

Revista de Ciencias Sociales

50 *Años*
ANIVERSARIO

Economía circular del agua en Latinoamérica: Un análisis de eficiencia y productividad

Sánchez Calderón, Marcos*
Gutiérrez Rojas, Cristián**
Viancos-González, Patricio***
González, Patricia****

Resumen

Con el incremento de la temperatura global y la creciente escasez de agua, el análisis del uso eficiente de este recurso se vuelve crucial. El objetivo principal de este estudio es evaluar la economía circular del agua mediante un análisis de eficiencia para un grupo de trece países latinoamericanos. Se emplea la metodología de Análisis Envoltante de Datos para determinar los niveles de eficiencia global, técnica y de escala correspondientes al año 2020. Además, se utiliza el Índice de Malmquist para calcular los cambios en la productividad entre los años 2018 y 2020. Los resultados del análisis muestran que Brasil y Chile se destacan como países eficientes, ya que logran maximizar el volumen de tratamiento de aguas residuales en relación con la cantidad de insumos utilizados. En contraste, los otros once países presentan una gestión ineficiente y deben realizar esfuerzos significativos para alcanzar la frontera de eficiencia. La principal contribución de este estudio radica en proporcionar una herramienta para identificar posibles fuentes de ineficiencia y servir de referencia para la toma de decisiones de los responsables en la gestión de recursos hídricos.

Palabras clave: Agua; análisis envoltante de datos; economía circular, eficiencia; índice de malmquist.

* Máster en Economía. Académico del Departamento de Seguridad y Defensa en la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, Sangolquí, Ecuador. E-mail: mgsanchez7@espe.edu.ec ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5638-9882>

** Doctor en Economía. Académico de la Facultad de Ingeniería y Empresa en la Universidad Católica Silva Henríquez, Santiago, Chile. E-mail: cgutierrez@ucsh.cl ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8607-1528>

*** Doctor en Política y Gestión Educativa. Investigador en la Universidad de Tarapacá, Arica, Tarapacá, Chile. E-mail: pbiancos@gestion.uta.cl ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4550-3608> (Autor de correspondencia)

**** Doctoranda en Educación con mención en Gestión Educativa. Magíster en Educación con mención en Gestión de Calidad. Psicóloga. Profesora en la Universidad Miguel de Cervantes, Santiago, Chile. E-mail: patricia.gonzalez@profe.umc.cl ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1511-8442>

Circular economy of water in Latin America: An efficiency and productivity analysis

Abstract

With the increase in global temperature and increasing water scarcity, the analysis of the efficient use of this resource becomes crucial. The main objective of this study is to evaluate the circular economy of water through an efficiency analysis for a group of thirteen Latin American countries. The Data Envelopment Analysis methodology is used to determine the levels of global, technical and scale efficiency corresponding to the year 2020. In addition, the Malmquist Index is used to calculate the changes in productivity between the years 2018 and 2020. The results of the analysis show that Brazil and Chile stand out as efficient countries, since they manage to maximize the volume of wastewater treatment in relation to the amount of inputs used. In contrast, the other eleven countries present inefficient management and must make significant efforts to reach the efficiency frontier. The main contribution of this study lies in providing a tool to identify possible sources of inefficiency and serve as a reference for decision-making by those responsible for water resource management.

Keywords: Water; data envelopment analysis; circular economy; efficiency; Malmquist index.

Introducción

El recurso agua se está agotando principalmente debido al crecimiento de la población y al cambio climático (Louzada, 2020). En este contexto, la Fundación Endesa (2021) destaca que la disminución de los recursos de agua dulce está directamente vinculada con la expansión urbana. Se estima que para el año 2050, el 85% de la población mundial vivirá en áreas urbanas, lo que implicará un aumento de los problemas relacionados con la escasez de agua en las próximas décadas.

La carencia de agua se atribuye principalmente a factores socioeconómicos, climáticos y demográficos, tales como los efectos del cambio climático, desastres naturales, contaminación, crecimiento de la población, conflictos, pobreza extrema y la falta de infraestructuras adecuadas (García, 2020; Zhindon-Almeida, Sánchez-Ancajima y Castañeda-Guzmán, 2024). Autores como Roccaro (2018); Voulvoulis (2018); y, Muñoz y Bustos (2021), consideran que factores como la escasez de agua en regiones áridas y semiáridas, las preocupaciones de seguridad

hídrica en áreas donde la demanda de agua supera su disponibilidad, y los estrictos y costosos requisitos para la eliminación de contaminantes de los efluentes antes de su descarga en aguas superficiales han impulsado la reutilización del agua como una fuente alternativa.

Según la Fundación CONAMA (2019), el uso del agua, en la mayoría de los casos, requiere un sistema de saneamiento que recoja las aguas residuales a través de redes de alcantarillado y las depure antes de devolverlas al sistema hidrológico o regenerarlas para ser reutilizadas. La circularidad del agua no solo implica el desarrollo de la reutilización y la desalación, sino también otros procesos clave como la potabilización, el dimensionamiento, la detección de fugas, la depuración, el drenaje urbano y la integración entre agua y energía, entre otros; estos factores son complementarios e interdependientes (Cerdá y Khalilova, 2016; Brears, 2020). Realizar un uso eficiente de este recurso es una de las principales prioridades de las entidades estatales encargadas de su gestión.

En las últimas décadas, la economía circular se ha consolidado como un enfoque

atractivo para aumentar el bienestar global y minimizar los impactos ambientales de las actividades económicas dentro de un sistema industrial restaurador o regenerativo, ya sea por intención o diseño (Oblitas et al., 2019; Donati et al., 2020; Núñez-Tabales, Del Amor-Collado y Rey-Carmona, 2021). Según Brears (2020), la economía circular se centra en el reciclaje, la limitación y la reutilización de los insumos físicos de la economía, así como en el uso de residuos como recursos, lo que conduce a una reducción en el consumo de recursos primarios.

En este sentido, el uso de indicadores para medir el desempeño de la economía circular ha aumentado. La Fundación Ellen MacArthur, ha sido una gran promotora, al igual que los estudios de autores como Ihobe (2018); Giannakitsidou, Giannikos y Chondrou (2020); y, Robaina et al. (2020), quienes han desarrollado indicadores para evaluar el desempeño y la eficiencia de los países de la Unión Europea en la economía circular. Sin embargo, estos indicadores están principalmente orientados a la gestión de residuos sólidos. Los esquemas conceptuales sobre economía circular publicados hasta la fecha priorizan los ciclos de materiales, generalmente representados mediante círculos que simbolizan cierres simples de materiales; no obstante, el sector del agua rara vez se presenta de forma explícita a pesar de su importancia (Fundación CONAMA, 2019).

En la mayoría de los países, el tratamiento de aguas residuales es responsabilidad de los gobiernos locales, es decir, es un servicio público. Existen varios métodos para evaluar la eficiencia en la prestación de estos servicios, los cuales se agrupan en modelos de frontera y no-frontera.

Uno de los métodos de frontera no paramétricos más utilizados es el Análisis Envoltvente de Datos (DEA) (Cook y Seiford, 2009). Para su aplicación, es necesario definir las Unidades Tomadoras de Decisiones (DMU, por sus siglas en inglés), que pueden ser países, regiones, municipios o empresas, y que tienen capacidades similares para convertir múltiples insumos en múltiples productos. Esta metodología determina una relación

óptima entre los insumos y los resultados, combinando el rendimiento real con el ideal para evaluar la eficiencia (Bogetoft y Otto, 2011). En las últimas décadas, el uso del DEA se ha extendido a múltiples organizaciones del sector público, incluidas aquellas sin ánimo de lucro, como es el caso del servicio de gestión de residuos (Huguenin, 2012).

Es importante señalar que los estudios académicos sobre la circularidad de la economía en los países de América Latina han aumentado considerablemente en los últimos años. No obstante, aún no se ha encontrado evidencia empírica que permita comparar el desempeño de la economía circular en el tratamiento eficiente de las aguas residuales a nivel estatal.

Para llenar este vacío, el objetivo principal de este estudio es realizar una evaluación comparativa mediante la metodología DEA y el Índice de Malmquist en una muestra de trece países de Centro y Sur América. Se utilizaron como insumos la extracción de agua, la producción de agua y las instalaciones para su tratamiento, y como resultado el agua tratada. Los datos fueron obtenidos de *AQUASTAT*, un sitio *web* oficial de la Organización de las Naciones Unidas, para los años 2018 y 2020. Se espera proporcionar información relevante que permita a los países comprender mejor sus propias prácticas, comparar sus logros a nivel internacional y aprender de las experiencias de otros países que enfrentan desafíos similares.

La estructura del artículo es la siguiente: Tras esta breve introducción al tema, en el segundo apartado se presenta la fundamentación teórica; en el tercero, se describen la metodología, los datos y las variables, luego se exponen y discuten los resultados obtenidos, clasificando a los países entre eficientes y no eficientes; y finalmente, en el último apartado se presentan las conclusiones.

1. Fundamentación teórica

Winans, Kendall y Deng (2017),

señalan que el concepto de economía circular se popularizó en China en la década de 1990 como respuesta al crecimiento económico y a las limitaciones de los recursos naturales. Según Yong (2007), la economía circular busca resolver estos problemas reduciendo el flujo de materiales y logrando un equilibrio entre el ecosistema y el sistema socioeconómico. Este autor destaca que el enfoque de la economía circular incluye principalmente dos elementos: 1) La reestructuración de los flujos de materiales de un modelo lineal a uno circular; y, 2) el aumento de la eficiencia en la utilización de recursos y la reducción de la intensidad de las emisiones.

Dada la importancia del tratamiento y reutilización de las aguas residuales, algunos autores, como Mavhungu et al. (2020), consideran que la introducción de la economía circular en este ámbito puede promover la gestión sostenible de las crecientes cantidades de aguas residuales municipales, abordando al mismo tiempo problemas emergentes como la falta de agua. Los estudios sobre la economía circular del agua están en aumento y, en general, se enfocan en el desarrollo de tecnologías innovadoras para optimizar el tratamiento de las aguas residuales municipales y la gestión de residuos sólidos orgánicos. Entre los principales autores en este campo se encuentran Casiano et al. (2018); Voulvoulis (2018); Nika et al. (2020); Roychand et al. (2020); y, Kaszycki, Głodniok y Petryszak (2021).

La aplicación del DEA para evaluar la eficiencia de la economía circular en el manejo del agua ha sido explorada por varios investigadores. Byrnes (1987), estudió la relación entre la forma de propiedad y la eficiencia en una muestra de empresas públicas y privadas de suministro de agua en EE.UU. en 1976, encontrando que las diferencias en las tecnologías y entornos operativos justifican las variaciones en sus medidas de eficiencia. Lambert, Dichev y Raffiee (1993), analizaron la eficiencia relativa de empresas públicas y privadas de suministro de agua, concluyendo que las empresas públicas son generalmente más eficientes, especialmente en la eficiencia

técnica relacionada con la mano de obra, capital, energía e insumos materiales, y que la ineficiencia se debe en gran medida al uso excesivo de capital.

Picazo-Tadeo, González-Gómez y Sáez-Fernández (2009), evaluaron la eficiencia de empresas españolas de suministro de agua, destacando que las puntuaciones de eficiencia ajustadas a nivel de insumo mejoran la evaluación del rendimiento empresarial, y que factores ambientales como la propiedad y la estacionalidad de la demanda afectan la gestión técnica de los insumos. Gupta, Kumar y Sarangi (2012), analizaron la eficiencia de las empresas de suministro de agua en 27 ciudades de la India en 2004-2005, aplicando un modelo de rendimientos constantes a escala (CRS) con orientación a los productos, y encontraron que las empresas gestionadas por corporaciones municipales y paraestatales superan a las gestionadas por el gobierno local.

Lo Storto (2013), evalúa la eficiencia de 21 operadores de servicios de agua con capital privado o público-privado y 32 con capital público, analizando los factores de control que influyen en su desempeño. Los insumos considerados incluyen el coste total de producción, la longitud de la red de acueducto y la de alcantarillado; mientras que el producto se mide a través de los ingresos por los servicios prestados. La metodología utilizada se desarrolla en dos etapas: Primero, un modelo de retornos variables a escala (VRS) orientado a los insumos; y segundo, un modelo *Tobit bootstrapped*. Los resultados muestran ineficiencias operativas entre los operadores y señalan que las economías de escala y de aglomeración pueden influir significativamente en la eficiencia.

Hsu y Lee (2014), utilizan como insumos las funciones del gasto público, con énfasis en la protección del medio ambiente, y como producto la tasa de crecimiento del PIB per cápita, analizando 18 países de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE) durante el período 1995-2002. Aplican modelos CRS y VRS, ambos orientados a los insumos. Los resultados principales revelan que 14 países

muestran rendimientos variables a escala, lo que sugiere que podrían reducir su ineficiencia técnica aprovechando economías de escala internas.

Ablanedo-Rosas et al. (2020), llevaron a cabo un análisis exhaustivo de la eficiencia en empresas mexicanas de suministro de agua durante 2016, empleando un modelo DEA orientado a insumos junto con un análisis de regresión truncada *bootstrap*. Los insumos considerados fueron la distribución de agua, el número de empleados y las cuentas con pago puntual; mientras que los productos evaluados incluyeron los ratios de coste de producción, el volumen de agua producida y los gastos totales. Los resultados sugieren que las empresas deben enfocarse en reducir las fugas y mejorar la cobertura del alcantarillado para incrementar su eficiencia.

Finalmente, Bronner, See y Yu (2022) desarrollaron un modelo DEA dinámico que permite analizar simultáneamente el suministro público de agua, los servicios de aguas residuales y la dotación natural de agua, considerando también la demanda hídrica. Este modelo, aplicado a la economía del agua en Alemania durante el período 2013-2016, proporciona una visión exhaustiva del rendimiento a nivel de los estados federales. Con una doble orientación, el modelo identifica tanto la sobreutilización de insumos como los déficits de producción. Los resultados del estudio revelan, en general, altos niveles de eficiencia en Alemania.

Algunos estudios en el contexto latinoamericano se han enfocado únicamente en el análisis de la eficiencia del recurso hídrico mediante el enfoque DEA, sin abordar el tema de la economía circular. Entre estos estudios se encuentran los de Cunha y Garzón (2007); Scaratti, Michelon y Scaratti (2013); Urrunaga y Jara (2013); y, Salas y Salcedo (2014).

Los hallazgos destacan un creciente interés académico en la economía circular aplicada a la gestión del agua, especialmente en el tratamiento de aguas residuales. Sin embargo, se identifican vacíos en la literatura, particularmente en América Latina, donde la integración de la economía circular en la

gestión del agua es aún limitada. La mayoría de los estudios se centran en la eficiencia operativa de las empresas de suministro, pero no abordan de manera integral cómo los principios de circularidad pueden transformar estos sistemas. Se requiere un enfoque más holístico que incorpore tecnologías innovadoras y modelos de gestión sostenibles para enfrentar los desafíos de la escasez de agua y promover la resiliencia en un contexto de creciente urbanización y cambio climático.

2. Metodología

2.1. Método de estimación

El DEA, desarrollado por Charnes, Cooper y Rhodes (1978), se ha destacado en estudios que evalúan la eficiencia, productividad y rendimiento de un conjunto de unidades. Su flexibilidad y capacidad de adaptación a diversos problemas han facilitado su aplicación en numerosos campos, como la energía, la agricultura, la banca y la industria (Emrouznejad y Yang, 2018), así como en políticas públicas (Zeng, 2019; Mao et al., 2020; Lopes et al., 2020; Benito, Martínez-Córdoba y Guillamón, 2021; Zou et al., 2021; Yadava y Neog, 2022). Aunque su uso sigue siendo limitado en el análisis de residuos sólidos y líquidos, su aplicación está en expansión.

La metodología DEA compara la eficiencia técnica de organizaciones o DMU que operan en entornos similares y que manejan múltiples insumos y productos. Una DMU se considera eficiente si no hay ninguna otra DMU o combinación lineal de DMU que pueda mejorar alguno de sus productos (DEA orientado a salidas) o insumos (DEA orientado a entradas) sin empeorar la eficiencia de otra DMU. Una DMU es eficiente cuando alcanza la unidad, lo que indica que está en la frontera de producción, de acuerdo con el criterio de Pareto (Benito et al., 2021).

El primer paso para aplicar esta metodología es definir y seleccionar la unidad a evaluar. A continuación, se deben elegir

los insumos y productos sobre los cuales los directivos tienen mayor influencia y control (Aristovnik, Seljak y Mencinger, 2014). El tercer paso consiste en seleccionar el tipo de rendimiento a escala, que define la forma de la frontera de eficiencia. Los modelos clásicos son: CCR, formulado por Charnes et al. (1978), que considera retornos constantes a escala (*Constant Return to Scale*, CRS), y BCC, desarrollado por Banker, Charnes y Cooper (1984), que considera retornos variables a escala (*Variable Return to Scale*, VRS). El modelo BCC, una variación del CCR, añade una restricción para asegurar que cada DMU se compare con otras de tamaño similar. Todos los modelos DEA buscan estimar la tecnología mediante extrapolación mínima, aunque difieren en los supuestos utilizados (Bogetoft y Otto, 2011).

En el cuarto paso se especifica el concepto de distancia, seleccionando la medida de proximidad de cada DMU respecto al punto proyectado en la frontera de eficiencia. El DEA ofrece dos enfoques: Uno de minimización de insumos, que busca reducirlos mientras se mantiene el nivel de producción; y otro de maximización de producción, que busca

aumentarla con los insumos actuales.

Los gobiernos enfrentan una creciente presión en la gestión de servicios públicos debido a la alta demanda y los recursos financieros limitados. Los trece países en la muestra luchan con presupuestos ajustados mientras intentan mantener la estabilidad en los servicios, lo que les impide operar a escala óptima (Parra, García y Rodríguez, 2015). Reducir costos y mejorar el servicio simultáneamente parece un objetivo difícil, por lo que mejorar la eficiencia para maximizar la producción con recursos limitados surge como una solución viable (Akdogan, 2012; Benito et al., 2021). En este análisis DEA se han utilizado los modelos CCR y BCC, orientados a la producción, para maximizar los resultados con el nivel de recursos disponible (Benito, Bastida y García, 2010).

En el Cuadro 1, se presentan los modelos en su forma dual, conocida como forma envolvente. A menudo se prefiere resolver el cálculo utilizando la forma envolvente, puesto que contiene solo $s + m$ restricciones, en lugar de $n + l$ restricciones como en la forma multiplicadora (Huguenin, 2012).

Cuadro 1
Modelos DEA orientados a las salidas con holguras

| CCR | BCC |
|---|---|
| $MAX: v_j + \varepsilon \left[\sum_{k=1}^s h_k^+ + \sum_{i=1}^m h_i^- \right]$ | $MAX: v_j + \varepsilon \left[\sum_{k=1}^s h_k^+ + \sum_{i=1}^m h_i^- \right]$ |
| Sujeto a las restricciones: | Sujeto a las restricciones: |
| $\sum_{j=1}^n x_{ij} \lambda_j = x_{ij} - h_i^- \quad i = 1, 2, \dots, m$ | $\sum_{j=1}^n x_{ij} \lambda_j = x_{ij} - h_i^- \quad i = 1, 2, \dots, m$ |
| $\sum_{j=1}^n y_{kj} \lambda_j = y_j y_{kj} + h_k^+ \quad k = 1, 2, \dots, s$ | $\sum_{j=1}^n y_{kj} \lambda_j = y_j y_{kj} + h_k^+ \quad k = 1, 2, \dots, s$ |
| $\lambda_j, h_i^-, h_k^+ \geq 0$ | $\sum_{j=1}^n \lambda_j = 1$ |
| $v_j \text{ libre}$ | $\lambda_j, h_i^-, h_k^+ \geq 0$ |
| | $v_j \text{ libre}$ |

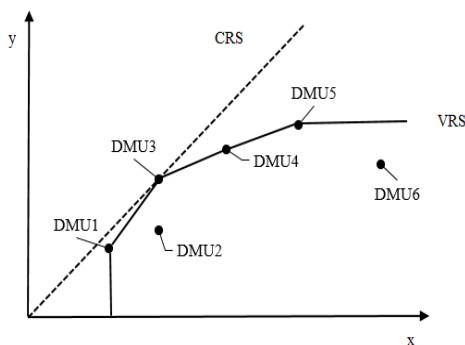
Fuente: Elaboración propia, 2024 a partir de Huguenin (2012).

Donde: i es un subíndice para los insumos; k es un subíndice para las salidas; x_{ij} representa la cantidad de insumos i consumidos por la DMU j ; y_{kj} denota la cantidad de productos k producidos por la DMU j ; n es el conjunto de DMU a evaluar, que consumen m entradas para producir s salidas; h_k^+ y h_i^- son las variables de holgura correspondientes a las $s + m$ restricciones existentes; λ_j son las variables de intensidad; y_j es la eficiencia relativa de cada DMU. El modelo CRS puede modificarse relajando la hipótesis de rendimientos constantes a escala al añadir una restricción de convexidad $\sum_{j=1}^n \lambda_j = 1$ en la ecuación dual.

La aplicación de esta metodología se realiza para cada DMU mediante un modelo

de programación lineal no paramétrico, con el objetivo de estimar una frontera lineal a trozos, determinada por las DMU eficientes. Por esta razón, no se impone ninguna restricción en la forma funcional de la relación entre insumos y productos (Charnes et al., 1997).

En la Figura I, se muestra la frontera de eficiencia CRS (línea discontinua) y la frontera de eficiencia VRS (línea continua), para ilustrar un ejemplo sencillo con una entrada y una salida. Se observa que solo la DMU3 se encuentra en ambas fronteras. Las DMU1, DMU4, y DMU5 son eficientes bajo el supuesto VRS, pero ineficientes bajo el supuesto CRS. Las DMU2 y DMU6 son ineficientes en ambas especificaciones.



Fuente: Elaboración propia, 2024.

Figura I: Retornos de escala constantes versus variables

La metodología DEA se utiliza frecuentemente para estimar la eficiencia de varias DMU en un periodo de tiempo específico, lo que puede hacer que los resultados reflejen las condiciones de ese momento en particular. Para evaluar los cambios en los niveles de productividad, en lugar de la eficiencia, se emplea el índice de *Malmquist*, que mide la evolución de la eficiencia relativa de cada DMU a lo largo del tiempo (García-Sánchez, Rodríguez-Domínguez y Parra-Domínguez, 2013). Färe et al. (1994), demuestran cómo estimar las funciones de distancia de *Shephard*

en dos años consecutivos, utilizando métodos similares a los del DEA (Chen, 2017). Además, muestran que los índices de Productividad Total de los Factores (PTF) resultantes pueden descomponerse en dos componentes: Cambio en la eficiencia técnica y cambio técnico (Martínez y Rueda, 2013).

Desde la perspectiva de la producción, estos índices permiten interpretar las diferencias de productividad como capacidades variadas, dadas las restricciones tecnológicas, para incrementar la producción sin consumir más recursos (García-Sánchez et al., 2013).

Valores de los índices superiores a 1 indican que la DMU es más productiva en el segundo año en comparación con el primero.

2.2. Datos y descripción de variables

En este estudio, se han seleccionado como DMU a trece países de Centro y Sur América, basados en su capacidad para regenerar residuos líquidos o aguas residuales. Se recopilieron series completas de datos para los años 2018 y 2020, provenientes principalmente de AQUASTAT (2023), un portal de la Organización de las Naciones Unidas que proporciona estadísticas nacionales sobre medio ambiente, salud, geografía, población, desarrollo de riego y drenaje, recursos hídricos, y uso del agua.

Siguiendo el ciclo de la economía circular del agua propuesto por Bronner et al. (2022), se han seleccionado las siguientes variables para los cálculos de eficiencia:

a. Insumos: Extracción de agua total, medida en $\text{km}^3/\text{año}$ o $10^9 \text{ m}^3/\text{año}$; Aguas municipales producidas, medidas en $\text{km}^3/\text{año}$ o $10^9 \text{ m}^3/\text{año}$; y, Número de habitantes urbanos por instalación municipal de tratamiento de aguas residuales. De acuerdo con Zou et al. (2021), una mayor inversión de los gobiernos locales en la capacidad de tratamiento de aguas residuales puede reducir la contaminación ambiental y mitigar pérdidas por desastres.

b. Producción: Agua residual tratada (primaria, secundaria y terciaria) producida anualmente por las instalaciones municipales de tratamiento de aguas residuales de cada país, medida en $\text{km}^3/\text{año}$ o $10^9 \text{ m}^3/\text{año}$ (Halkos y Petrou, 2019).

Al igual que en el análisis de regresión,

no se puede garantizar la inclusión de todas las variables relevantes; sin embargo, se seleccionaron aquellas con sentido práctico y datos específicos disponibles. Esto no descarta la existencia de otras variables potencialmente apropiadas, pero las elegidas son suficientes para demostrar la validez del enfoque metodológico.

3. Resultados y discusión

El análisis de la economía circular del agua se realizó aplicando los modelos CCR y BCC orientados a la producción, con datos correspondientes al año 2020. El modelo CCR permite calcular la Eficiencia Global (EG), considerando como unidad de referencia aquella con mayor eficiencia entre todas las estudiadas. Por su parte, el modelo BCC calcula la Eficiencia Técnica (ET), utilizando como referencia la unidad más eficiente dentro de su tamaño. La Eficiencia de Escala (EE), se obtiene a partir del cociente entre los dos índices.

La Tabla 1, presenta los estadísticos descriptivos de las variables analizadas. El análisis de correlaciones entre los insumos y las salidas, mostró una alta correlación positiva y significativa entre las variables de agua extraída, agua producida y agua tratada. Este resultado es consistente, puesto que estas variables corresponden a diferentes etapas del ciclo de circularidad del recurso hídrico. Además, indica que los esfuerzos para mejorar la eficiencia en una etapa pueden tener un impacto positivo en las demás, resaltando la importancia de una gestión integrada del agua. Los resultados presentados a continuación fueron obtenidos utilizando los *softwares* *DEA-Solver* y *RStudio*.

Tabla 1
Estadísticos descriptivos

| Variable | Mínimo | Promedio | Máximo | Desviación Estándar |
|---|--------|----------|-----------|---------------------|
| Agua extraída | 0,14 | 3,61 | 16,13 | 5,18 |
| Agua producida | 0,11 | 2,28 | 10,98 | 3,49 |
| Habitantes por instalación de tratamiento | 4.056 | 318.573 | 1.676.794 | 453.504 |
| Agua tratada | 0,01 | 1,00 | 6,50 | 2,06 |

Fuente: Elaboración propia, 2024.

En la Tabla 2, se presenta las puntuaciones de eficiencia que arrojaron los modelos DEA aplicados. Las puntuaciones de EG muestran una media del 45,16%, lo que indica que más de la mitad de los países no operan a su escala óptima. Once países fueron clasificados como ineficientes, con una

puntuación media del 35,19%. Al relajar el supuesto de CRS, los índices de ET aumentan, con un promedio de 67,12% reflejando una mejor utilización de los factores productivos para maximizar la producción. Sin embargo, diez países siguen siendo ineficientes, con una puntuación media del 57,26%.

Tabla 2
Resultado Modelos CCR y BCC, orientación output, año 2020

| Países | EG (%) | ET (%) | EE (%) | Clasificación EE | Tipo Rend. Escala | Super-eficiencia (%) |
|-------------------------|--------|--------|--------|------------------|-------------------|----------------------|
| Brasil | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 1 | Constante | 650,67 |
| Chile | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 2 | Constante | 136,22 |
| Perú | 40,36 | 40,79 | 98,95 | 3 | Creciente | 40,36 |
| Nicaragua | 96,99 | 100,00 | 96,99 | 4 | Creciente | 96,99 |
| Colombia | 9,38 | 9,88 | 94,94 | 5 | Constante | 9,38 |
| México | 79,35 | 86,92 | 91,29 | 6 | Constante | 79,35 |
| Argentina | 16,99 | 18,66 | 91,05 | 7 | Constante | 16,99 |
| Ecuador | 50,14 | 57,97 | 86,49 | 8 | Creciente | 50,14 |
| Costa Rica | 23,25 | 30,86 | 75,34 | 9 | Creciente | 23,25 |
| República Dominicana | 18,64 | 27,52 | 67,73 | 10 | Creciente | 18,64 |
| Bolivia | 35,90 | 100,00 | 35,90 | 11 | Creciente | 35,90 |
| El Salvador | 13,11 | 99,99 | 13,11 | 12 | Creciente | 13,11 |
| Guatemala | 2,93 | 99,96 | 2,93 | 13 | Creciente | 2,93 |
| Mínimo: | 2,93 | 9,88 | 2,93 | | | |
| Promedio: | 45,16 | 67,12 | 73,44 | | | |
| Promedios ineficientes: | 35,19 | 57,26 | 68,61 | | | |

Fuente: Elaboración propia, 2024.

Al analizar la EE, que mide en qué medida un país optimiza el tamaño de su producción, los resultados muestran una mejora con puntuaciones que oscilan entre el 2,93% y el 100%, con una media del 73,44%. Once países con puntuaciones inferiores al 100% se identifican como ineficientes, con una puntuación media del 68,61%. Cabe indicar, que la mayoría de estos países ineficientes operan con rendimientos crecientes a escala.

La clasificación de los países en grupos muestra que Brasil y Chile conforman el grupo de los más eficientes, destacándose como referentes en la región en cuanto al tratamiento de aguas residuales. En el segundo grupo, se encuentran Perú, Nicaragua,

Colombia y México, que muestran un buen desempeño y solo requieren ajustes menores en su producción para alcanzar la frontera de mejores prácticas. El tercer grupo, incluye a Argentina, Ecuador y Costa Rica, que, a pesar de su buen desempeño, necesitan mejorar sus economías de escala internas para reducir el desperdicio. En el último grupo, están República Dominicana, Bolivia, El Salvador y Guatemala, que presentan las puntuaciones más bajas y requieren esfuerzos significativos para aumentar el volumen de tratamiento de aguas residuales.

Los dos países más eficientes, Brasil y Chile, mantienen puntuaciones de 100% en EG, ET y EE. No obstante, comparar directamente

sus niveles de rendimiento es complejo debido a que ambos obtienen la misma puntuación. Para resolver esto, se utiliza la puntuación de super-eficiencia sugerida por Anderson y Petersen (1993), una versión modificada del DEA que compara DMU eficientes con una tecnología de referencia que incluye todas las demás unidades. Los resultados muestran que los países eficientes pueden clasificarse de la siguiente manera (con puntuaciones de super-eficiencia entre paréntesis): Brasil (650) y Chile (136) (ver Tabla 2).

En cuanto a la variación de la productividad total de los factores, al comparar los años 2018 y 2020 mediante el Índice de *Malmquist*, se observa que cinco países no han experimentado cambios en su productividad. Solo Brasil, Perú y Nicaragua muestran mejoras en productividad, lo que indica que los resultados en el tratamiento del agua fueron proporcionalmente superiores al volumen de agua tratada. Por el contrario, Chile, Colombia, Ecuador, México y República Dominicana, presentan las puntuaciones más bajas (ver Tabla 3).

Tabla 3
Resultado Índice de Malmquist por el periodo 2018 y 2020

| Clasificación | Países | Índice de Malmquist | Cambio en eficiencia técnica | Cambio Tecnológico |
|---------------|----------------------|---------------------|------------------------------|--------------------|
| 1 | Brasil | 1,1382 | 1,0052 | 1,1324 |
| 2 | Perú | 1,0566 | 1,0387 | 1,0173 |
| 3 | Nicaragua | 1,0526 | 1,0526 | 1,0000 |
| 4 | Argentina | 1,0000 | 1,0000 | 1,0000 |
| 5 | Bolivia | 1,0000 | 1,0000 | 1,0000 |
| 6 | Costa Rica | 1,0000 | 1,0000 | 1,0000 |
| 7 | El Salvador | 1,0000 | 1,0000 | 1,0000 |
| 8 | Guatemala | 1,0000 | 1,0000 | 1,0000 |
| 9 | Chile | 0,9970 | 1,0000 | 0,9970 |
| 10 | Colombia | 0,9965 | 0,9876 | 1,0090 |
| 11 | Ecuador | 0,9936 | 0,9899 | 1,0038 |
| 12 | México | 0,9885 | 1,0000 | 0,9885 |
| 13 | República Dominicana | 0,4600 | 0,4385 | 1,0490 |

Fuente: Elaboración propia, 2024.

La mejora observada se atribuye principalmente al cambio tecnológico y no a un incremento en la eficiencia técnica, que continúa siendo una debilidad en algunos países de la región, como Ecuador, Colombia y República Dominicana, lo cual tiene repercusiones directas en la calidad de vida de la población.

Un aspecto importante a destacar es que, debido a la falta de estudios previos a nivel estatal en los países de la región, no fue posible realizar comparaciones detalladas que evalúen el desempeño de la economía circular en el tratamiento eficiente de las aguas

residuales. Esta ausencia de referencias limita la identificación de áreas específicas de mejora y la definición de parámetros de rendimiento adecuados. Esto pone de manifiesto la necesidad urgente de investigaciones que aborden esta temática y consideren las diversas economías y enfoques de gestión de recursos hídricos en América Latina.

Conclusiones

El presente estudio evaluó la eficiencia en la economía circular del agua mediante

la aplicación de los modelos CCR y BCC orientados a la producción, utilizando datos del año 2020. Los resultados obtenidos ofrecen una perspectiva integral sobre el desempeño de los países de Centro y Sudamérica en el tratamiento de aguas residuales, aportando información clave para la toma de decisiones en políticas de gestión de recursos hídricos.

Los modelos aplicados permitieron calcular la EG y la ET de los países, revelando la capacidad de cada unidad de producción para maximizar su *output* a partir de los insumos disponibles. El modelo CCR destacó las DMU de referencia con mayor eficiencia global; mientras que el modelo BCC permitió identificar las DMU más eficientes dentro de su tamaño. Estos resultados evidencian que la eficiencia en la gestión del agua no solo depende de la cantidad de recursos utilizados, sino también del tamaño y escala de las unidades evaluadas.

La EE, obtenida a partir del cociente entre la EG y la ET, permitió identificar si las DMU operan en una escala óptima. Este indicador es esencial para comprender si los países están aprovechando plenamente su capacidad de producción o si existen desequilibrios que limitan su rendimiento.

Los resultados permitieron clasificar a los países en dos grupos: Eficientes e ineficientes. Brasil y Chile, que presentan sistemas eficientes, utilizan plenamente su potencial de producción y se destacan como líderes en la región. La identificación de las mejores prácticas y la adopción de políticas exitosas de estos países líderes podrían impulsar mejoras significativas en la gestión del agua a nivel regional. En contraste, los demás países muestran un aprovechamiento subóptimo de su potencial productivo, lo que los clasifica como ineficientes y seguidores. Este grupo debe realizar esfuerzos sustanciales para mejorar el tratamiento de las aguas residuales.

Asimismo, los resultados del Índice de *Malmquist* revelan que solo Brasil, Perú y Nicaragua, han experimentado un cambio positivo en la productividad; mientras que Chile, Colombia, Ecuador, México y República

Dominicana, muestran una disminución en su productividad. Estos cambios están más asociados al progreso tecnológico que a un aumento en la eficiencia técnica, la cual sigue siendo una debilidad en la mayoría de los países de la región. La ineficiencia se traduce en un desperdicio significativo de recursos en la gestión del tratamiento de aguas residuales.

Los resultados obtenidos mediante los modelos DEA proporcionan una base sólida para evaluar la eficiencia en la gestión del agua en la región, subrayando la necesidad de implementar estrategias que optimicen el uso de recursos en el ciclo de circularidad hídrica. Aunque el estudio aporta información valiosa, se identificaron limitaciones debido a la falta de datos completos y la escasez de estudios previos a nivel regional, lo que condicionó la orientación del análisis.

Se recomienda continuar con investigaciones que amplíen la base de datos y profundicen en los factores que afectan la eficiencia técnica y de escala. Además, es habitual complementar este tipo de estudios con un análisis de segunda etapa mediante regresiones, que incorpore variables económicas, ambientales, sociales y de gobernanza, las cuales pueden influir en el desempeño de la gestión hídrica.

Referencias bibliográficas

- Ablanedo-Rosas, J. H., Guerrero, A., Olivares-Benitez, 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), 553. <https://doi.org/10.3390/w12020553>
- Akdogan, H. (2012). The efficiency of police stations in the city of Ankara: An application of data envelopment analysis. *Policing: An International Journal*, 35(1), 25-38. <https://doi.org/10.1108/13639511211215432>
- Andersen, P., y Petersen, N. C. (1993). A procedure for ranking efficient units in data envelopment analysis. *Management*

- Science*, 39(10), 1261-1264. <https://doi.org/10.1287/mnsc.39.10.1261>
- AQUASTAT (2023). AQUASTAT - Sistema mundial de información de la FAO sobre el agua en la agricultura. *AQUASTAT*. <https://www.fao.org/aquastat/es/countries-and-basins/>
- Aristovnik, A., Seljak, J., y Mencinger, J. (2014). Performance measurement of police forces at the local level: A non-parametric mathematical programming approach. *Expert Systems with Applications*, 41(4, Part 2), 1647-1653. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2013.08.061>
- Banker, R. D., Charnes, A., y Cooper, W. W. (1984). Some models for estimating technical and scale inefficiencies in data envelopment analysis. *Management Science*, 30(9), 1078-1092. <https://doi.org/10.1287/mnsc.30.9.1078>
- Benito, B., Bastida, F., y García, J. A. (2010). Explaining differences in efficiency: An application to Spanish municipalities. *Applied Economics*, 42(4), 515-528. <https://doi.org/10.1080/00036840701675560>
- Benito, B., Martínez-Córdoba, P.-J., y Guillamón, M.-D. (2021). Measurement and determinants of efficiency in the municipal police service. *Evaluation and Program Planning*, 85, 101904. <https://doi.org/10.1016/j.evalprogplan.2020.101904>
- Bogetoft, P., y Otto, L. (2011). *Benchmarking with DEA, SFA, and R*. Springer Science & Business Media.
- Brears, R. C. (2020). *Developing the Circular Water Economy*. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-32575-6>
- Bronner, M., See, K. F., y Yu, M.-M. (2022). Circular water economy performance evaluation based on dynamic network data envelopment analysis. *Journal of Cleaner Production*, 367, 132474. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.132474>
- Byrnes, P. (1987). *Ownership and Efficiency in the Water Supply Industry: An Application of the Nonparametric Programming Approach to Efficiency Measurement* [Doctoral thesis, Southern Illinois University]. <https://elibrary.ru/item.asp?id=7491765>
- Casiano, C., Bressers, H., Gutierrez, C., y De Boer, C. (2018). Towards circular economy – A wastewater treatment perspective, the Presa Guadalupe case. *Management Research Review*, 41(5), 554-571. <https://doi.org/10.1108/MRR-02-2018-0056>
- Cerdá, E., y Khalilova, A. (2016). Economía Circular. *Economía Circular, Estrategia y Competitividad Empresarial*, (401), 11-20. <https://www.mintur.gob.es/Publicaciones/Publicacionesperiodicas/EconomiaIndustrial/RevistaEconomiaIndustrial/401/CE RD % C 3 % 8 1 % 2 0 y % 2 0 KHALILOVA.pdf>
- Charnes, A., Cooper, W., Lewin, A. Y., y Seiford, L. M. (1997). Data Envelopment Analysis theory, Methodology and Applications. *Journal of the Operational Research Society*, 48(3), 332-333. <https://doi.org/10.1057/palgrave.jors.2600342>
- Charnes, A., Cooper, W. W., y Rhodes, E. (1978). Measuring the efficiency of decision making units. *European Journal of Operational Research*, 2(6), 429-444. [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(78\)90138-8](https://doi.org/10.1016/0377-2217(78)90138-8)
- Chen, C. C. (2017). Measuring departmental and overall regional performance: Applying the multi-activity DEA model to Taiwan's cities/counties. *Omega*, 67, 60-80. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2016.04.002>
- Cook, W. D., y Seiford, L. M. (2009). Data Envelopment Analysis (DEA) – Thirty years on. *European Journal of Operational Research*, 192(1), 9-14. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2008.07.011>

- of *Operational Research*, 192(1), 1-17. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2008.01.032>
- Cunha, R., y Garzón, F. H. (2007). Performance-based potable water and sewer service regulation: The regulatory model. *Cuadernos de Administración*, 20(34), 283-298. https://revistas.javeriana.edu.co/index.php/cuadernos_admon/article/view/4054
- Donati, F., Aguilar-Hernandez, G. A., Sigüenza-Sánchez, C. P., De Koning, A., Rodrigues, J. F. D., y Tukker, A. (2020). Modeling the circular economy in environmentally extended input-output tables: Methods, software and case study. *Resources, Conservation and Recycling*, 152, 104508. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.104508>
- Emrouznejad, A., y Yang, G.-L. (2018). A survey and analysis of the first 40 years of scholarly literature in DEA: 1978–2016. *Socio-Economic Planning Sciences*, 61, 4-8. <https://doi.org/10.1016/j.seps.2017.01.008>
- Färe, R., Grosskopf, S., Norris, M., y Zhang, Z. (1994). Productivity growth, technical progress and efficiency change in industrialized countries. *American Economic Review*, 84(1), 66-83.
- Fundación CONAMA (2019). *Agua y economía circular*. Fundación CONAMA. <https://www.fundacionconama.org/wp-content/uploads/Agua-y-Economia-Circular.pdf>
- Fundación Endesa (2021). Smart city. *Fundación Endesa*. <https://www.fundacionendesa.org/es/educacion/endesa-educa/recursos/smart-city>
- García, N. (11 de febrero de 2020). La guerra del agua: Países con mayor escasez de agua. *Ayuda en Acción*. <https://ayudaenaccion.org/blog/sostenibilidad/guerra-agua-paises-escasez/>
- García-Sánchez, I.-M., Rodríguez-Domínguez, L., y Parra-Domínguez, J. (2013). Yearly evolution of police efficiency in Spain and explanatory factors. *Central European Journal of Operations Research*, 21(1), 31-62. <https://doi.org/10.1007/s10100-011-0207-6>
- Giannakitsidou, O., Giannikos, I., y Chondrou, A. (2020). Ranking European countries on the basis of their environmental and circular economy performance: A DEA application in MSW. *Waste Management*, 109, 181-191. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.04.055>
- Gupta, S., Kumar, S., y Sarangi, G. K. (2012). Measuring the performance of water service providers in urban India: Implications for managing water utilities. *Water Policy*, 14(3), 391-408. <https://doi.org/10.2166/wp.2011.109>
- Halkos, G., y Petrou, K. N. (2019). Treating undesirable outputs in DEA: A critical review. *Economic Analysis and Policy*, 62, 97-104. <https://doi.org/10.1016/j.eap.2019.01.005>
- Hsu, Y.-C., y Lee, C.-C. (2014). Performance measurement in public spending: Evidence from a non-parametric approach. *Romanian Journal of Economic Forecasting*, XVII(3), 136-159. https://ipe.ro/rjef/rjef3_14/rjef3_2014p136-159.pdf
- Huguenin, J.-M. (2012). *Data Envelopment Analysis (DEA): A pedagogical guide for decision makers in the public sector*. IDHEAP – Cahier 276. IDHEAP, Lausanne
- Ihobe (2018). *Indicadores de Economía Circular EUSKADI 2018: Marco de Seguimiento Europeo*. Ihobe, Sociedad Pública de Gestión Ambiental. https://www.euskadi.eus/contenidos/informacion/economia_circular/es_def/adjuntos/Indicadores_economia_circular_pais_vasco_2018.pdf
- Kaszycski, P., Głodniok, M., y Petryszak, P. (2021). Towards a bio-based circular

- economy in organic waste management and wastewater treatment – The Polish perspective. *New Biotechnology*, 61, 80-89. <https://doi.org/10.1016/j.nbt.2020.11.005>
- Lambert, D. K., Dichev, D., y Raffiee, K. (1993). Ownership and sources of inefficiency in the provision of water services. *Water Resources Research*, 29(6), 1573-1578. <https://doi.org/10.1029/93WR00285>
- Lopes, F., De Araujo, J. R., Da Silva, P. E. N. T. B., y Lins, D. C. (2020). Segurança PÚBLICA estadual brasileira: O que influencia seu desempenho? *REUNIR Revista de Administração Contabilidade e Sustentabilidade*, 10(1), 89-99. <https://reunir.revistas.ufcg.edu.br/index.php/uacc/article/view/889>
- Lo Storto, C. (2013). Are Public-private partnerships a source of greater efficiency in water supply? Results of a non-parametric performance analysis relating to the Italian industry. *Water*, 5(4), 2058-2079. <https://doi.org/10.3390/w5042058>
- Louzada, C. (26 de noviembre de 2020). El agua, un recurso que se agota por el crecimiento de la población y el cambio climático. *Naciones Unidas*. <https://news.un.org/es/story/2020/11/1484732>
- Mao, L., Zhou, N., Zhang, T., Du, W., Peng, H., y Zhu, L. (2020). An AHP/DEA Methodology for the Public Safety Evaluation. In X. Sun, J. Wang y E. Bertino (Eds.), *Artificial Intelligence and Security* (pp. 341-352). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-57881-7_31
- Martínez, A., y Rueda, N. (2013). A productivity and efficiency analysis of the security and defence technological and industrial base in Spain. *Defence and Peace Economics*, 24(2), 147-171. <https://doi.org/10.1080/10242694.2012.663581>
- Mavhungu, A., Masindi, V., Foteinis, S., Mbaya, R., Tekere, M., Kortidis, I., y Chatzisyneon, E. (2020). Advocating circular economy in wastewater treatment: Struvite formation and drinking water reclamation from real municipal effluents. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 8(4), 103957. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.103957>
- Muñoz, J. L., y Bustos, R. (2021). Gestión integrada de recursos hídricos y gobernanza: Subcuenca del río Vinces, provincia Los Ríos-Ecuador. *Revista de Ciencias Sociales (Ve)*, XXVII(E-3), 471-497. <https://doi.org/10.31876/rcs.v27i.36532>
- Nika, C. E., Vasilaki, V., Expósito, A., y Katsou, E. (2020). Water cycle and circular economy: Developing a circularity assessment framework for complex water systems. *Water Research*, 187, 116423. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.116423>
- Núñez-Tabales, J. M., Del Amor-Collado, E., y Rey-Carmona, F. J. (2021). Economía circular en la industria de la moda: Pilares básicos del modelo. *Revista de Ciencias Sociales (Ve)*, XXVII(E-4), 162-176. <https://doi.org/10.31876/rcs.v27i.37000>
- Oblitas, J. F., Sangay, M. E., Rojas, E. E., y Castro, W. M. (2019). Economía circular en residuos de aparatos eléctricos y electrónicos. *Revista de Ciencias Sociales (Ve)*, XXV(4), 196-208. <https://produccioncientificaluz.org/index.php/rcs/article/view/30527>
- Parra, J., García, I. M., y Rodríguez, L. (2015). Relationship between police efficiency and crime rate: A worldwide approach. *European Journal of Law and Economics*, 39(1), 203-223. <https://doi.org/10.1007/s10657-013-9398-8>
- Picazo-Tadeo, A. J., González-Gómez, F., y Sáez-Fernández, F. J. (2009). Accounting for operating environments in measuring water utilities' managerial

- efficiency. *The Service Industries Journal*, 29(6), 761-773. <https://doi.org/10.1080/02642060802190300>
- Robaina, M., Murillo, K., Rocha, E., y Villar, J. (2020). Circular economy in plastic waste—Efficiency analysis of European countries. *Science of The Total Environment*, 730, 139038. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139038>
- Roccaro, P. (2018). Treatment processes for municipal wastewater reclamation: The challenges of emerging contaminants and direct potable reuse. *Current Opinion in Environmental Science & Health*, 2, 46-54. <https://doi.org/10.1016/j.coesh.2018.02.003>
- Roychand, R., Kumar, B., Zhang, G., y Setunge, S. (2020). Recycling steel slag from municipal wastewater treatment plants into concrete applications – A step towards circular economy. *Resources, Conservation and Recycling*, 152, 104533. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.104533>
- Salas, E. E., y Salcedo, F. E. (2014). *Eficiencia y productividad en la cobertura de agua potable y saneamiento básico en el Departamento de Bolívar* [Tesis de pregrado, Universidad de Cartagena]. <https://repositorio.unicartagena.edu.co/entities/publication/88ea6979-dbe1-4606-a51b-574d9137ec58>
- Scaratti, D., Michelon, W., y Scaratti, G. (2013). Avaliação da eficiência da gestão dos serviços municipais de abastecimento de água e esgotamento sanitário utilizando Data Envelopment Analysis. *Engenharia Sanitaria e Ambiental*, 18(4) 333-340. <https://doi.org/10.1590/S1413-41522013000400005>
- Urrunaga, R., y Jara, O. (2013). Fronteras de eficiencia y cambio tecnológico en las empresas proveedoras de agua en Perú. *Atlantic Review of Economics: Revista Atlántica de Economía*, 2(1), 8-38. <https://www.unagaliciamoderna.com/eawp/eawp.asp?qsa=ES&qsb=253&qsc=318&qsd=316>
- Voulvoulis, N. (2018). Water reuse from a circular economy perspective and potential risks from an unregulated approach. *Current Opinion in Environmental Science & Health*, 2, 32-45. <https://doi.org/10.1016/j.coesh.2018.01.005>
- Winans, K., Kendall, A., y Deng, H. (2017). The history and current applications of the circular economy concept. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 68(Part 1), 825-833. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.123>
- Yadava, A. K., y Neog, Y. (2022). Public sector performance and efficiency assessment of Indian states. *Global Business Review*, 23(2), 493-511. <https://doi.org/10.1177/0972150919862664>
- Yong, R. (2007). The circular economy in China. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 9(2), 121-129. <https://doi.org/10.1007/s10163-007-0183-z>
- Zeng, Y.-Y. (2019). Urban public safety risk assessment of 35 Cities in China based on context-dependent DEA approach and DEASort. *E3S Web of Conferences*, 136, 04094. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201913604094>
- Zhindaon-Almeida, R. G., Sánchez-Ancajima, R. A., y Castañeda-Guzmán, W. J. (2024). Análisis estadístico de parámetros de calidad del agua del Estero El Macho en la ciudad de Machala-Ecuador. *Revista de Ciencias Sociales (Ve)*, XXX(E-3) 489-513. <https://doi.org/10.31876/rcs.v30i.42329>
- Zou, Y., He, Y., Lin, W., y Fang, S. (2021). China's regional public safety efficiency: A data envelopment analysis approach. *The Annals of Regional Science*, 66(2), 409-438. <https://doi.org/10.1007/s00168-020-01025-y>