrico y la falta de infraestructura adecuada han exacerbado la crisis del agua (Damania, 2020; Lee et al., 2023). Además, la gestión ineficaz y la ausencia de políticas públicas integrales han dificultado la solución de este problema, lo que hace necesario adoptar enfoques holísticos y sostenibles (ONU, 2021).

Los tres capítulos demuestran que el agua constituye un recurso de relevancia económica, cuyo manejo requiere transformaciones fundamentadas en criterios técnicos. En México, la gestión del agua exige un abordaje integral que combine soluciones con diferentes puntos de vista, como son el económico y financiero, entre otros. Este marco confirma que el vital líquido no puede seguir siendo tratado como un insumo ilimitado, requiere una gestión basada en conocimientos económicos y políticas públicas que coordinen a municipios, estados, federación, productores, industriales y usuarios urbanos.

En el caso mexicano, el problema de la sequía se ha mostrado un crecimiento significativo en los últimos años, afectando tanto a la población como a sectores clave de la economía (Banco de México, 2022), siendo la sequía no solo representa un problema ambiental y social, sino también un desafío económico de gran magnitud, que pone en riesgo la estabilidad de sectores productivos fundamentales para el desarrollo del país.

Esta investigación muestra que, en México, los organismos operadores de agua necesitan autosuficiencia financiera para asegurar el servicio urbano. A nivel nacional, la disponibilidad de

agua (en términos de cantidad y calidad) influye en los ingresos por estado. En el campo, en los distritos de riego, la diversificación de cultivos mejora la rentabilidad hídrica.

El capítulo 2 contribuye al análisis de los organismos operadores de agua en México desde una perspectiva microeconómica. A partir de una base de datos en panel, se encontraron aquellos factores que determinan la capacidad de los organismos para cubrir sus costos, siendo determinante la tarifa doméstica, comercial e industrial, así como el subsidio cruzado entre ellas y, por otro lado, la eficiencia física, la eficiencia comercial y la eficiencia global. Se evidencia que estas variables impactan positiva y significativamente en la autosuficiencia financiera, mientras que la ubicación geográfica de los organismos a estados del sureste del país se identifica de manera negativa, lo que insinúa que la cantidad del recurso reduce los estímulos para mejorar la eficiencia y la gestión.

En el plano teórico, aporta a la microeconomía al considerar el agua como un bien económico y un recurso escaso. Además, en ciencias empresariales, aborda a los organismos como entidades que requieren modelos de gestión comparables a los de empresas de servicios, enfocados en equilibrio financiero, gobernanza y transparencia.

En el plano práctico, los hallazgos sugieren fortalecer la gestión de los organismos operadores estableciendo tarifas técnicas y económicas, reduciendo pérdidas en la red, mejorando la cobranza y promoviendo transparencia. Para las políticas públicas, se recomienda formar consejos que definan tarifas con equidad y sostenibilidad, dejando de lado intereses políticos y aplicando esquemas diferenciados según el tipo de usuario.

El capítulo 3 aporta a la tesis una visión macroeconómica de la relación entre el agua y el crecimiento económico en México. Desde el punto de vista teórico, se enriquece la literatura macroeconómica al incorporar el agua como un factor productivo endógeno, integrando las discusiones de Barbier (1999, 2004, 2015), Damania (2020) y El Khanji y Hudson (2016) sobre la curva en forma de U invertida entre el uso del agua y el crecimiento económico. Este enfoque

contrasta con el modelo neoclásico, que suelen excluir los recursos naturales del análisis de la contabilidad del crecimiento, y se aproxima a las teorías del crecimiento endógeno al mostrar que la disponibilidad y la calidad del agua pueden potenciar o limitar el desarrollo económico regional.

Esta tesis ha demostrado que, la disponibilidad de agua está relacionada con el nivel de PIB per cápita, aunque no hay evidencia sólida de su influencia en las tasas de crecimiento económico. En cuanto a la calidad del agua los resultados son diversos y presentan pocos coeficientes significativos. No obstante, se puede señalar que un incremento en la contaminación del agua está asociado a un aumento del PIB per cápita, mostrando un punto de inflexión que sigue una relación en forma de U con la mala calidad del agua. Este hallazgo coincide con lo expuesto por El Khanji y Hudson (2016). A nivel subnacional, el caso de México no es concluyente se esperaba que trabajando con las entidades federativas de la República mexicana los vínculos entre niveles y tasa de crecimiento tuvieran mayor relevancia, la explicación a esta situación puede ser que las entidades siguen siendo en área geográfica demasiado grandes, lo que no permite una desagregación adecuada. Asimismo, en lo que respecta a la gestión del agua, se contribuye en un análisis empírico de carácter estatal (subnacional), poco estudiado a nivel internacional, que liga el crecimiento económico del recurso hídrico, utilizando metodologías robustas como modelos dinámicos de panel para controlar problemas de endogeneidad.

En cuanto a las contribuciones prácticas, los resultados señalan la necesidad de diseñar políticas públicas diferenciadas según el nivel de presión hídrica en cada estado. En el sur, donde existe subutilización del recurso, se identifica un potencial para impulsar el crecimiento económico mediante un mayor aprovechamiento; mientras que, en el norte y centro, donde se registran niveles cercanos a los puntos críticos de estrés hídrico, se requiere implementar medidas de eficiencia y explorar esquemas de comercio entre los estados o las cuencas. Es fundamental fortalecer las políticas de tratamiento y reúso de aguas para mejorar el medio ambiente y sostener el crecimiento

económico. El agua debe considerarse en la planificación económica y la atracción de inversiones nacionales.

El capítulo 4 aporta un análisis para los distritos de riego desde la perspectiva microeconómica en el campo, anexando el desempeño agrícola con el uso del agua. En el terreno teórico, se contribuye a la economía al tratar el agua como un insumo productivo sujeto a la escasez. En el ámbito de las ciencias empresariales, se introducen métricas que permiten evaluar la rentabilidad hídrica de los distritos, entendidos como organizaciones que requieren equilibrio financiero y estrategias de gestión comparables a las de unidades empresariales.

En lo que respecta a la gestión del agua, robustece la evidencia empírica al aplicar un modelo econométrico de datos de panel, corroborando que, al aumentar la productividad hídrica y diversificación de cultivo, también se incrementa el rendimiento hídrico, coincidiendo con otros estudios que demuestran la diversificación no solo aumenta la retención de agua en el suelo y su disponibilidad para las plantas (Almagro et al., 2023), sino que también potencia la productividad agrícola y, por ende, la seguridad alimentaria (Hoque et al., 2023; Jaleta et al., 2020).

En el plano práctico, los resultados señalan la importancia de desarrollar políticas públicas que incentiven esquemas de siembra diversificados y prácticas de manejo eficiente del riego, de modo que se logre más cultivo por goteo. Por otra parte, diversos estudios han señalado retos estructurales y tecnológicos en estos sistemas. Altamirano et al. (2017) destacan el deterioro de la infraestructura de riego, mientras que Altamirano et al. (2017) y Fuentes y Coll (1980) subrayan la urgencia de modernizar estos sistemas para optimizar la distribución del agua.

El agua dulce es un recurso limitado y esencial, cuya gestión eficiente es fundamental para garantizar el bienestar de la población y el desarrollo económico sostenible (Sadoff et al., 2015; World Bank Group, 2016). En lo que respecta a México se requiere un enfoque integral que combine políticas públicas eficientes, innovación tecnológica y la participación activa de los

sectores involucrados. Producto de esto se puede mencionar: la implementación de tarifas progresivas, la mejora en la regulación de los organismos operadores de agua y la promoción de tecnologías para optimizar el uso hídrico en la agricultura son estrategias clave para enfrentar la crisis del agua.

En este sentido, la tesis genera evidencia empírica y propone mejoras para una gestión sostenible del agua, equidad territorial en su acceso y desarrollo económico nacional por medio de tres enfoques: 1) la visión microeconómica urbana, centrada en la autosuficiencia financiera de los organismos operadores de agua; 2) la perspectiva microeconómica rural, enfocada en la diversificación de cultivos y la productividad hídrica de los distritos de riego, y 3) el enfoque macroeconómico que analiza la relación entre la disponibilidad y calidad del agua y el crecimiento económico. Esta integración permite entender la problemática económica del agua como un fenómeno complejo que trasciende lo técnico para situarse en el contexto económico y sus implicaciones de política pública.

El desafío para nuestro país es implementar políticas públicas que provoquen la eficiencia en la gestión del agua, originando inversiones en tecnología y normas adecuadas. La coordinación entre el sector gubernamental, académico y productivo es esencial para lograr sostenibilidad y resiliencia ante el cambio climático.

5.1. Limitaciones de la tesis y propuestas para investigaciones futuras

Es importante identificar las limitaciones encontradas y plantear soluciones para mejorar la investigación. En los tres capítulos, la principal dificultad fue la falta de calidad y desagregación de datos. Por ello, se recomienda combinar métodos cuantitativos y cualitativos, ampliar fuentes y añadir nuevas dimensiones analíticas para crear políticas públicas más efectivas y equitativas.

En lo que respecta al capítulo 2, en relación futuras investigaciones, se deberá ampliar la cobertura de la base de datos, incorporar indicadores de gobernanza, transparencia y participación social, y vincular la autosuficiencia financiera con resultados de desempeño en calidad del servicio. Asimismo, se recomienda realizar comparaciones entre distintos modelos de gestión (municipal, estatal, privado o mixto) e integrar metodologías cualitativas que capturen dinámicas institucionales y políticas.

En el capítulo 3, se sugiere trabajar con unidades más desagregadas, como son municipios o cuencas, incorporar múltiples indicadores de calidad del agua e integrar análisis de políticas públicas específicas como subsidios, infraestructura hídrica o esquemas de comercio interregional de agua. Asimismo, se sugiere explorar la interacción entre disponibilidad de agua, productividad regional y fenómenos emergentes como el *nearshoring*, por lo que actualmente, se está trabajando en el diseñando un índice que mida la eficiencia económica del uso del agua, para identificar áreas de mejora y promoción de la competitividad económica en los 32 estados de la República mexicana.

Por último, el capítulo 4 se debería ampliar la cobertura a todos los distritos de riego, incluir indicadores de modernización tecnológica, costos de operación e infraestructura hidráulica, así como variables climáticas. El uso de metodologías mixtas —que combinen modelos econométricos con estudios de caso cualitativos— permitiría comprender mejor las dinámicas sociales y organizativas de los usuarios del agua agrícola, fortaleciendo así la aplicabilidad de los resultados en el diseño de políticas.

Referencias

- Ablanedo-Rosas, J. H., Campanur, A. G., Olivares-Benítez, E., Sánchez-García, J. Y. y Nuñez-Ríos, J. E. (2020). Operational efficiency of Mexican water utilities: Results of a double-bootstrap data envelopment analysis. *Water*, 12(2). <https://doi.org/10.3390/w12020553>
- Akimov, A. y Simshauser, P. (2020). Performance measurement in Australian water utilities. Current state and future directions. *Australian Journal of Public Administration*, 79(1), 111-142. <https://doi.org/10.1111/1467-8500.12376>
- Alam, M. J., Abdullah- Al-Mahmud, Islam, M. A., Hossain, M. F., Ali, M. A., Dessoky, E. S., El-Hallous, E. I., Hassan, M. M., Begum, N. y Hossain, A. (2021). Crop Diversification in Rice—Based Cropping Systems Improves the System Productivity, Profitability and Sustainability. *Sustainability*, 13(11). <https://doi.org/10.3390/su13116288>
- Ali, M. K. y Klein, K. K. (2014). Water Use Efficiency and Productivity of the Irrigation Districts in Southern Alberta. *Water Resources Management*, 28(10), 2751-2766. <https://doi.org/10.1007/s11269-014-0634-y>
- Almagro, M., Díaz-Pereira, E., Boix-Fayos, C., Zornoza, R., Sánchez-Navarro, V., Re, P., Fernández, C. y Martínez-Mena, M. (2023). The combination of crop diversification and no tillage enhances key soil quality parameters related to soil functioning without compromising crop yields in a low-input rainfed almond orchard under semiarid Mediterranean conditions. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 345. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2022.108320>
- Altamirano, A., Valdez, J. B., Valdez, C., León, J. I., Betancourt, M. y Osuna, T. (2017). Clasificación y evaluación de los distritos de riego en México con base en indicadores de desempeño [Classification and evaluation of the irrigation districts in Mexico based on performance indicators]. *Tecnología y ciencias del agua*, 8(4), 79-99. <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2017-04-05>
- Altamirano, A., Valdez, J. B., Valdez, C., León, J. I., Betancourt, M. y Osuna, T. (2019). Evaluación del desempeño de los distritos de riego en México mediante análisis de eficiencia técnica [Performance assessment of irrigation districts in Mexico through technical efficiency

analysis]. *Tecnología y ciencias del agua*, 10(1), 85-121. <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2019-01-04>

Altonji, J. G., Elder, T. E. y Taber, C. R. (2005). Selection on Observed and Unobserved Variables: Assessing the Effectiveness of Catholic Schools. *Journal of Political Economy*, 113(1), 151-184. <https://doi.org/10.1086/426036>

Angeles-Castro, G., Arriola-Barcenas, L. J. y Baeza-Almaraz, C. B. (2018). Determinants of total efficiency in water utilities in Mexico. *Applied Economics Letters*, 25(21), 1531-1534. <https://doi.org/10.1080/13504851.2018.1430324>

Assefa, Y., Yadav, S., Mondal, M. K., Bhattacharya, J., Parvin, R., Sarker, S. R., Rahman, M., Sutradhar, A., Prasad, P. V. V., Bhandari, H., Shew, A. M., y Jagadish, S. V. K. (2021). Crop diversification in rice-based systems in the polders of Bangladesh: Yield stability, profitability, and associated risk. *Agricultural Systems*, 187. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2020.102986>

Banco de México. (2022). Sequía en México y su Potencial Impacto en la Actividad Económica. En *Informe Trimestral Abril-Junio 2022* (pp. 30-35). <https://www.banxico.org.mx/publicaciones-y-prensa/informes-trimestrales/recuadros/%7B3A0127A1-D0C9-7D61-C9AE-E57E127FB39B%7D.pdf>

Barbier, E. B. (1999). Endogenous Growth and Natural Resource Scarcity. *Environmental and Resource Economics*, 14, 51-74. <https://doi.org/10.1023/A:1008389422019>

Barbier, E. B. (2004). Water and Economic Growth. *The Economic Record*, 80(248), 1-16. <https://doi.org/10.1111/j.1475-4932.2004.00121.x>

Barbier, E. B. (2005). Does water availability constrain economic development? En *Natural Resources and Economic Development* (pp. 242-285). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/cbo9780511754036.008>

Barbier, E. B. (2015). Water and Growth in Developing Countries. En A. Dinar y K. Schwabe (Eds.), *Handbook of Water Economics* (pp. 500-512). Edward Elgar. <https://www.e-elgar.com/shop/usd/handbook-of-water-economics-9781782549642.html>

- Barbier, E. B. (2024). Review Paper: Water and Economic Growth in Developed and Developing Countries. *Water Economics and Policy*, 10(3), 2430002-1-243002-24. <https://doi.org/10.1142/S2382624X24300020>
- Barro, R. J. (1991). Economic Growth in a Cross Section of Countries. *The Quarterly Journal of Economics*, 106(2), 407-443. <http://www.jstor.org/about/terms.html>
- Barro, R. J. (1999). Notes on Growth Accounting. *Journal of Economic Growth*, 4, 119-137.
- Belotti, F., Hughes, G. y Mortari, A. P. (2017). Spatial panel-data models using Stata. *Stata Journal*, 17(1), 139-180. <https://doi.org/10.1177/1536867x1701700109>
- Bennett, D. R., Riewe, R. V, Entz, T. y Woods, S. A. (2015). Water conveyance and on-farm irrigation system efficiency gains in southern Alberta irrigation districts from 1999 to 2012. *Canadian Water Resources Journal*, 40(2), 173-186. <https://doi.org/10.1080/07011784.2015.1006686>
- Berg, S. V. (2020). Performance Assessment Using Key Performance Indicators (KPIs) for Water Utilities: A Primer. *Water Economics and Policy*, 6(2). <https://doi.org/10.1142/S2382624X20500010>
- Bhargavi, B., Behera, U. K., Rana, K. S., Singh, R., Prasad, S., Pandey, R. N. y Singh, G. (2019). Crop diversification with high-value crops for higher productivity and profitability under irrigated ecosystems. *Indian Journal of Agronomy*, 64(4), 440-444. <https://doi.org/10.59797/ija.v64i4.5309>
- Blundell, R. y Bond, S. (1998). Initial conditions and moment restrictions in dynamic panel data models. *Journal of Econometrics*, 87(1), 115-143. [https://doi.org/10.1016/S0304-4076\(98\)00009-8](https://doi.org/10.1016/S0304-4076(98)00009-8)
- Briseño, H. (2018). Modelos tarifarios de agua en México según criterios sociales. *Tecnología y ciencias del agua*, 9(6), 173-192. <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2018-06-08>
- Briseño, H. y Macedo, E. (2021). Disposición a pagar para mejorar la calidad del agua en Zapopan [Willingness to pay to improve water quality in Zapopan]. *Tecnología y ciencias del agua*, 12(1), 1-21. <https://doi.org/10.24850/J-TYCA-2021-01-10>

- Briseño, H. y Sánchez, A. (2018). Decentralization, consolidation, and crisis of urban water management in Mexico. *Tecnología y ciencias del agua*, 9(4), 25-47. <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2018-04-02>
- Brown, C. y Lall, U. (2006). Water and economic development: The role of variability and a framework for resilience. *Natural Resources Forum*, 30(4). <https://doi.org/10.1111/j.1477-8947.2006.00118.x>
- Brown, C., Meeks, R., Ghile, Y. y Hunu, K. (2013). Is water security necessary? An empirical analysis of the effects of climate hazards on national-level economic growth. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 371(2002), 20120416. <https://doi.org/10.1098/rsta.2012.0416>
- Cao, X., Wu, P., Wang, Y., Zhao, X. y Liu, J. (2014). Analysis of production efficiency of irrigation districts based on DEA method: Take Jiangsu province as an example. *PJournal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering*, 32(2), 173-178. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1674-8530.12.0197>
- Centro de Estudios Internacionales Gilberto Bosques (CEIGB). (2015). Reunión de la Red Parlamentaria de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE), 1 de octubre de 2015, París, Francia [Archivo PDF]. https://centrogilbertobosques.senado.gob.mx/docs/LXIII_serieeuropa2.pdf
- Cetrulo, T. B., Ferreira, D. F. C., Marques, R. C. y Malheiros, T. F. (2020). Water utilities performance analysis in developing countries: On an adequate model for universal access. *Journal of Environmental Management*, 268. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110662>
- Comisión Europea. (2017). Paquete de invierno del semestre europeo. *Newsheet. UP. Internacional. Boletín internacional de Unión Profesional #86 /23 de febrero del 2017*. [Archivo PDF]. http://www2.coactfe.org/ncm/COACTFE/published_coac/DEFAULT/Rep_CSCAE_Boletines/boletin_internacional_union_profesional_86.pdf
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2019). *Estadísticas del agua en México 2019*. https://sinav30.conagua.gob.mx:8080/Descargas/pdf/EAM_2019.pdf

- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2022). *Sistema Nacional de Información del Agua (SINA)*. Gob.mx. <http://sina.conagua.gob.mx/sina/tema.php?tema=tarifas&ver=reporte&o=1&n=nacional>
- Damania, R. (2020). The economics of water scarcity and variability. *Oxford Review of Economic Policy*, 36(1), 24-44. <https://doi.org/10.1093/oxrep/grz027>
- Damania, R., Desbureaux, S., Rodella, A. S., Russ, J. y Zaveri, E. (2019). *Calidad desconocida. La crisis invisible del agua. Resumen*. Grupo Banco Mundial.
- Damania, R., Desbureaux, S. y Zaveri, E. (2020). Does rainfall matter for economic growth? Evidence from global sub-national data (1990-2014). *Journal of Environmental Economics and Management*, 102. <https://doi.org/10.1016/j.jeem.2020.102335>
- Dávila-Sandoval, T. A., Navarro-Guerrero, R. y Tovar-García, E. D. (2024). Economic Growth's Impact on Water Use and Pollution in Mexican Regions. *Water, Air, and Soil Pollution*, 235(687), 1-15. <https://doi.org/10.1007/s11270-024-07489-4>
- D'Inverno, G., Carosi, L. y Romano, G. (2021). Environmental sustainability and service quality beyond economic and financial indicators: A performance evaluation of Italian water utilities. *Socio-Economic Planning Sciences*, 75. <https://doi.org/10.1016/j.seps.2020.100852>
- Domínguez, I., Oviedo-Ocaña, E. R., Hurtado, K., Barón, A. y Hall, R. P. (2019). Assessing Sustainability in Rural Water Supply Systems in Developing Countries Using a Novel Tool Based on Multi-Criteria Analysis. *Sustainability*, 11(19). <https://doi.org/10.3390/su11195363>
- Duarte, R., Pinilla, V. y Serrano, A. (2014). Looking backward to look forward: water use and economic growth from a long-term perspective. *Applied Economics*, 46(2), 212-224. <https://doi.org/10.1080/00036846.2013.844329>
- Duarte, R., Pinilla, V. y Serrano, A. (2020). Revisiting water and economic growth from a long-term perspective. En T. Distefano (Ed.), *Water Resources and Economic Processes* (pp. 9-33). Routledge. <http://dx.doi.org/10.4324/9780429025013-3>

- El Khanji, S. y Hudson, J. (2016). Water utilization and water quality in endogenous economic growth. *Environment and Development Economics*, 21(5), 626-648. <https://doi.org/10.1017/S1355770X16000061>
- Environment and Climate Change Canada. (2022). *Canada Water Act. Annual Report to Parliament for April 2018 to March 2019*. https://publications.gc.ca/collections/collection_2020/eccc/En1-20-2019-eng.pdf
- Estruch-Juan, E., Cabrera, E., Molinos-Senante, M. y Maziotis, A. (2020). Are Frontier Efficiency Methods Adequate to Compare the Efficiency of Water Utilities for Regulatory Purposes? *Water*, 12(4). <https://doi.org/10.3390/W12041046>
- Ferreira, L., Cardoso, M. A. y Fonseca, A. (2022). Storm water systems' performance: assessment framework application to Portuguese water utilities. *International Journal of Water Resources Development*, 39(3), 459-484. <https://doi.org/10.1080/07900627.2021.2004882>
- Field, A. (2013). *Discovering Statistics Using IBM SPSS Statistics*, 4.^a ed. Sage.
- Fuentes, L. y Coll, A. (1980). Los distritos de riego en México. *Investigaciones Geográficas*, (10), 253-284.
- Gidion, D. K., Hong, J., Adams, M. Z. A. y Khoveyni, M. (2019a). Network DEA models for assessing urban water utility efficiency. *Utilities Policy*, 57, 48-58. <https://doi.org/10.1016/j.jup.2019.02.001>
- Gidion, D. K., Hong, J., Hou, B., Shillamkwese, S. S., Adams, M. Z. A. y Khoveyni, M. (2019b). Consistency in efficiency benchmarking: Urban water utility regulation with performance improvement. *Water Supply*, 19(7), 1955-1964. <https://doi.org/10.2166/ws.2019.072>
- González-Gómez, F., García-Rubio, M. A., Alcalá-Olid, F. y Ortega-Díaz, M. I. (2013). Outsourcing and Efficiency in the Management of Rural Water Services. *Water Resources Management*, 27(3), 731-747. <https://doi.org/10.1007/s11269-012-0212-0>
- Griffin, R. C. (2006). *Water Resource Economics. The Analysis of Scarcity, Policies, and Projects*, 2.^a ed. The MIT Press.

- Guerrini, A., Molinos-Senante, M. y Romano, G. (2018). Italian regulatory reform and water utility performance: An impact analysis. *Utilities Policy*, 52, 95-102. <https://doi.org/10.1016/j.jup.2018.03.005>
- Gujarati, D. y Porter, D. (2010). *Econometría*, 5.^a ed. Mc Graw Hill.
- Güngör-Demirci, G., Lee, J. y Keck, J. (2017). Measuring water utility performance using nonparametric linear programming. *Civil Engineering and Environmental Systems*, 34(3-4), 206-220. <https://doi.org/10.1080/10286608.2018.1425403>
- Güngör-Demirci, G., Lee, J. y Keck, J. (2018a). Assessing the Performance of a California Water Utility Using Two-Stage Data Envelopment Analysis. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 144(4). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0000921](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000921)
- Güngör-Demirci, G., Lee, J., Keck, J., Guzzetta, R. y Yang, P. (2018b). Determinants of non-revenue water for a water utility in California. *Journal of Water Supply: Research and Technology-Aqua*, 67(3), 270-278. <https://doi.org/10.2166/aqua.2018.152>
- Hair, J. F., Black, W. C., Babin, B. J. y Anderson, R. E. (2019). *Multivariate Data Analysis*, 8.^a ed. Cengage Learning.
- Hao, Y., Hu, X. y Chen, H. (2019). On the relationship between water use and economic growth in China: New evidence from simultaneous equation model analysis. *Journal of Cleaner Production*, 235, 953-965. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.07.024>
- Hoque, M. A., Gathala, M. K., Timsina, J., Ziauddin, M. A. T. M., Hossain, M. y Krupnik, T. J. (2023). Reduced tillage and crop diversification can improve productivity and profitability of rice-based rotations of the Eastern Gangetic Plains. *Field Crops Research*, 291. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2022.108791>
- Huang, Y. y Qu, Z. (2021). Coupling PCA and GRA-TOPSIS to Evaluate Water Use Efficiency of Irrigation Districts. *Journal of Irrigation and Drainage*, 40(5), 119-124. <https://doi.org/10.13522/j.cnki.ggps.2020129>
- Huang, Y., Zhang, Z., Li, Z., Dai, D. y Li, Y. (2022). Evaluation of water use efficiency and optimal irrigation quantity of spring maize in Hetao Irrigation District using the Noah-MP Land

Surface Model. *Agricultural Water Management*, 264.
<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2022.107498>

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2022). *Censo Agropecuario (CA) 2022*.
<https://www.inegi.org.mx/programas/ca/2022/>

Jaleta, M., Marenya, P., Beshr, B. y Erenstein, O. (2020). Does crop diversification reduce downside risk of external maize yield-enhancing technology? Evidence from Ethiopia. *African Journal of Agricultural and Resource Economics*, 15(2), 95-110.

Jiang, L., Yang, Y. y Shang, S. (2022). Remote Sensing—Based Assessment of the Water-Use Efficiency of Maize over a Large, Arid, Regional Irrigation District. *Remote Sensing*, 14(9).
<https://doi.org/10.3390/rs14092035>

Karimi, H. A., Hashemy, S. M., Kamrani, K., Maestre, J. M., Hashemi, S. E. y Liaghat, A. (2022). Prioritization of surface water distribution in irrigation districts to mitigate crop yield reduction during water scarcity. *Agricultural Water Management*, 269.
<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2022.107653>

Katz, D. (2015). Water use and economic growth: Reconsidering the Environmental Kuznets Curve relationship. *Journal of Cleaner Production*, 88, 205-213.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.08.017>

Kayaga, S. M., Kingdom, W. y Jalakam, A. (2018). Organisational design for improved performance of urban water utilities in developing countries. *Utilities Policy*, 50, 49-59.
<https://doi.org/10.1016/j.jup.2017.10.001>

Kemendi, T. J. y Tutusaus, M. (2018). The impact of pro-poor interventions on the performance indicators of a water utility: Case studies of nakuru and kisumu. *Journal of Water Sanitation and Hygiene for Development*, 8(2), 208-216. <https://doi.org/10.2166/washdev.2018.088>

Khan, H. F., Morzuch, B. J. y Brown, C. M. (2017). Water and growth: An econometric analysis of climate and policy impacts. *Water Resources Research*, 53(6), 5124-5136.
<https://doi.org/10.1002/2016WR020054>

Lal, J., Meena, R. N., Kumar, S., Meena, R., Pal, V. K. y Lawate, P. (2018). Effect of crop diversification on growth and yield of pearl millet (*Pennisetum glaucum L.*) under custard

- apple (*Annona squamosa L.*) based rainfed agri-horti system. *Journal of Pure and Applied Microbiology*, 12(2), 207-215. <https://doi.org/10.22207/JPAM.12.1.26>
- Lee, Y. C., Leite, F. y Lieberknecht, K. (2023). Prioritizing selection criteria of distributed circular water systems: A fuzzy based multi-criteria decision-making approach. *Journal of Cleaner Production*, 417. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.138073>
- Lele, U. (2022). Growing water scarcities: Responses of India and China. *Applied Economic Perspectives and Policy*, 44(1), 411-433. <https://doi.org/10.1002/aep.13146>
- Lenssen, A. W., Sainju, U. M., Jabro, J. D., Iversen, W. M., Allen, B. L. y Evans, R. G. (2014). Crop diversification, tillage, and management system influence spring wheat yield and water use. *Agronomy Journal*, 106(4), 1445-1454. <https://doi.org/10.2134/agronj14.0119>
- Li, L. (2018). Private sector participation and performance of county water utilities in China. *China Economic Review*, 52, 30-53. <https://doi.org/10.1016/j.chieco.2018.06.001>
- Maddala, G. S. y Wu, S. (1999). A Comparative Study of Unit Root Tests with Panel Data and a New Simple Test. *Oxford Bulletin of Economics and Statistics*, 61(s1), 631-652. <https://doi.org/10.1111/1468-0084.0610s1631>
- Martínez, P. F. y Vargas, A. (2017). Sistema de asignaciones, concesiones y política hídrica en México. Efectos en el derecho humano al agua [System of allocations, concessions and water policy in Mexico. Effects on the human right to water]. *Tecnología y ciencias del agua*, 8(5), 117-125. <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2017-05-08>
- Mendoza-Gómez, M., Tagle-Zamora, D., Caldera-Ortega, A. R., Mora-Rodríguez, J., Carreño-Aguilera, G. y Delgado-Galván, X. (2024). Indicadores de la gestión del suministro de agua en zonas urbanas para evaluar su sostenibilidad. *Tecnología y ciencias del agua*, 15(5), 192-240. <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2024-05-04>
- Mian, H. R., Hu, G., Hewage, K., Rodriguez, M. J. y Sadiq, R. (2023). Drinking water management strategies for distribution networks: An integrated performance assessment framework. *Journal of Environmental Management*, 325(Part. B). <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.116537>

- Mohanty, T. y Rout, H. S. (2022). Financial sustainability of rural water supply: An analysis of cost recovery, revenue collection, and efficiency. *Water and Environment Journal*, 37, 44-57. <https://doi.org/10.1111/wej.12816>
- Molinos-Senante, M., Maziotis, A. y Sala-Garrido, R. (2021). Benchmarking the economic and environmental performance of water utilities: a comparison of frontier techniques. *Benchmarking: An International Journal*, 29(10), 3176-3193. <https://doi.org/10.1108/BIJ-08-2021-0481>
- Nafi, A. y Brans, J. (2018). Prediction of Water Utility Performance: The Case of the Water Efficiency Rate. *Water*, 10(10). <https://doi.org/10.3390/w10101443>
- Navarro-Guerrero, R. y Briseño, H. (2024). Determinantes de la autosuficiencia financiera de los organismos operadores de agua mexicanos [Determinants of financial self-sufficiency of Mexican water utilities]. *Tecnología y ciencias del agua*, 15(1), 156-188. <https://doi.org/10.24850/j-tyca-15-01-04>
- Navarro-Guerrero, R., Dávila-Sandoval, T. A. y Tovar-García, E. D. (2025). El impacto de la disponibilidad y la contaminación del agua en el crecimiento económico a nivel subnacional: evidencia de México [The Impact of Water Availability and Pollution on Economic Growth at the Sub-National Level: Evidence from Mexico]. *Water Economics and Policy*. <https://doi.org/10.1142/S2382624X25400090>
- Neal, T. (2014). Panel cointegration analysis with xtpedroni. *The Stata Journal*, 14(3), 684-692.
- Negharchi, S. M. y Shafaghat, R. (2022). Evaluation of service pressure regulation strategy on the performance of a rural water network based on pulse demand; using the method of characteristics. *Water Supply*, 22(3), 3204-3223. <https://doi.org/10.2166/ws.2021.407>
- Ngobeni, V. y Breitenbach, M. C. (2021). Production and scale efficiency of South African water utilities: The case of water boards. *Water Policy*, 23(4), 862-879. <https://doi.org/10.2166/wp.2021.055>
- Nithammer, C. M., Mahabir, J. y Dikgang, J. (2022). Efficiency of South African water utilities: a double bootstrap DEA analysis. *Applied Economics*, 54(26), 3055-3073. <https://doi.org/10.1080/00036846.2021.2002802>

- Novotny, V., Ahern, J. y Brown, P. (2010). *Water Centric Sustainable Communities: Planning, Retrofitting, and Building the Next Urban Environment*. En *Water Centric Sustainable Communities: Planning, Retrofitting, and Building the Next Urban Environment* (pp. 539-593). John Wiley & Sons.
- Organización de las Naciones Unidas (ONU). (2015). *Transformar nuestro mundo: la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible*. https://unctad.org/system/files/official-document/ares70d1_es.pdf
- Organización de las Naciones Unidas (ONU). (2021). *The Sustainable Development Goals Report, 2021*. <https://unstats.un.org/sdgs/report/2021/>
- Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO). (2019). *Informe Mundial sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2019 de las Naciones Unidas: Sin dejar a nadie atrás*. <https://www.unesco.org/en/wwap/wwdr/2019>
- Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO). (2020). *UN World Water Development Report 2020–Water and Climate Change*. <https://www.unesco.org/en/wwap/wwdr/2020>
- Oster, E. (2019). Unobservable Selection and Coefficient Stability: Theory and Evidence. *Journal of Business and Economic Statistics*, 37(2), 187-204. <https://doi.org/10.1080/07350015.2016.1227711>
- Ostrom, E. (2015). *Governing the Commons: The Evolution of Institutions for Collective Action*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9781316423936>
- Palacios-Vélez, E., Palacios-Sánchez, L. y Espinosa-Espinosa, J. L. (2019). Estimación temprana del rendimiento de la cosecha de trigo en el distrito de riego 038, Río Mayo, Sonora, México [Early estimation of the wheat crop yield in irrigation district 038, Río Mayo, Sonora, México]. *Tecnología y ciencias del agua*, 10(2), 225-240. <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2019-02-08>
- Parliamentary Network (2015, octubre 15). *OECD Global Parliamentary Network Meeting*. <https://www.parlnet.org/oecd-global-parliamentary-network-debrief/>

- Pedroni, P. (1999). Critical Values for Cointegration Tests in Heterogeneous Panels with Multiple Regressors. *Oxford Bulletin of Economics and Statistics*, 61, 653-670. <https://doi.org/10.1111/1468-0084.0610s1653>
- Pedroni, P. (2004). Panel Cointegration: Asymptotic and Finite Sample Properties of Pooled Time Series Tests with an Application to the PPP Hypothesis. *Econometric Theory*, 20(03), 597-625. <https://doi.org/10.1017/S0266466604203073>
- Pereira, A. P. P. y Mata-Lima, H. (2021). Assessing Energy Efficiency in Water Utilities Using Long-term Data Analysis. *Water Resources Management*, 35(9), 2763-2779. <https://doi.org/10.1007/s11269-021-02866-8>
- Pesaran, M. H. (2007). A simple panel unit root test in the presence of cross-section dependence. *Journal of Applied Econometrics*, 22(2), 265-312. <https://doi.org/10.1002/jae.951>
- Pineda, N. y Salazar, A. (2016). Ciudades y sequía en México. La gestión del agua como estrategia crítica de mitigación [Cities and drought in Mexico. Water management as a mitigation critical strategy]. *Tecnología y ciencias del agua*, 7(5), 95-113. <https://www.revistatyca.org.mx/index.php/tyca/article/view/1273>
- Pinto, F. S., Costa, A. S., Figueira, J. R. y Marques, R. C. (2017). The quality of service: An overall performance assessment for water utilities. *Omega*, 69, 115-125. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2016.08.006>
- Productivity Commission (2021). *National Water Reform 2020: Inquiry Report*. Australian Government. <https://www.pc.gov.au/inquiries/completed/water-reform-2020/report>
- Pulido, M., Cabrera, E. y Garrido, A. (2014). Economía del agua y gestión de recursos hídricos. *Ingeniería del agua*, 18(1), 99-110. <https://doi.org/10.4995/ia.2014.3160>
- Ringler, C., Zhu, T., Cai, X., Koo, J. y Wang, D. (2010). Climate Change Impacts on Food Security in Sub-Saharan Africa Insights from Comprehensive Climate Change Scenarios. IFPRI Discussion Paper 01042. <https://core.ac.uk/download/pdf/6237699.pdf>
- Río Arronte e Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA). (2021). *Sistema de información para incentivar el cobro-pago del agua*. <http://www.fgra-cobro-pago.org.mx/>

- Robles-Velasco, A., Rodríguez-Palero, M., Muñuzuri, J. y Onieva, L. (2022). Sustainable Development and Efficiency Analysis of the Major Urban Water Utilities in Spain. *Water*, 14(9). <https://doi.org/10.3390/w14091519>
- Rogers, P., Bhatia, R. y Huber, A. (1998). *Water as a Social and Economic Good: How to Put the Principle into Practice*. Global Water Partnership Technical Advisory Committee (TAC).
- Romano, G., Molinos-Senante, M. y Guerrini, A. (2017). Water utility efficiency assessment in Italy by accounting for service quality: An empirical investigation. *Utilities Policy*, 45, 97-108. <https://doi.org/10.1016/j.jup.2017.02.006>
- Romano, G., Salvati, N. y Guerrini, A. (2018). Governance, strategy and efficiency of water utilities: The Italian case. *Water Policy*, 20(1), 109-126. <https://doi.org/10.2166/wp.2017.172>
- Romer, P. M. (1994). The Origins of Endogenous Growth. *Journal of Economic Perspectives*, 8(1), 3-22.
- Roodman, D. (2009). How to do xtabond2: An introduction to difference and system GMM in Stata. *The Stata Journal*, 9(1), 86-136.
- Rosegrant, M. W., Cai, X. y Cline, S. A. (2002). *World Water and Food to 2025: Dealing with Scarcity*. International Food Policy Research Institute.
- Russ, J., Zaveri, E., Desbureaux, S., Damania, R. y Rodella, A. S. (2022). The impact of water quality of GDP growth: Evidence from around the world. *Water Security*, 17. <https://doi.org/10.1016/j.wasec.2022.100130>
- Sadoff, C. W., Hall, J. W., Grey, D., Aerts, J. C. J. H., Ait-Kadi, M., Brown, C., Cox, A., Dadson, S., Garrick, D., Kelman, J., McCornick, P., Ringler, C., Rosegrant, M., Whittington, D. y Wiberg, D. (2015). *Securing Water, Sustaining Growth: Report of the GWP/OECD Task Force on Water Security and Sustainable Growth*. University of Oxford. <https://www.gwp.org/globalassets/global/about-gwp/publications/the-global-dialogue/securing-water-sustaining-growth.pdf>
- Salazar-Adams, A. (2021). The efficiency of post-reform water utilities in Mexico. *Utilities Policy*, 68. <https://doi.org/10.1016/j.jup.2020.101153>

- Sammauria, R., Meena, O. P., Yadav, M. R., Gupta, K. C., Gupta, A. K. y Yadav, H. L. (2020). Crop diversification of predominant pearl millet based cropping system for higher productivity, resource-use efficiency and profitability in semi-arid rajasthan. *Legume Research*, 43(4), 568-572. <https://doi.org/10.18805/LR-4077>
- Sebri, M. (2016). Testing the environmental Kuznets curve hypothesis for water footprint indicator: a cross-sectional study. *Journal of Environmental Planning and Management*, 59(11), 1933-1956. <https://doi.org/10.1080/09640568.2015.1100983>
- Silva, J. A., Trujillo, M. M. y Lambarry-Vilchis, F. (2018). Drinking water management description in Mexico. *Management of Environmental Quality*, 29(5), 922-937. <https://doi.org/10.1108/MEQ-04-2017-0038>
- Solow, R. M. (1956). A Contribution to the Theory of Economic Growth. *The Quarterly Journal of Economics*, 70(1), 65-94. <https://doi.org/10.2307/1884513>
- Soto-García, M., Martínez-Alvarez, V., García-Bastida, P. A., Alcon, F. y Martin-Gorriz, B. (2013). Effect of water scarcity and modernisation on the performance of irrigation districts in south-eastern Spain. *Agricultural Water Management*, 124, 11-19. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2013.03.019>
- Stern, N. (2008). The Economics of Climate Change. *The American Economic Review*, 98(2), 1-37.
- Tabachnick, B. G. y Fidell, L. S. (2019). *Using Multivariate Statistics*, 7.^a ed. Pearson
- Tskhai, A. (2020). Model for evaluating the efficiency of Russian water utilities. *Utilities Policy*, 62. <https://doi.org/10.1016/j.jup.2019.100986>
- Tskhai, A. (2022). The impact of increasing environmental requirements on the efficiency of water utilities: Russian case. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 24(2), 633-644. <https://doi.org/10.1007/s10098-021-02133-9>
- Villalobos-Cano, O., Santellano-Estrada, E., Stringam, B. L., Grover, K. y Esparza-Vela, E. (2024). Estimating Water Use Efficiency for Major Crops in Chihuahua, Mexico: Crop Yield Function Models vs. Evapotranspiration. *Sustainability*, 16(5). <https://doi.org/10.3390/su16051851>

- Walker, N. L., Williams, A. P. y Styles, D. (2020). Key performance indicators to explain energy & economic efficiency across water utilities, and identifying suitable proxies. *Journal of Environmental Management*, 269. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110810>
- World Bank Group. (2016, mayo 13). *High and Dry: Climate Change, Water, and the Economy*. <https://www.worldbank.org/en/topic/water/publication/high-and-dry-climate-change-water-and-the-economy>
- Yan, J. (2019). Spatiotemporal analysis for investment efficiency of China's rural water conservancy based on DEA model and Malmquist productivity index model. *Sustainable Computing: Informatics and Systems*, 21, 56-71. <https://doi.org/10.1016/j.suscom.2018.11.004>
- Zhang, T. y Shen, D. (2022). Can recycled water policy in China adapt to local conditions: A policy implementation perspective. *Journal of Cleaner Production*, 380. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.134840>
- Zhao, X., Fan, X. y Liang, J. (2017). Kuznets type relationship between water use and economic growth in China. *Journal of Cleaner Production*, 168, 1091-1100. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.08.189>
- Zirogiannis, N. y Tripodis, Y. (2018). Dynamic factor analysis for short panels: estimating performance trajectories for water utilities. *Statistical Methods and Applications*, 27(1), 131-150. <https://doi.org/10.1007/s10260-017-0394-y>