

Estimación de los beneficios económicos derivados de la reutilización de aguas residuales en Mendoza, Argentina. Un enfoque desde la economía circular¹

Estimation of the economic benefits of wastewater reuse in Mendoza, Argentina: A Circular Economy perspective

Eduardo Alejandro Comellas

Facultad de Ciencias Económicas, Universidad Nacional de Cuyo
eduardo.comellas@fce.uncu.edu.ar

Araceli Virginia Agneni

Subgerencia Centro Regional Andino, Instituto Nacional del Agua
aagneni@ina.gob.ar

Fecha de recepción: 15/10/2024. Fecha de aceptación: 25/4/2025

¹ Una versión preliminar de este trabajo fue presentada en las Jornadas de Ciencias Económicas de la Facultad de Ciencias Económicas, Universidad Nacional de Cuyo, edición 2024, bajo el título “Economía Circular del Agua: uso, tratamiento y reuso en el Área Metropolitana de Mendoza”.



URL de la revista: revistas.uncu.edu.ar/ojs3/index.php/cuyonomics

ISSN 2591-555X

Esta obra es distribuida bajo una Licencia Creative Commons
Atribución No Comercial – Compartir Igual 4.0 Internacional

Resumen

La economía circular reduce el impacto ambiental y promueve el uso eficiente de los recursos. En este marco, la economía circular del agua (ECA) propone estrategias para la reutilización del agua como herramienta frente a la escasez hídrica. El presente artículo analiza la aplicación de la ECA en el Área Metropolitana de Mendoza, Argentina, región caracterizada por un clima semiárido y alta dependencia del agua de deshielo. Se distingue por incorporar un enfoque original de evaluación económica, cuantificando los beneficios agrícolas del reúso de aguas tratadas, aspecto poco abordado en la literatura especializada. Para ello se estudian las plantas de tratamiento Campo Espejo y Paramillos, que actualmente tratan $1,48 \text{ m}^3/\text{s}$ y $1,75 \text{ m}^3/\text{s}$, respectivamente, e irrigan un total de 3680 hectáreas agrícolas. A partir de proyecciones demográficas, agronómicas y técnicas se construyen dos escenarios prospectivos hacia 2035: uno tendencial y otro potencial. Los resultados estiman que, en el escenario tendencial, el valor actual de los beneficios agrícolas alcanzaría los USD 25 700 000, mientras que en el escenario potencial, con mejoras estructurales, podría llegar a USD 100 910 000. Esto representa una diferencia de USD 75 200 000, atribuible a la expansión del sistema de tratamiento y reúso. Además, el uso extendido de aguas tratadas permitiría incorporar 134 hm^3 anuales a la oferta hídrica de la región, equivalentes al 8,5 % del total actual.

Palabras clave: economía circular del agua, plantas de tratamiento, reúso del agua

Abstract

The Circular Economy (CE) promotes environmental sustainability through the reduction, reuse, and recycling of natural resources and materials. Within this framework, the Circular Water Economy (CWE) proposes strategies for water reuse as a tool to address water scarcity. This article analyzes the application of CWE in the Mendoza Metropolitan Area (MMA), Argentina—a semi-arid region highly dependent on snowmelt water. The study focuses on the Campo Espejo and Paramillos wastewater treatment plants, which currently process $1.48 \text{ m}^3/\text{s}$ and $1.75 \text{ m}^3/\text{s}$, respectively, and irrigate a total of 3,680 hectares of agricultural land. Based on demographic, agronomic, and technical projections, two prospective scenarios are constructed for the year 2035: a baseline (tendential) and an optimized (potential) ones. Results estimate that, under the tendential scenario, the net present value of agricultural production benefits would reach USD 25.70 million, while the potential scenario could achieve USD 100.91 million. This represents an additional USD 75.20 million, attributable to the expansion and optimization of the treatment and reuse system. Moreover, extended reuse of treated wastewater would contribute with 134 hm^3 per year to the regional water supply, equivalent to an increment of 8.5%.

Keywords: circular water economy, wastewater treatment plants, water reuse.

Journal of Economic Literature (JEL): Q1

Introducción

En un escenario global signado por la crisis climática y el estrés hídrico creciente la reutilización del agua emerge como una estrategia imprescindible para alcanzar la sostenibilidad. La gestión eficiente y segura del recurso hídrico se ha convertido en una prioridad a nivel internacional, especialmente en regiones que enfrentan escasez estructural. En este contexto, el reúso de aguas residuales tratadas —tanto de origen urbano como industrial— representa una herramienta clave para responder al aumento de la demanda, la reducción de la disponibilidad natural (en términos cuantitativos y cualitativos) y los impactos derivados del cambio climático. Esta práctica ha ganado protagonismo global por su potencial para mejorar la seguridad hídrica, reducir la contaminación ambiental y aumentar la resiliencia de los sistemas sociales, económicos y ecológicos (Korhonen et al., 2018).

La viabilidad de los esquemas de reutilización depende de múltiples factores físicos, económicos, sociales e institucionales: la disponibilidad de infraestructura adecuada, los costos operativos y de tratamiento, la aceptación social, la existencia de marcos regulatorios claros y el impacto ambiental de las soluciones implementadas. En este marco, el uso de aguas residuales tratadas con fines agrícolas se consolida como una práctica central dentro de la economía circular del agua (ECA), entendida como una estrategia de gestión que prioriza la regeneración y el uso eficiente del agua dentro de un modelo productivo que reduce pérdidas, reutiliza recursos y minimiza externalidades negativas.

La economía circular (EC), en términos generales, propone una transformación estructural del modelo lineal tradicional basado en la lógica de extracción-producción-consumo-desecho. La EC promueve un ciclo cerrado de materiales y recursos, en el que los residuos son reinsertados como insumos en nuevos procesos (Kuah y Wang, 2020). En particular, la ECA busca cerrar el ciclo del agua mediante su recuperación, tratamiento, reutilización y reintegración al sistema económico-productivo. Este paradigma es definido como una forma de emular los procesos naturales del ciclo hidrológico, optimizando la eficiencia del recurso hídrico (Morató et al., 2006).

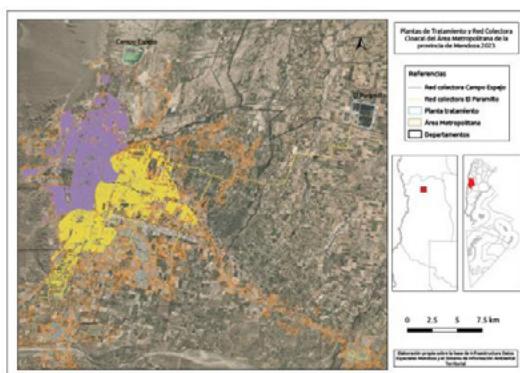
En el caso del Área Metropolitana de Mendoza (AMM) esta problemática adquiere especial urgencia debido a su clima semiárido, precipitaciones inferiores a los 200 mm anuales y alta dependencia del agua de deshielo andino. La disponibilidad hídrica per cápita ronda los 1500 m³/hab/año, lo que ubica a la región en una condición crítica de estrés hídrico (Universidad Nacional de Cuyo, 2021). En este

escenario, el reúso del agua en escala regional no solo es deseable, sino estratégicamente necesario.

La reutilización de aguas residuales para fines agrícolas en Mendoza tiene raíces que se remontan a mediados del siglo XX, aunque los primeros esfuerzos formales comenzaron a consolidarse hacia las décadas de 1970 y 1980. En un contexto de creciente presión sobre los recursos hídricos y aumento demográfico, el Estado provincial comenzó a considerar el tratamiento de aguas residuales no solo como una necesidad sanitaria, sino como una oportunidad para incrementar la oferta hídrica con fines productivos. La inauguración de la planta de tratamiento de Campo Espejo en 1976 marcó el inicio de una etapa institucionalizada en la gestión del reúso. Posteriormente, en 1986, se puso en marcha la planta de Paramillos, con el fin de ampliar la capacidad de depuración y extender la posibilidad de irrigar nuevas superficies agrícolas con aguas tratadas. Ambas infraestructuras fueron concebidas con una lógica de aprovechamiento circular del recurso, en línea con los primeros esbozos del paradigma que hoy se conoce como ECA. En las décadas posteriores el sistema de reúso se consolidó: las plantas continuaron operativas, se expandió el sistema mediante inversión en ampliaciones y mantenimiento de las plantas de tratamiento, zonas irrigadas y el progresivo incremento de la cobertura del sistema cloacal en zonas urbanas. Además, se fortaleció el esquema normativo, se incrementaron los incentivos económicos (ahorro de costos) para los usuarios agrícolas y se logró consenso social relativo a su uso.

Una de las estrategias más relevantes implementadas en la región es el desarrollo de áreas de cultivos restringidos especiales (ACRE), zonas agrícolas específicamente habilitadas para ser irrigadas con aguas residuales tratadas, bajo estrictas regulaciones sanitarias. Los efluentes cloacales son depurados en las plantas de tratamiento de Campo Espejo y Paramillos, que operan en la zona oeste y este del AMM, respectivamente, y conducidos hacia los ACRE (imagen 1).

Imagen 1. Ubicación de las plantas de tratamiento, red colectora cloacal y ACRE del AMM



Fuente: elaboración propia sobre la base del procesamiento de datos catastrales mediante ArcGIS.

En estas áreas se cultivan especies agrícolas no destinadas al consumo humano directo en crudo, como vid, forrajes, bulbos, álamos y otros cultivos autorizados, bajo criterios de salubridad definidos por normativas locales y las directrices de la Organización Mundial de la Salud (1989). En este marco, el presente estudio se orienta a analizar, desde una perspectiva económica comparativa, los beneficios derivados del sistema de reúso de aguas residuales tratadas en el AMM bajo dos escenarios prospectivos: uno tendencial, que proyecta la continuidad de las condiciones actuales, y otro potencial, que considera mejoras en infraestructura, eficiencia y cobertura del sistema. La metodología aplicada permite estimar el valor actual de los beneficios (VAB) agrícolas, considerando variables como caudales tratados, superficie irrigada, estructura de cultivos y rendimientos económicos, con base en datos oficiales y literatura especializada. Este enfoque facilita la identificación de oportunidades de mejora en la gestión hídrica regional, en el marco de una EC.

Aunque la práctica del reúso con fines agrícolas cuenta con antecedentes consolidados en Mendoza, la principal contribución de este trabajo radica en la incorporación de un enfoque de evaluación económica sistemática, aspecto escasamente abordado tanto a nivel nacional como regional. A diferencia de estudios centrados exclusivamente en dimensiones técnicas o normativas, se cuantifican beneficios agrícolas directos de la reutilización de aguas residuales a través de herramientas de análisis prospectivo. A nivel internacional, los trabajos que combinan estimaciones económicas con escenarios de ECA son limitados (Campos y Cuadrado, 2023; Iacovidou et al., 2017), lo que refuerza el carácter original y metodológicamente innovador del enfoque propuesto.

El marco conceptual del presente trabajo se fundamenta en la EC, entendida como una respuesta al modelo económico lineal tradicional basado en la secuencia extraer-producir-consumir-desechar. Este enfoque tradicional resulta insostenible frente al agotamiento de los recursos naturales y el incremento de los residuos (Ghisellini et al., 2016). En otro sentido, la EC propone un sistema de producción y consumo basado en la reutilización, reparación, renovación y reciclaje, de modo que los productos, materiales y recursos mantengan su utilidad durante el mayor tiempo posible.

Los antecedentes conceptuales de la EC se remontan a los años sesenta y setenta, con aportes de la economía ecológica, como la ley de la entropía (Georgescu-Roegen, 1971), la noción de producción más limpia y ciclos cerrados (Stahel y Reday, 1976) y el enfoque *cradle to cradle* (McDonough y Braungart, 2002). A partir de 2010, la EC se consolidó (Ellen MacArthur Foundation, 2013) como modelo global, integrando principios de eficiencia sistémica, resiliencia y simbiosis industrial.

Una derivación directa de este enfoque es la ECA, que aplica los principios de circularidad a la gestión del recurso hídrico. La ECA promueve su uso eficiente mediante la reducción de pérdidas, la recuperación, el tratamiento y la reutilización, con el objetivo de minimizar el impacto ambiental y maximizar la disponibilidad efectiva del recurso (Morató et al., 2006). Este paradigma busca imitar los ciclos na-

turales del agua mediante tecnologías sostenibles que permiten su reintegración segura al sistema económico-productivo.

La literatura internacional ha abordado el reúso de aguas residuales desde múltiples perspectivas: técnicas, sanitarias, normativas y económicas. Países como España e Israel (Asano et al., 2007; Hernández et al., 2017) destacan por su alto nivel de institucionalización, infraestructura avanzada y aceptación social. En América Latina, experiencias en México y Chile (Jiménez y Asano, 2008) evidencian desafíos vinculados a la gobernanza, la regulación sanitaria y la percepción pública.

Desde el punto de vista metodológico, el uso de evaluaciones económico-financieras en contextos de EC, integrando análisis de costo-beneficio, modelización de escenarios y valoración de servicios ecosistémicos, es ampliamente deseable en la planificación de políticas públicas (Iacovidou et al., 2017) Particularmente, la aplicación de escenarios prospectivos permite anticipar el impacto económico de decisiones estratégicas sobre la gestión hídrica, bajo condiciones de incertidumbre estructural (Amer et al., 2013).

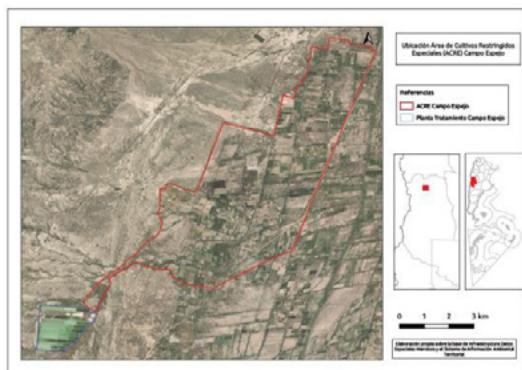
En este sentido, la ECA puede entenderse como una manifestación aplicada de los principios más amplios de la economía ecológica, una corriente que cuestiona los supuestos neoclásicos del crecimiento ilimitado y propone la internalización de los límites biofísicos del planeta (Daly, 1996; Martínez Alier, 2002). A diferencia del enfoque tradicional, que suele centrarse en la eficiencia y la maximización del rendimiento económico, la economía ecológica introduce consideraciones de justicia intergeneracional, resiliencia ecológica y equidad distributiva en el uso de los recursos naturales. Asimismo, se han planteado enfoques éticos alternativos, como la economía para la vida (Hinkelammert y Mora, 2005), que pone en el centro la reproducción de la vida humana y natural como criterio rector del sistema económico. Si bien el presente trabajo no desarrolla explícitamente estos marcos teóricos, su orientación hacia el uso racional y sostenible del agua residual, la valoración de externalidades positivas y la promoción de prácticas circulares se alinean tácitamente con estos enfoques críticos. Incorporar esta perspectiva permite enriquecer el análisis, destacando no solo los beneficios económicos sino también su coherencia con un paradigma de desarrollo basado en la sostenibilidad fuerte.

Metodología y supuestos

Se adopta una metodología cuantitativa de análisis prospectivo, estructurada en la construcción comparativa de dos escenarios: tendencial y potencial con horizonte temporal al año 2035. La estimación de beneficios económicos se basa en la aplicación del VAB, mediante el uso de tasas sociales de descuento. La información utilizada proviene de fuentes oficiales, datos agronómicos y publicaciones especializadas. A continuación, se detallan las características del sistema bajo análisis, los supuestos adoptados y las fórmulas utilizadas.

La planta Campo Espejo depura los líquidos cloacales generados por 436 000 habitantes de la zona oeste del AMM, con un caudal de 1,48 m³/s. Este valor representa aproximadamente el 3 % del caudal medio anual del río Mendoza (Observatorio del Agua, 2023). Actualmente, se irrigan alrededor de 1630 hectáreas del ACRE Campo Espejo (Imagen 2).

Imagen 2. Planta de tratamiento y área de cultivos restringidos de Campo Espejo



Fuente: elaboración propia sobre la base del procesamiento de datos catastrales mediante ArcGIS.

Se cultivan en esta zona 1630 hectáreas (tabla 1), observándose la mayor proporción en vid, hortalizas y bulbos.

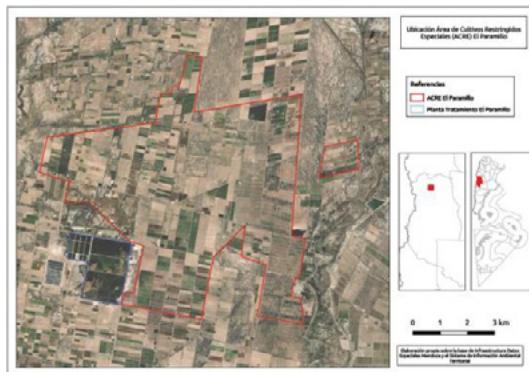
Tabla 1. Superficie cultivada en ACRE Campo Espejo (en hectáreas y proporciones)

Cultivo	Proporción (%)	Hectáreas
Vid	25,21	411
Hortalizas	19,82	323
Bulbos	15,52	253
Forrajeros	9,94	162
Álamos	9,45	154
Olivos	9,08	148
Frutas	4,54	74
Almendras	2,02	33
Tubérculos	1,53	25
Pasturas	1,47	24
Eucaliptos	1,35	22
TOTALES	100,00	1630

Fuente: elaboración propia sobre la base de datos aportados por la Dirección de Estadística e Investigaciones Económicas de Mendoza.

La planta Paramillos trata un caudal de 1,75 m³/s de efluentes provenientes de la zona este (imagen 3) del AMM. Esta cifra representa, según el Observatorio del Agua (2023), alrededor del 3,5 % del promedio anual del caudal del río Mendoza. En ella se depuran actualmente los líquidos cloacales provenientes de 537 000 habitantes. La superficie actualmente irrigada asciende a 2050 hectáreas.

Imagen 3. Planta de tratamiento Paramillos y ACRE



Fuente: Planta de tratamiento Paramillos y ACRE. Elaboración propia sobre la base del procesamiento de datos catastrales mediante ArcGIS.

En esta ACRE, el 75 % de la superficie irrigada es ocupada por plantaciones de vid, hortalizas y olivos, como se puede apreciar en la tabla 2.

Tabla 2. Superficie cultivada en ACRE Paramillos (en hectáreas y proporciones)

Cultivo	Proporción (%)	Hectáreas
Vid	38,49	789
Hortalizas	21,27	436
Olivos	15,17	311
Forrajeros	10,24	210
Bulbos	8,88	182
Frutas	0,73	15
Zanahorias	2,78	57
Tubérculos	0,29	6
Álamos	2,15	44
Totales	100,00	2050

Fuente: elaboración propia con datos aportados por la Dirección de Estadística e Investigaciones Económicas.

Metodológicamente, se estiman dos escenarios: uno tendencial (E_T) y otro potencial (E_P). El primero considera las condiciones actuales de tratamiento y reúso, y proyecta un crecimiento poblacional similar al de la última década. El segundo asume mejoras en infraestructura y cobertura cloacal. En ambos casos, se estiman: caudal tratado, población beneficiada, superficie irrigada, cultivos implantados y valor económico de la producción agrícola. La construcción de los escenarios utilizados se enmarca dentro de un enfoque prospectivo basado en la planificación de situaciones contextuales alternativas. Esta metodología permite analizar de forma comparativa la evolución de un sistema bajo distintas condiciones futuras, incorporando supuestos plausibles a partir de datos históricos, tendencias demográficas, climáticas, económicas y tecnológicas.

Complementariamente a lo ya mencionado, el E_T se construye a partir de la prolongación de tendencias actuales, manteniendo constantes los principales parámetros estructurales del sistema, como el ritmo de crecimiento poblacional, el caudal medio del río Mendoza, la superficie actualmente irrigada y la capacidad operativa de las plantas de tratamiento. Este escenario representa una proyección conservadora, útil para identificar brechas o déficits bajo condiciones de continuidad. Por otro lado, el E_P incorpora supuestos optimistas razonables, como mejoras en la infraestructura, mayor cobertura del sistema cloacal, políticas activas de eficiencia hídrica y expansión de las ACRE. Así, se busca estimar el potencial beneficio económico derivado de la implementación de intervenciones estratégicas.

Ambos escenarios se elaboraron bajo un enfoque de modelización heurística basado en el juicio experto, apoyado por evidencia empírica provista por fuentes oficiales (Aysam, DEIE, Observatorio del Agua) y literatura especializada. Este procedimiento metodológico destaca a la construcción de escenarios cualitativos-cuantitativos como una herramienta útil para planificar políticas públicas en contextos de incertidumbre estructural.

Por otro lado, cabe aclarar que los costos específicos derivados de un incremento en el flujo de tratamiento de efluentes y del mantenimiento de las plantas no se incrementarían de manera significativa al aumentar su capacidad de tratamiento, depuración y distribución. Esa expansión puede considerarse una externalidad positiva derivada de la universalización progresiva de la conexión de viviendas a la red colectora cloacal (la cual, sin necesidad de incrementar su capacidad, conduciría esa mayor cantidad de efluentes a las plantas).

Derivado del comentario del párrafo anterior es que, ante la relativamente escasa o nula variación de los costos frente al incremento de los beneficios en el sector analizado, es viable efectuar el análisis comparativo de escenarios tomando en consideración el VAB (ecuación 1).

$$VAB = \sum_{t=1}^n \frac{B_t}{(1+r)^t}$$

Donde B_t es el beneficio neto en el año t , r es la tasa social de descuento (TSD) y n es el horizonte temporal (años).

La TSD es la utilizada para traer a valor presente los beneficios y costos futuros de un proyecto desde la perspectiva de la sociedad en su conjunto. Ella refleja las preferencias de la sociedad por el consumo presente frente al consumo futuro y constituye un factor determinante en la evaluación de proyectos a mediano y largo plazo, como los ambientales, en los que los beneficios pueden tardar en manifestarse.

Para el caso bajo estudio, la TSD utilizada a los efectos de comparar el ET y el EP , será del 20 %. Esta elección, abierta a discusión para líneas de estudios futuros, se fundamenta en tres elementos clave (Harberger y Jenkins, 2002): (i) la alta volatilidad macroeconómica y los niveles de riesgo país de Argentina, que elevan la preferencia temporal por beneficios actuales; (ii) la práctica observada en manuales de inversión pública de países de ingreso medio, donde tasas entre 10 % y 20 % son utilizadas en contextos de competencia entre proyectos sociales, y (iii) la bibliografía de referencia, que reconoce este rango como aceptable en economías emergentes.

No obstante, se reconoce que, para estudios ambientales de largo plazo, y de generarse un proceso de estabilización de las variables macroeconómicas nacionales, sería razonable el uso de TSD menores, del 5 % al 10 % (López y Anriquez, 2007). Por ello, como lineamientos de estudios futuros y si la estabilidad macroeconómica en Argentina se consolida se sugiere realizar análisis de sensibilidad para verificar la robustez de los resultados bajo diferentes y menores TSD.

Supuestos para la construcción de escenarios

Escenario tendencial:

- ▶ La tasa de crecimiento poblacional promedio anual del AMM se mantiene en 1,12 (dato del período 2010-2022 emitido por el Instituto Nacional de Estadística y Censos, 2022).
- ▶ El caudal anual promedio del río Mendoza se mantiene dentro de los valores históricos: 50 m³/s, según el Departamento General de Irrigación de Mendoza (2021).
- ▶ El consumo promedio per cápita de agua potable, según datos que la empresa proveedora del servicio, Agua y Saneamiento Mendoza (AySaM), publica en su página oficial (2025), se ubica en 450 l/h.d. Puede suponerse que cerca del 60 % son vertidos a las redes cloacales.
- ▶ La eficiencia de conducción externa —agua no contabilizada— susceptible de ser mejorada se reduciría en un 20 % (Llop et al., 2013).
- ▶ La cantidad de conexiones hacia el sistema cloacal que deriva en las plantas de tratamiento se incrementará a la tasa a la cual aumenta la población (1,12 %).

- ▶ La planta de tratamiento de efluentes cloacales Paramillos mantiene su actual capacidad de depuración: $1,75 \text{ m}^3/\text{s}$.
- ▶ La planta de tratamiento de efluentes cloacales Campo Espejo mantiene su actual capacidad de depuración: $1,48 \text{ m}^3/\text{s}$.
- ▶ La superficie cultivada en el ACRE de Paramillos mantiene las actuales dimensiones: se irrigan 2050 hectáreas con agua tratada en la planta.
- ▶ La superficie cultivada en ACRE Campo Espejo mantiene las actuales dimensiones, se irrigan 1630 hectáreas con agua tratada en la planta.
- ▶ Las proporciones de cada especie cultivada en ambos ACRE y sus respectivos rendimientos agronómicos se mantienen sin cambios.
- ▶ Se asume que no se generarán distorsiones en los precios relativos (y en términos reales) en las toneladas de cada cultivo.
- ▶ Se invierte en infraestructura la cantidad necesaria para mantener el estado actual de las obras existentes en las plantas, solo se incrementa la capacidad de tratamiento de cada una de ellas en función del crecimiento demográfico del AMM.
- ▶ La TSD utilizada para descontar los flujos de fondos es del 20 % en todos los escenarios planteados y el horizonte temporal bajo análisis, 10 años.

Escenario potencial

- ▶ La tasa de crecimiento poblacional del AMM se incrementa progresivamente, bajo el supuesto de mejora en la calidad de vida, desarrollo económico e intensificación de migración a la ciudad: alcanza para 2035 una variación del 1,6 % anual.
- ▶ El caudal anual promedio del río Mendoza se reduce, siguiendo los escenarios asociados con los Modelos de Circulación General de la Atmósfera (Kononova, 2009), a valores anuales cercanos a $37 \text{ m}^3/\text{s}$.
- ▶ Mediante la adecuada colocación de incentivos económicos y el cobro volumétrico del servicio, el consumo promedio per cápita de agua potable se reducirá y ubicará en 300 l/h.d. Un porcentaje aproximado del 60 % de ellos serán vertidos a las redes cloacales.
- ▶ La cantidad de conexiones hacia el sistema cloacal que deriva en las plantas de tratamiento se incrementa, tanto por incorporaciones de nuevas edificaciones, como por conexiones progresivas al sistema de inmuebles existentes antes de 2025.
- ▶ La planta de tratamiento de efluentes cloacales Paramillos incrementa su capacidad de depuración ($2,25 \text{ m}^3/\text{s}$), mientras que Campo Espejo tratará $2 \text{ m}^3/\text{s}$.
- ▶ La superficie cultivada en el ACRE Paramillos puede incrementarse y su nueva dimensión permitirá irrigar 5000 hectáreas con agua tratada, mientras que la superficie cultivada en el ACRE Campo Espejo puede incrementarse y permitirá irrigar 4500 hectáreas.
- ▶ Las proporciones de cada especie cultivada en ambas ACRE y su rendimiento agronómico se mantienen sin cambios.

- ▶ No se generan distorsiones en los precios relativos de cada cultivo para ambas ACRE.
- ▶ La TSD utilizada para descontar los flujos de fondos es del 20 % en todos los escenarios planteados y el horizonte temporal bajo análisis, de 10 años.
- ▶ Se efectúan las inversiones necesarias para ampliar la capacidad de tratamiento de cada planta a una tasa mayor que el crecimiento demográfico del AMM. Se supone que el incremento en la capacidad de tratamiento de ambas plantas y la superficie irrigada en las ACRE crecerá a una tasa del 10 % anual hasta el año 2035.

Datos y supuestos adicionales

Los precios de los cultivos y sus rendimientos se estiman a través de las publicaciones periódicas elaboradas por la Dirección de Estadísticas e Investigaciones Económicas de Mendoza. La tabla 3 muestra los resultados obtenidos a través de la aplicación de cálculos sobre estas bases de datos: las series históricas de precios anuales de los principales cultivos de la provincia, expresados en USD por tonelada de producción anual (según el tipo de cambio vigente), permiten determinar el precio promedio histórico de cada cultivo (USD por tonelada). Este cálculo, para cada uno de los tipos de plantaciones presentes en las ACRE de Paramillos y Campo Espejo, se muestra en la segunda columna de la tabla 3. Por otra parte, en la tercera columna se presenta el rendimiento de cada hectárea productiva cultivada (toneladas por hectárea). Ese dato es calculado mediante el cociente entre el total producido de cada cultivo en la cuenca (expresado en toneladas) y la superficie ocupada por ellos (expresada en hectáreas).

Tabla 3. Tipos, precio (USD por tonelada) y rendimientos (toneladas por hectárea) de cultivos en ACRE.

Tipo de cultivo	USD por tonelada	Toneladas por hectárea
Vid	103	10,8
Hortalizas	118	18,0
Olivos	3	10,0
Forrajeros	83	21,2
Bulbos	56	7,50
Zanahorias	7	20,0
Álamos	75	50,0
Frutas	97	20,0
Tubérculos	48	15,0
Pasturas	66	18,0

Fuente: elaboración propia sobre la base de datos extraídos del Observatorio del Agua (2023).

Bajo los supuestos anteriores se estima el VAB futuro derivado de la producción de cada una de las ACRE hasta el año 2035 (horizonte temporal de 10 años que comienza en 2025). Finalmente, se comparan los rendimientos monetarios obtenidos bajo los supuestos del escenario tendencial y del escenario potencial. Para ello se calcula el VAB del *ET* y del *Ep*. La diferencia entre ambos explica los potenciales beneficios asociados al reúso si se efectúan cambios estructurales y no estructurales en el desempeño del sistema. Con ello se pretende determinar las implicancias económicas sustentadas en la aplicación de las propuestas presentadas.

Resultados y discusión

En esta sección se presentan los resultados de la estimación del VAB en ambos escenarios. A partir de los datos agronómicos, poblacionales y técnicos disponibles se proyectan caudales tratados, superficies irrigadas y beneficios económicos derivados de la producción agrícola en las ACRE vinculadas a las plantas de Campo Espejo y Paramillos.

En el *ET* la planta de Paramillos continúa con las mismas unidades de tratamiento y la actual superficie cultivada se mantiene (2050 hectáreas). Dicha planta continúa depurando los líquidos cloacales de la zona este del Gran Mendoza. Debido al incremento tendencial de la población y a la falta de modificación en conductas de consumo, la cantidad de efluentes tratados podría estimarse en 1,95 m³/s (provenientes del tratamiento de los efluentes de 537 000 habitantes estimados para 2035). La planta Campo Espejo mantiene las mismas unidades de tratamiento, y llega a irrigar la totalidad de las hectáreas empadronadas (1630 hectáreas). Ella depurará los líquidos cloacales de 450 000 habitantes estimados para 2035 en la zona oeste del AMM, aproximadamente 1,89 m³/s.

Con el supuesto derivado del uso potencial de la totalidad de hectáreas empadronadas, manteniendo la actual proporción de cultivos, asumiendo que no se efectuarán mejoras en los sistemas de tratamiento de las plantas y suponiendo que no se generarán cambios en los precios reales de los cultivos, el valor anual promedio de la producción de ambas ACRE ascendería a USD 4 950 000. Este dato se obtiene sumando los totales visualizados en la tabla 4 para cada una de las plantas.

El valor actualizado de los beneficios de la producción según la ecuación 1, asumiendo un horizonte temporal hasta el año 2035 y una tasa de descuento del 20 %, asciende a USD 25 700 000.

En el *Ep* la planta de Paramillos podría ser readecuada para incrementar sus unidades de tratamiento. En ella podrían ser depurados 2,25 m³/s provenientes de 553 000 habitantes estimados y conectados a la red colectora cloacal para 2035 en la zona este del Gran Mendoza. Con el supuesto derivado del uso potencial de la totalidad de hectáreas empadronadas, más cierta porción asociada al incremento del ACRE, la superficie podría alcanzar las 2500 hectáreas. Se asume que estas cifras

son alcanzadas progresivamente a razón de un 10 % más en cada año del horizonte establecido. Se supone que se mantendrá la actual proporción de cultivos y que no hay cambios significativos en sus precios reales. Bajo estos supuestos, el valor anual derivado de la producción de las ACRE de Paramillos se incrementaría progresivamente de USD 2 820 000 en 2025 a USD 7 310 000 en 2035. Por el lado de la superficie, se incrementará a una tasa del 10 % anual, de 2255 hectáreas en 2025 a 5849 hectáreas en 2035.

Tabla 4. Cultivo, proporción (%), superficie (hectáreas) y valor (USD) para las plantas Paramillos y Campo Espejo

Planta de tratamiento Paramillos				Planta de tratamiento Campo Espejo		
Cultivo	Proporción (%)	Hectáreas	Valor (USD)	Proporción (%)	Hectáreas	Valor (USD)
Vid	35,85	735	818 088	26,30	429	477 200
Hortalizas	20,31	416	880 920	19,90	324	686 299
Olivos	13,40	275	9340	9,73	159	5392
Forrajeros	9,50	195	343 409	9,80	160	281 675
Bulbos	8,05	165	69 213	15,95	260	109 040
Zanahorias	2,78	57	8274	0,00	0	-
Álamos	2,15	44	165 281	9,46	154	578 243
Frutas	5,96	122	236 895	4,51	74	142 534
Tubérculos	2,00	41	29 671	1,54	25	18 166
Pasturas	0,00	0	-	1,47	24	28 375
Eucaliptos	0,00	0	-	1,34	22	62 250
Totales	100,00	2050	2 561 090	100,00	1630	2 389 173

Fuente: elaboración propia sobre la base de datos extraídos del Observatorio del Agua (2023) y la Dirección de Estadísticas y Censos de la provincia de Mendoza.

La planta Campo Espejo podría incrementar su capacidad y alcanzar un volumen de 2 m³/s de efluentes depurados provenientes de los líquidos cloacales de 520 000 habitantes estimados para 2035 en el oeste del AMM. Con el supuesto del uso potencial de la totalidad de hectáreas empadronadas, más cierta porción asociada al incremento del ACRE, la superficie irrigada podría alcanzar 4651 hectáreas. Se asume que estas cifras son alcanzadas progresivamente a razón de un 10 % más en cada año del horizonte establecido. Se supone que se mantiene la actual proporción de cultivos y que no hay cambios significativos en sus precios reales. Bajo estos supuestos el valor derivado de la producción, ascendería de USD 2 630 000 para 2025 a USD 6 820 000 en 2035. La superficie cultivada se incrementaría progresivamente de 1793 a 4651 hectáreas.

Tabla 5. Valor anual estimado de la producción y superficie cultivada en ACRE Campo Espejo y Paramillos (E_p) (millones de USD por tipo de cultivo, 2025-2035)

		2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	
	Cultivo	Sup	USD	Sup									
Planta de tratamiento Paramillos	Vid	808	0.9	889	0.99	978	1.07	1076	1.20	1184	1.32	1302	1.45
	Hortalizas	454	0.97	504	1.07	554	1.17	610	1.29	671	1.42	738	1.56
	Olivos	302	0.01	332	0.01	366	0.01	402	0.01	442	0.02	487	0.02
	Forrajeros	214	0.38	236	0.42	259	0.48	285	0.50	314	0.55	345	0.61
	Bulbos	182	0.08	200	0.08	220	0.09	242	0.10	266	0.11	292	0.12
	Zanahorias	63	0.01	69	0.01	77	0.01	83	0.01	92	0.01	101	0.01
	Álamos	48	0.18	53	0.20	59	0.22	65	0.24	71	0.27	78	0.29
	Frutas	148	0.08	163	0.09	179	0.10	197	0.11	216	0.13	237	0.14
	Túberculos	45	0.05	50	0.04	55	0.05	61	0.06	67	0.07	74	0.08
	Pasturas	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	Eucaliptos	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Total		2268	2,66	2496	2,91	2747	3,20	3021	3,52	3323	3,90	3654	4,28
Planta de tratamiento Paramillos	Vid	472	0.58	519	0.64	568	0.70	628	0.70	690	0.77	759	0.85
	Hortalizas	357	0.75	400	0.91	431	1.04	475	1.00	522	1.11	575	1.22
	Olivos	174	0.01	192	0.01	212	0.01	232	0.01	255	0.01	281	0.01
	Forrajeros	176	0.31	193	0.34	212	0.38	234	0.41	257	0.45	283	0.50
	Bulbos	286	0.12	314	0.15	346	0.18	381	0.21	419	0.23	461	0.26
	Zanahorias	170	0.04	187	0.05	206	0.06	228	0.07	248	0.08	273	0.10
	Álamos	81	0.06	89	0.07	98	0.08	108	0.09	119	0.10	131	0.11
	Frutas	63	0.08	70	0.09	78	0.10	87	0.11	97	0.13	108	0.14
	Túberculos	33	0.05	37	0.06	41	0.06	46	0.07	51	0.08	57	0.09
	Pasturas	26	0.03	29	0.03	32	0.04	35	0.04	39	0.05	43	0.05
	Eucaliptos	24	0.06	27	0.06	30	0.07	33	0.08	36	0.08	40	0.09
Total		1862	2,09	2057	2,41	2254	2,72	2487	2,79	2733	3,09	3011	3,42
Total		2268	2,66	2496	2,91	2747	3,20	3021	3,52	3323	3,90	3654	4,28
Total		1862	2,09	2057	2,41	2254	2,72	2487	2,79	2733	3,09	3011	3,42
Total		2268	2,66	2496	2,91	2747	3,20	3021	3,52	3323	3,90	3654	4,28

Fuente: elaboración propia sobre datos del Observatorio de Agua (2023) y la Dirección de Estadísticas y Censos de la provincia de Mendoza.

En la tabla 5 se explicitan de modo detallado los alcances progresivos de las cifras comentadas. En ella puede observarse el comportamiento de la superficie y el valor de la producción estimado para el período 2025-2035 para ambas plantas. Se muestra, además, el comportamiento de estas variables en cada tipo de cultivo para cada una de las ACRE. Finalmente, considerando el potencial de ambas zonas de cultivo (Campo Espejo y Paramillos) y suponiendo la incorporación progresiva de viviendas a la red cloacal y mejoras en la infraestructura de las plantas, conjuntamente con la ampliación de la superficie cultivada en las ACRE, sería posible tratar conjuntamente 4,25 m³/s de efluentes totales. El VAB de la producción bajo estos parámetros, según la ecuación 1 bajo un horizonte temporal de 2025 a 2035 y una tasa de descuento del 20 %, ascendería a USD 100 910 000.

El reúso de aguas residuales tratadas para riego agrícola en el AMM constituye una estrategia clave para afrontar el estrés hídrico estructural que afecta a la región, agravado por el cambio climático, el crecimiento demográfico y la presión sobre fuentes convencionales. Su implementación contribuye a liberar agua de mejor calidad para consumo humano, evitar la contaminación de cauces superficiales, mejorar la fertilidad de los suelos mediante fertirrigación y ampliar la superficie productiva agrícola.

A partir de los resultados obtenidos se identifica que el sistema actual de tratamiento y reúso posee un importante margen de mejora. Bajo un escenario optimizado, con inversiones relativamente bajas y acciones estratégicas, sería posible incrementar el valor actual de la producción agrícola en USD 75 200 000 durante los próximos diez años. Además, el caudal de aguas tratadas podría alcanzar los 4,25 m³/s, lo que significa una incorporación neta de 134 hm³ anuales al sistema hídrico de la región, equivalente a un aumento del 8,5 % en la oferta hídrica superficial mediante el uso de fuentes no convencionales.

Más allá de los aportes técnicos, este trabajo presenta una contribución metodológica innovadora al integrar una evaluación económica prospectiva del sistema de reúso de aguas tratadas en el AMM. La estimación del VAB permite cuantificar con claridad el impacto económico de distintas estrategias de gestión hídrica y aportar evidencia empírica que complementa los enfoques tradicionales de la ingeniería y la planificación ambiental. Si bien el análisis no incluye una estimación del valor actual de los costos, lo cual impide calcular el valor actual neto del sistema, esta omisión no representa una limitación sustancial, dado que se espera que los costos operativos no difieran significativamente entre ambos escenarios. Por el contrario, los beneficios agrícolas derivados de la expansión del sistema de reúso muestran un margen claramente superior, lo que refuerza la viabilidad económica de su implementación y la utilidad del enfoque adoptado para la toma de decisiones públicas en contextos de escasez hídrica estructural.

Líneas futuras de investigación podrían orientarse al análisis de estrategias integradas para optimizar el sistema de reúso de efluentes en el AMM, tales como:

(i) invertir en sistemas más eficientes para el tratamiento de efluentes, explorando y adoptando tecnologías innovadoras que mejoren la calidad del agua reutilizada, reduzcan la carga contaminante, minimicen el impacto negativo en los ecosistemas y maximicen el valor del recurso hídrico; (ii) diseñar sistemas de reutilización de efluentes que permitan la infiltración controlada del agua tratada hacia acuíferos subterráneos, lo que ayudaría a su recarga; (iii) establecer sistemas de monitoreo que permitan una supervisión continua de la calidad del agua reutilizada, lo que facilita la detección temprana de problemas y garantiza la seguridad integral del proceso; (iv) establecer planes, políticas y programas que incentiven a las industrias a reutilizar sus efluentes internos, y (v) invertir en investigación y desarrollo para mejorar la eficiencia de los procesos de tratamiento de efluentes, así como para explorar nuevas formas de reutilización que maximicen el valor del recurso hídrico.

Bibliografía

- Aguas Mendocinas (2025). Educación: agua potable. Recuperado el 23/06/2025 de <https://www.aysam.com.ar/agua-potable/>.
- AMER, M., DAIM, T. U. y JETTER, A. (2013). A review of scenario planning. *Futures*, 46, 23-40. <https://doi.org/10.1016/j.futures.2012.10.003>.
- ASANO, T., BURTON, F. L., LEVERENZ, H. L., TSUCHIHASHI, R. y TCHOBANOGLOUS, G. (2007). *Water Reuse: Issues, Technologies, and Applications*. McGraw-Hill.
- CAMPOS, E. y CUADRADO, G. (2023). Valoración económica del agua de acuerdo con el uso. *Tierra Infinita*, 9, 136-161. <https://doi.org/10.32645/26028131.1248>.
- DALY, H. E. (1996). *Beyond growth: The economics of sustainable development*. Beacon Press.
- Departamento General de Irrigación (2021). *Actualización del balance hídrico de la cuenca del río Mendoza*. Departamento General de Irrigación. Recuperado el 23/06/2025 de <https://www.irrigacion.gov.ar/web/wp-content/uploads/2025/03/Actualizacion-Balance-H%C3%ADrico.pdf>.
- Ellen MacArthur Foundation (2013). *Towards the circular economy: Economic and business rationale for an accelerated transition*. <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/topics/circular-economy-introduction/overview>.
- GEORGESCU-ROEGEN, N. (1971). *The entropy law and the economic process*. Harvard University Press.
- GHISELLINI, P., CIALANI, C. y ULGIATI, S. (2016). A review on circular economy: The expected transition to a balanced interplay of environmental and economic systems. *Journal of Cleaner Production*, 114, 11-32. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.09.007>.
- HARBERGER, A. y JENKINS, G. (2002). *Cost-Benefit Analysis of Investment Projects*. Harvard Institute for International Development.

- HERNÁNDEZ, F., URKIAGA, A., DE LAS FUENTES, L., BIS, B., KALBAR, P. y GAWLIK, B. M. (2017). Water reuse in Europe: Relevant guidelines, needs for and barriers to innovation. *Environmental Sciences Europe*, 29(9). https://observatorio2030.com/sites/default/files/2019-11/IN_78_2004_VA_54_Water%20Reuse%20in%20Europe_Relevant%2oguidelines%2C%20needs%20for%20and%20barriers%20to%20innovation.pdf.
- HINKELAMMERT, F.J. y MORA, H. (2005). *Hacia una economía para la vida: Preludio a una reconstrucción de la economía*. DEI (Departamento Ecuménico de Investigaciones).
- IACOVIDOU, E., MILLWARD-HOPKINS, J., BUSCH, J., PURNELL, P., VELIS, C., HAHLADAKIS, J. N., ZWIRNER, O. y BROWN, A. (2017). A pathway to circular economy: Developing a conceptual framework for complex value assessment of resources recovered from waste. *Journal of Cleaner Production*, 168, 1279-1288. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.09.002>.
- Instituto Nacional de Estadística y Censo (2024). *Censo Nacional de Población, Hogares y Viviendas 2022*. Base de datos del Redatam 2024. Recuperado el 23/06/2025 de <https://redatam.indec.gob.ar/binarg/RpWebEngine.exe/Portal?BASE=CPV2022&lang=ESP>.
- JIMÉNEZ, B. y ASANO, T. (2008). *Water Reuse: An International Survey of Current Practice, Issues and Needs*. IWA Publishing.
- KIRCHHERR, J., REIKE, D. y HEKKERT, M. (2018). Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions. *Resources, Conservation and Recycling*, 127, 221-232. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.09.005>.
- KONONOVA, N. (2009). *Clasificación de los Mecanismos Elementales de Circulación del hemisferio norte según el método de B. L. Dzerdzevskii*. Instituto Geog. AC de Rusia, Moscú.
- KORHONEN, J., HONKASALO, A. y SEPPÄLÄ, J. (2018). Circular economy: The concept and its limitations. *Ecological Economics*, 143, 37-46. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2017.06.041>.
- KUAH, A. y WANG, P. (2020). Circular economy and consumer acceptance: An exploratory study in East and Southeast Asia. *Journal of Cleaner Production*, 247, 119097. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119097>.
- LÓPEZ, R. y ANRIQUEZ, G. (2007). *Fiscal policy and the environment: Theory and empirics*. World Bank.
- LLOP, A., FASCIOLI, G. E., DUEK, A. E., COMELLAS, E. y BUCCHERI, M. (2013). El balance hídrico en las cuencas de Mendoza: aportes para su medición. *Proyección*, 7(14), 48-67.
- MARTÍNEZ ALIER, J. (2002). *The environmentalism of the poor: A study of ecological conflicts and valuation*. Edward Elgar Publishing.
- MCDONOUGH, W. y BRAUNGART, M. (2002). *De la cuna a la cuna: redefiniendo nuestra forma de hacer las cosas*. North Point Press.

- MORATÓ, J., BAYONA, J. M. y CORTINA, J. L. (2006). *Recuperación y reúso del agua: Fundamentos y aplicaciones*. Edicions UPC.
- MURRAY, A., SKENE, K. y HAYNES, K. (2017). The circular economy: An interdisciplinary exploration of the concept and application in a global context. *Journal of Business Ethics*, 140(3), 369-380. <https://doi.org/10.1007/s10551-015-2693-2>.
- Observatorio del Agua, Mendoza (2023). Base de datos disponible en <https://www.observatorioaguamza.com/index.php/es>.
- Organización Mundial de la Salud (OMS) (1989). *Directrices sobre el uso de aguas residuales en agricultura y acuicultura*. OMS.
- STAHEL, F. y REDAY, H. (1976). *The entropy law and the economic process*. Harvard University Press.
- Universidad Nacional de Cuyo (2021). *Plan Estratégico de Desarrollo Institucional UNCuyo 2021-2030*. Secretaría de Desarrollo Institucional y Territorial.