

Capítulo 17

Estudio de la calidad del agua residual tratada mediante sistemas biológicos para el uso en cultivos forrajeros

Dahir Alberto Andrade Damián

Ricardo Torres Ramos⁹⁷

Aurelia Mendoza Gómez⁹⁸

Mary Triny Beleño Cabañas⁹⁹

DOI: <https://doi.org/10.61728/AE26000350>



⁹⁷ Universidad Autónoma de Baja California, Instituto de Ingeniería. Nuevo León 21705, Baja California, México.

⁹⁸ Universidad Autónoma de Baja California, Instituto de Ingeniería. Nuevo León 21705, Baja California, México.

⁹⁹ Universidad Autónoma de Baja California, Instituto de Ingeniería. Nuevo León 21705, Baja California, México, mary.beleno@uabc.edu.mx.

Resumen

El reúso de aguas residuales tratadas en la agricultura constituye una alternativa viable para enfrentar la escasez hídrica en regiones áridas y semiáridas, siempre que se garantice su calidad conforme a criterios técnicos y normativos. El objetivo de este estudio fue evaluar la calidad fisicoquímica, microbiológica y de metales pesados del agua residual tratada generada en la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales del Instituto de Ciencias Agrícolas de la Universidad Autónoma de Baja California, y analizar su aptitud para el riego de cultivos forrajeros en el Valle de Mexicali. Se analizaron parámetros como pH, temperatura, grasas y aceites, demanda química de oxígeno (DQO), sólidos suspendidos totales (SST), *Escherichia coli*, nitrógeno y fósforo totales, así como metales pesados (As, Cd, Hg, Pb, Cr, Ni, Cu y Zn), comparando los valores obtenidos con los límites establecidos en la NOM-003-SEMARNAT-1997 y la NOM-001-SEMARNAT-2021. Los resultados mostraron que la mayoría de los parámetros evaluados cumplieron con los límites permisibles, destacando los bajos valores de *E. coli* y metales pesados, lo que indica un bajo riesgo sanitario y ambiental. La DQO y los SST evidenciaron una adecuada remoción de materia orgánica y sólidos. El fósforo total se mantuvo dentro de los rangos normativos, mientras que el nitrógeno total presentó una ligera superación del límite establecido, lo que sugiere la necesidad de un manejo agronómico adecuado. En conjunto, los resultados indican que el agua residual tratada evaluada es apta para su reúso agrícola bajo condiciones controladas y con monitoreo continuo.

Introducción

El agua es un recurso esencial para la producción agrícola, especialmente en regiones donde la disponibilidad hídrica es limitada. A nivel mun-

dial, la agricultura consume aproximadamente el 70 % del agua dulce disponible, lo que ha llevado a una presión creciente sobre los recursos hídricos [1]. Por otra parte, el cambio climático ha prolongado el ciclo de sequías en varias zonas del mundo, agudizando la problemática alrededor del agua.

El Valle de Mexicali representa una de las principales zonas agrícolas del noroeste del país, siendo caracterizada por un clima árido extremo y una fuerte dependencia del riego para la producción de cultivos forrajeros. Bajo este contexto, la reutilización de aguas residuales tratadas surge como una estrategia clave para reducir la sobreexplotación de agua dulce y promover el uso eficiente del recurso hídrico [2].

Diversos estudios han señalado que el uso de agua residual tratada en la agricultura puede aportar nutrientes al suelo, como nitrógeno y fósforo, contribuyendo al crecimiento de los cultivos y reduciendo la necesidad de fertilización con estructura química [3]. No obstante, su utilización conlleva riesgos potenciales asociados a la salinidad, la presencia de microorganismos dañinos y compuestos potencialmente tóxicos, por lo que resulta indispensable evaluar su calidad conforme a criterios técnicos y normativos, de tal forma que agua pueda ser usada de manera segura en la agricultura.

En México, la regulación del uso de agua residual en riego agrícola se rige de acuerdo con la NOM-003 SEMARNAT-1997 [4]. Esta norma establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las descargas y el reúso de aguas residuales, incluyendo parámetros físico-químicos y microbiológicos clave para la protección del ambiente y la salud pública. En este estudio, se evalúa la calidad del agua residual tratada generada en la Planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) del Instituto de Ciencias Agrícolas (ICA) de la universidad autónoma de Baja California. Además, se analiza su uso potencial en el riego de cultivos forrajeros en el Valle de Mexicali.

Metodología

Se analizaron parámetros fisicoquímicos, microbiológicos y de metales pesados de un efluente de aguas residuales tratadas. Los valores promedio se compararon con los límites máximos permisibles de la NOM-003-SEMARNAT-1997 y NOM-001-SEMARNAT-2021 [4][5]. Los parámetros evaluados incluyeron: pH, temperatura, grasas y aceites, *Escherichia coli*, demanda química de oxígeno (DQO), sólidos suspendidos totales (SST), nitrógeno total, fósforo total y una batería de metales pesados (As, Cd, CN⁻, Cu, Cr, Hg, Ni, Pb, Zn).

Resultados y discusión

En la Tabla 1 se presentan los resultados obtenidos de los análisis fisicoquímicos y microbiológicos realizados al agua residual de la PTAR, comparado con los valores permisibles de acuerdo con la NOM 003.

Parámetros fisicoquímicos y microbiológicos

El pH promedio de 7.3 se encuentra dentro de los rangos recomendados tanto por la NOM-003 como por estudios internacionales para riego agrícola, los cuales sugieren generalmente rangos moderados que no afecten negativamente la disponibilidad de nutrientes en suelos agrícolas (pH ~6.5–8.4) y favorezcan la retención de macronutrientes en procesos de infiltración [6]. La temperatura media de 33.6 °C también está por debajo del límite permisible, lo cual es importante para preservar la calidad biológica del suelo y evitar estrés térmico en cultivos en zonas tropicales y subtropicales.

En cuanto a la contaminación microbiológica, el muy bajo recuento de *E. coli* (3.78 NMP/100 mL) indica un tratamiento muy eficiente en comparación con otros casos reales de reúso, donde recuentos elevados de coliformes han sido reportados como limitantes para riego agrícola y pueden representar un riesgo a la salud pública cuando superan estándares permisibles [7].

Tabla 1

Análisis fisicoquímicos y microbiológicos del agua residual tratada.

Parámetro	Unidad	Promedio	Valor permisible NOM 003
Ph	UpH	7.3	6-9
Temperatura (°C)	°C	33.6250	35.0
Grasas y aceites	mg/L	5.0	15.0
Escherichia coli	NMP/100 mL	3.78	250.0
Dqo	mg/l	113.0	150.0
Sólidos suspendidos totales	mg/L	31.05	60.0
Nitrógeno total (sumatoria)	mg/L	27.51	25.00
Fósforo total	mg/L	11.10	15.00
Arsénico	mg/L	0.0100	0.20
Cadmio	mg/L	0.0020	0.20
Cianuros	mg/L	0.0050	1.00
Cobre	mg/L	0.0054	4.00
Cromo	mg/L	0.0050	1.00
Mercurio	mg/L	0.0005	0.01
Níquel	mg/L	0.0015	2.00
Plomo	mg/L	0.0050	0.20
Zinc	mg/L	0.0260	10.00

Materia orgánica y sólidos

La DQO promedio (113 mg/L) y los SST (31.05 mg/L) se encuentran por debajo de los valores máximos permitidos, lo que indica que el agua tiene una carga orgánica residual moderada y una correcta remoción de materias en suspensión. Esto concuerda con experiencias exitosas de sistemas biológicos y humedales construidos reportados en la literatura, que muestran eficiencias elevadas en la remoción de contaminantes organolépticos y sólidos cuando se implementan etapas adicionales de tratamiento [8].

Nutrientes: nitrógeno y fósforo

El fósforo total (11.10 mg/L) es menor que los límites permisibles y se encuentra dentro de los rangos típicos observados en aguas residuales tratadas domésticamente (6–20 mg/L), lo que puede beneficiar la fertilidad del suelo sin causar problemas de eutrofización significativa [9]. Sin embargo, el nitrógeno total (27.51 mg/L) excede ligeramente el valor permisible de la NOM-003 (25 mg/L). A nivel internacional, la literatura indica que las aguas residuales suelen contener entre 20 y 85 mg/L de nitrógeno total y que niveles elevados pueden representar un riesgo de lixiviación de nitratos y contaminación de aguas subterráneas si no se gestionan adecuadamente [6]. Este excedente sugiere que se deben fortalecer prácticas de manejo agronómico o considerar etapas adicionales de tratamiento de nitrógeno si se busca minimizar riesgos ambientales a largo plazo.

Metales pesados

Los metales pesados estudiados (As, Cd, Hg, Pb, Cr, Ni, Cu, Zn) se encontraron ampliamente por debajo de los límites establecidos por la NOM, con niveles comparables o menores que los reportados en experiencias previas de reúso agrícola exitoso y sin riesgo aparente de acumulación tóxica en los suelos. Esto concuerda con reportes internacionales que destacan que, aunque los metales pesados pueden representarse en aguas residuales, en muchos casos las concentraciones finales tras tratamiento avanzado son lo suficientemente bajas como para no presentar riesgos agudos [10].

Conclusiones

Los análisis realizados demuestran que el agua residual tratada cumple con la mayoría de los criterios establecidos en la NOM-003-SEMARNAT-1997 para reúso agrícola, con parámetros fisicoquímicos, microbiológicos y de toxicidad de metales dentro de rangos permisibles. El nitrógeno total excedente sugiere la necesidad de un enfoque agronómico o técnico adicional para garantizar la sostenibilidad a largo plazo. En comparación con la literatura científica, los resultados reflejan tendencias consistentes con estudios exitosos de reúso agrícola en diferentes regiones del mundo y refuerzan la importancia de mantener programas de monitoreo continuo para proteger la salud humana y ambiental.

Referencias

- [1] ONU-Agua. (2023). *World Water Development Report 2023*. UNESCO.
- [2] FAO. (2018). *Crop water requirements: Forage crops*. Food and Agriculture Organization.
- [3] Mishra, S. et al. (2023). *Use of treated wastewater as irrigation water: A review*.
- [4] SEMARNAT. (1997). Norma oficial mexicana Nom-003-ecol-1997, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reúsen en servicios al público índice.
- [5] SEMARNAT. (2021). Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-2021, límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales.
- [6] Omer, A. M. (2019). Assessment of recycled treated wastewater for sustainable tomato crop production: A comprehensive review. *Science of The Total Environment*, 827, 154362. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.154362>
- [7] Radwan, M. A. (2014). Quality of wastewater reuse in agricultural irrigation and its impact on public health. *Journal of Environmental and Public Health*, 2014, 1-10. PubMed PMID: 25085428

- [8] Castañeda-Villanueva, A. A., López-Cerpa, A. N., & Huerta-Orozco, R. (2025). Reducción de contaminantes en sistemas para tratamiento y reúso de aguas residuales mediante humedales construidos. *Revista Latinoamericana de Recursos Naturales*, 21(1), 22-29.
- [9] Pérez, C. F., Madera-Parra, C. A., Echeverri-Sánchez, A. F., & Urrutia-Cobo, N. (2015). Reúso de aguas residuales: impacto en los atributos químicos y macronutricionales en un suelo inceptisol irrigado con aguas residuales domésticas tratadas. *Ingeniería y Competitividad*, 17(2), 19-28. Recuperado de
- [10] Christou, A., Beretsou, V.G., Iakovides, I.C. et al. Sustainable wastewater reuse for agriculture. *Nat Rev Earth Environ* 5, 504–521 (2024). <https://doi.org/10.1038/s43017-024-00560-y>