



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS
ESCUELA DE POSTGRADO

**EVALUACIÓN DE MUCÍLAGO DE NOPAL (*Opuntia ficus-indica* Mill.)
Y DOCA (*Carpobrotus chilensis*) PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS
RESIDUALES DE ACEITUNA Y SU POTENCIAL REUTILIZACIÓN
EN RIEGO AGRÍCOLA**

**EVALUATION OF NOPAL (*Opuntia ficus-indica* Mill.) AND DOCA
(*Carpobrotus chilensis*) MUCILAGES FOR THE TREATMENT OF OLIVE
WASTEWATER AND ITS POTENTIAL REUSE IN AGRICULTURAL
IRRIGATION**

Actividad Formativa Equivalente a Tesis para optar al Grado de
Magíster en Manejo de Suelos y Aguas

PATRICIA ORIANA AGUILERA FELIU

Directoras de Tesis
Yasna Tapia Fernández
Carmen Sáenz Hernández

Profesores Consejeros
Manuel Paneque Corrales
Oscar Seguel Seguel


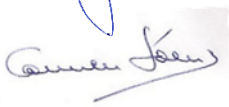


SANTIAGO - CHILE
2024

UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS ESCUELA
DE POSTGRADO

EVALUACIÓN DE MUCÍLAGO DE NOPAL (*Opuntia ficus-indica* Mill.) Y DOCA (*Carpobrotus chilensis*) PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DE ACEITUNA Y SU POTENCIAL REUTILIZACIÓN EN RIEGO AGRÍCOLA

Actividad Formativa Equivalente a Tesis presentada para optar al
al Grado de Magíster en Manejo de Suelos y Aguas

PATRICIA ORIANA AGUILERA FELIU

	Calificaciones
DIRECTORAS DE TESIS	
Yasna Tapia Fernández Ingeniero en Alimentos, Dra. Química Agrícola	 5,8
Carmen Sáenz Hernández Químico Farmacéutico, Dra. en Farmacia	 5,8
PROFESORES CONSEJEROS	
Manuel Paneque Corrales Bioquímico, Dr. En Ciencias Biológicas	 6,0
Oscar Seguel Seguel Ing. Agrónomo, Dr. En Ciencias Agrarias	 6,2

Santiago, Chile
2024

AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mis agradecimientos a la Fundación Nacional para la Superación de la Pobreza, con quien desarrollé esta tesis en el marco del programa Tesis País y que me permitió entender la relevancia social de la escasez hídrica y aprender sobre políticas públicas y gobernanza de aguas, además de su apoyo constante en cursos y referencias bibliográficas relevantes para este estudio. Al profesor Álvaro Peña, del Laboratorio de cromatografía y análisis de alimentos, del Departamento de Agroindustria y Enología, Facultad de Ciencias Agronómicas, Universidad de Chile, por facilitar el equipo y los materiales para el micro filtrado de las aguas.

Proyecto Fondecyt Regular 1210922 Irrigation with mining water and organic amendment addition for phytostabilization of tailings, monitoring of leaching of metals and sulfates.

ÍNDICE

RESUMEN	1
ABSTRACT	2
INTRODUCCIÓN	3
OBJETIVOS	5
MATERIALES Y MÉTODO	6
Ubicación del estudio	6
Caracterización del agua residual	6
Elaboración de polvos vegetales	7
Pretratamiento de aguas en columnas de suelo	8
Aplicación de polvos vegetales	9
Análisis químicos de las aguas tratadas	9
Análisis estadístico	10
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	11
CONCLUSIONES	17
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	19

RESUMEN

En el proceso de producción de aceituna de mesa se generan grandes volúmenes de agua residuales, cuya calidad química no permite su reutilización. Actualmente, el problema de la escasez de agua hace necesaria la búsqueda de tratamientos sustentables de aguas residuales, destacando los mucílagos de especies vegetales, que actúan como agentes adsorbentes de elementos químicos. El material vegetal de las especies nopal (*Opuntia ficus-indica*) y doca (*Carpobrotus chilensis*) es de interés, debido a que han demostrado capacidad para disminuir concentraciones de elementos en aguas. El objetivo del presente trabajo fue evaluar el mucílago de nopal y doca para el tratamiento de aguas residuales de la industria de la aceituna de mesa y su potencial reutilización en riego agrícola. En condiciones de laboratorio se establecieron ensayos con agua residual del proceso de elaboración de aceitunas de mesa, obtenida de una planta productora de Tiltil, Región Metropolitana de Chile. Previamente se realizó un pretratamiento pasando el agua por columnas de suelo. Las hojas de nopal y doca se secaron, molieron y tamizaron a 300 μm . Polvos de nopal y doca se aplicaron al agua residual en distintas dosis (4 y 8 g L^{-1}). La concentración de elementos en las aguas tratadas se comparó con la norma chilena NCh1333. Los resultados indican que el pretratamiento con suelo resultó efectivo para disminuir la alta concentración de Na y K, de 3883 y 777 mg L^{-1} a 39,9 y 31,5 mg L^{-1} respectivamente. El tratamiento de aguas que incluyó la mezcla de 4 g L^{-1} de nopal y 4 g L^{-1} de doca disminuyó significativamente la concentración de Na y cumplió la normativa NCh 1333 para el Na porcentual. Para el caso de Cl^- y SO_4^{2-} , ninguno de los tratamientos disminuyó su concentración, excediendo la normativa chilena NCh1333. Las conclusiones señalan que la aplicación de la mezcla de polvos de nopal y doca como tratamiento de aguas residuales de la elaboración de aceituna resultó efectiva para disminuir la concentración de Na, K y neutralización de pH. Además, el agua tratada cumple con la normativa chilena NCh1333 para el parámetro de Na porcentual.

Palabras claves: sustentabilidad, economía circular, clarificación, desalinización, sodio, calidad de agua para riego, *Olea europaea*.

ABSTRACT

The ripening of olives to produce table olives generates large volumes of water that are generally discarded because their chemical quality does not allow their reuse. Currently, the problem of water scarcity makes it necessary to search for sustainable wastewater treatment, highlighting the mucilage of plant species that act as adsorbent agents for chemical elements. The plant material of the species nopal (*Opuntia ficus-indica*) and doca (*Carpobrotus chilensis*) is of interest, because they have demonstrated their capacity to reduce the concentration of elements in water. The objective of the present work was to evaluate nopal and doca mucilage for the treatment of wastewater from the olive industry and its potential reuse in agricultural irrigation. The methodology consisted of several trials under laboratory conditions with wastewater from the table olive processing. The wastewater was obtained from a table olive production plant in Tiltil, Metropolitan Region of Chile. Nopal and doca leaves were dried and sieved at 300 μm . Previously, a pretreatment of the water was carried out in soil columns. Subsequently, nopal and doca powders were applied to the water at different doses (4 g L^{-1} and 8 g L^{-1}) and mixtures. The concentration of elements in the treated water was compared with Chilean water quality requirements for different uses. The conclusions indicate that the application of the mixture of nopal and doca powders as a treatment for olive processing wastewater was effective in reducing the concentration of Na, K, %Na and pH neutralization, complying with the NCh1333 regulations for the Na these parameters.

Key words: Sustainability, circular economy, clarification, desalinization, sodium, water irrigation quality, *Olea europaea*

INTRODUCCIÓN

El olivo pertenece a la Familia botánica de las Oleaceae y es la única especie con fruto comestible de esta familia, es una especie resistente al estrés hídrico ya que posee adaptaciones fisiológicas que le permiten mantener la turgencia y el metabolismo de hojas y raíces (Luengo, 2006). La cosecha de aceitunas para mesa en la Región de Atacama es de 12.000 toneladas anuales, un alto porcentaje de ella es comercializada en salmuera, proceso intermedio dentro de la elaboración de las aceitunas, requiriendo un proceso de término, la que mayoritariamente se realiza en industrias fuera de esta región, ejemplo de esto es la Comuna de Tiltil, en la zona central (Tapia, 2016). Estos tratamientos son en parte para disminuir la concentración de la oleuropeína, metabolito natural que le confiere un sabor amargo al fruto (Valdebenito, 2006), para lo cual se requiere del uso de grandes cantidades de agua que resulta en un efluente de agua turbia, oscura y alta en sales (Niazmand *et al.*, 2019), constituyendo una potencial fuente de agua para riego según diversos autores (Villabona *et al.*, 2013; Choque-Quispe *et al.*, 2022; Miller *et al.*, 2008; Chiban *et al.*, 2011; Lisintuña *et al.*, 2020).

La planta de procesamiento de aceitunas Miguel Donaire, ubicada en Tiltil, en la Región Metropolitana, reprocesa aceitunas que tienen un proceso de 3 meses. Al llegar a la planta se les hace un lavado para bajar los niveles de salinidad del agua con que vienen transportadas, que es de un 14% aproximadamente, además de una regulación de acidez con ácido acético al 90%. Posteriormente se agrega soda cáustica (hidróxido de sodio, NaOH), durante 12 horas, para finalmente hacer tres lavados con agua (Donaire, 2023).

El procesamiento de las aceitunas genera grandes volúmenes de agua residual que no tienen otro destino que el pago para su retiro y posterior tratamiento en empresa Aguas Andinas. Estas aguas residuales incumplen las normativas de uso de calidad de agua para diferentes usos en Chile (NCh 1333, 1987), por lo que es de interés investigar un proceso de tratamiento de dichas aguas que permita su eventual uso en riego.

El nopal (*Opuntia-indica spp.*) es una planta originaria en México central, destacando por su contenido de nutrientes que hasta ahora han sido poco aprovechados y estudiados; el nopal es rico en fibra dietética, de la cual forman parte los polisacáridos, oligosacáridos, mucílagos, lignina y sustancias vegetales asociadas (Aguilera, 2012). El mucílago de nopal se compone de una mezcla de carbohidratos formada por cantidades variables de L-arabinosa, D-galactosa, L-ramnosa y D-xilosa, así como ácido galacturónico (Mnif y Ben Rebah, 2023). Esta fracción es la más importante desde el punto de vista funcional, ya que contiene grupos funcionales como los grupos hidroxilo, amina, carbonilo, carboxilo que pueden reaccionar con varios iones metálicos, identificando así al mucílago, como un ingrediente activo con capacidad de adsorción (Barbera *et al.*, 2023; Choque-Quispe *et al.* 2022). Estos componentes mencionados que son parte del mucílago del nopal tienen actividad coagulante, capaz de neutralizar las cargas electroestáticas de los coloides suspendidos en el agua, permitiendo su aglomeración hasta formar macropartículas de fácil sedimentación (Villabona *et al.*, 2013).

La doca (*Carpobrotus* spp.) es una especie nativa de Sudáfrica y una de las plantas más invasoras en los ecosistemas de la costa del Mediterráneo (Novoa *et al.*, 2012), presentando propiedades adsorbentes de iones gracias a sus grupos funcionales como carboxilo, hidroxilo y amina (Chiban *et al.*, 2011), lo que la hace un potencial candidata para su uso en depuración de aguas procedentes de procesos agroindustriales.

Lisintuña *et al.* (2020) utilizaron un extracto acuoso de mucílago de nopal extraído con etanol, el cual redujo en un 70% la turbidez de aguas residuales de una industria láctea; además, el pH varió de alcalino a ácido y aumentó el porcentaje de oxígeno disuelto de 4,5% a 5,8%. Otros trabajos, como el de Miller *et al.* (2008), utilizaron una maceración del parénquima y un polvo de nopal con una metodología de cortes de cladodios secos y molidos a una granulometría de 300 μm , junto a semillas de moringa (*Moringa oleífera* Lam.) molidas en la misma medida del nopal, obteniendo reducciones de turbidez de un 98% en agua formulada con agua desionizada con adición de cantidades conocidas de cloruro de potasio (KCl), bicarbonato de sodio (NaHCO_3), cloruro de magnesio (MgCl_2) y carbonato de calcio (CaCO_3). Con respecto a la doca (*Carpobrotus* spp.), hay escasas investigaciones en el área de la clarificación de aguas, pero de acuerdo con el análisis de Chiban *et al.* (2011) podría tener buenos resultados, ya que contiene grupos funcionales similares a los del nopal.

Si bien el proceso de clarificación actualmente se produce de forma estandarizada con sulfato de aluminio y hierro, estos son arrastrados durante la sedimentación de lodos, lo que se convierte en un problema ambiental, ya que el Al en altas dosis puede ser tóxico en las plantas (Miller *et al.*, 2008). El mucílago de nopal y doca son una alternativa a los coagulantes tradicionales y una opción sustentable para el tratamiento de aguas (Lisintuña, 2020), relacionada a un manejo práctico y de bajo costo (Miller *et al.*, 2008).

El cambio climático global ha afectado significativamente la estructura y los procesos de las tierras, dando lugar a cambios importantes en la provisión de servicios ecosistémicos (SE) en múltiples escalas (Smith-Ramírez *et al.*, 2023). El impacto del cambio climático se ha sentido con mayor intensidad en la región de clima mediterráneo de Chile, lugar donde se encuentra la Comuna de Tiltil, asociado a un déficit de lluvias de hasta un 38% durante la última década, período identificado como mega sequía regional (Garreaud *et al.*, 2017). Por lo tanto, se hace necesario evaluar tratamientos de aguas con alto potencial de aplicación de bajo costo y fácil implementación, para que esas aguas sean reutilizadas para riego agrícola de los cultivos de la zona, que son olivos y nopales principalmente.

La Región Metropolitana tiene mayoritariamente pequeños agricultores con superficies menores a 20 hectáreas (ODEPA, 2019), existiendo 22.210 hectáreas de olivos y 538 hectáreas de nopal (ODEPA, 2017), lo que abre una interesante ventana para trabajar con ambos cultivos, creando procesos de reutilización de agua industrial.

Este estudio resulta altamente prometedor como alternativa de rehabilitación de aguas industriales con métodos ambientalmente seguros y utilizando para esto materiales locales que, además, tienen la ventaja que son especies vegetales de bajo consumo hídrico y escaso manejo cultural, siguiendo el objetivo de la agenda 2030 (Drechsel *et al.*, 2023), que se centra en las 3 dimensiones del desarrollo sostenible (económica, social y ambiental).

OBJETIVOS

Objetivo general

Evaluar el mucílago de nopal y doca para el tratamiento de aguas residuales de la industria de la aceituna y su potencial reutilización en riego agrícola.

Objetivos específicos

1. Evaluar las características químicas de las aguas residuales proveniente de la industria de aceitunas de mesa.
2. Comparar las características químicas de aguas residuales de la industria aceitunera después de aplicar distintas dosis de polvo de nopal y polvo de doca con las aguas sin tratamiento.
3. Evaluar la calidad de aguas residuales de la industria aceitunera tratadas con nopal y doca respecto a la normativa chilena de calidad de aguas para distintos usos NCh1333.

MATERIALES Y MÉTODO

Ubicación del estudio

El estudio se llevó a cabo durante los meses abril de 2022 y diciembre de 2023 en el Laboratorio de Química de Suelos y Aguas de la Facultad de Ciencias Agronómicas de la Universidad de Chile, ubicado en la Comuna de La Pintana, en la Región Metropolitana de Chile. Las muestras de aguas residuales se obtuvieron de los estanques de desechos líquidos de la productora de aceitunas de mesa Miguel Donaire, ubicada en la Comuna de Tiltil (33°05'LS, 70°56'LO), Región Metropolitana de Chile.

Método

Caracterización del agua residual de elaboración de aceituna

El agua residual del proceso de elaboración de aceituna (color negro y de apariencia aceitosa) se caracterizó según la metodología de Sadzawka (2006), para los parámetros indicados en la norma de calidad de agua para riego (NCh1333, 1987).

-pH y conductividad eléctrica (CE): medición directa en las aguas mediante electrodos utilizando un pH metro y un conductímetro marca Hanna modelo HI 3222 y HI 5522 respectivamente.

-Sólidos totales disueltos (STD): medición directa en las aguas, equipo Hanna modelo HI 4321.

-Calcio, magnesio, potasio y sodio totales (Ca, Mg, K y Na): digestión con HNO₃ en equipo microondas CEM modelo MARS™. Medición en espectrofotometría de absorción atómica (EAA) PerkinElmer modelo PinAAcle 500.

-Bicarbonatos y carbonatos (HCO₃⁻ y CO₃²⁻): Titulación con ácido sulfúrico

-Boro (B): colorimetría azometina-H utilizando un equipo Hach DR5000.

-Cloruros (Cl⁻): titulación con nitrato de plata usando cromato de potasio como indicador.

-Sulfatos (SO₄²⁻): colorimetría con cromato de bario y medición en equipo Shimadzu UV 1280.

-Relación de adsorción de sodio (RAS): según fórmula indicada en NCh 1333 (1987), Ec.1 en meq L⁻¹, medida del efecto del sodio dada por la relación entre las concentraciones de iones sodio, calcio y magnesio.

$$RAS = \frac{Na}{\sqrt{\frac{Ca + Mg}{2}}}$$

-Sodio porcentual (%Na): según fórmula indicada en NCh1333 (1987), Ec. 2.

$$Na \% = \frac{Na}{Na + Ca + Mg + K} \cdot 100$$

-Turbidez (NTU): en equipo Hanna modelo HI83414

La evaluación de riesgo de infiltración del agua en suelo se hizo según parámetros FAO (Ayers y Westcot, 1985) (Cuadro 1).

Cuadro 1. Grado de restricción de uso de agua según RAS (relación de adsorción de sodio) y CE (conductividad eléctrica) (Ayers y Wescot, 1985)

Problema Potencial		Unidades	Grado de restricción de uso			
			Ninguna	Ligera a Moderada	Severo	
Salinidad						
CE		dS/m	< 0,7	0,7 – 3,0	> 3,0	
TDS		mg/l (ppt)	< 450	450 – 2000	>2000	
Infiltración (RAS_CE)						
RAS =	0 – 3	y CE =	dS/m	> 0,7	0,7 – 0,2	< 0,2
=	3 – 6	y CE =	dS/m	> 1,2	1,2 – 0,3	< 0,3
=	6 – 12	y CE =	dS/m	> 1,9	1,9 – 0,5	< 0,5
=	12 – 20	y CE =	dS/m	> 2,9	2,9 – 1,3	< 1,3
=	20 – 40	y CE =	dS/m	> 5,0	5,0 – 2,9	< 2,9

Elaboración de polvos vegetales

El polvo de nopal se elaboró según la metodología descrita por Beyá-Marshall et al. (2022), seleccionando cladodios de 30 días, los que fueron lavados, cortados en láminas delgadas y secados en un deshidratador de aire forzado a 40°C hasta peso constante. El material seco fue molido con molinillo de laboratorio, tamizado a una granulometría de 300 µm y mantenido en bolsas selladas y en condiciones secas hasta su utilización en el agua. Chiban et al. (2011) mencionan la elaboración de polvo de doca, pero sin detalles de parámetros en cada etapa del proceso, por lo que, para efectos de uniformidad de procesos, se decidió repetir el proceso para el polvo de nopal. Plantas jóvenes de doca se cosecharon manualmente en mayo de 2023, lavándose con agua potable para eliminar polvo adherido. Las hojas de cada planta fueron cortadas en láminas finas y llevadas a secado en deshidratador de aire forzado a 40°C hasta peso constante, constatando durante el proceso que el aspecto fuese una hoja seca. El material seco fue molido con molinillo de laboratorio, tamizado a una granulometría de 300 µm y mantenido en bolsas selladas y en condiciones secas hasta su utilización en el agua (Figura 1).



Figura 1. Polvo de doca aplicado en los tratamientos para el agua residual.

Pretratamiento de aguas residuales en columnas con suelo

El agua residual fue evaluada, comparando con los parámetros de agua para riego agrícola en la NCh1333 (1987) y water quality for agriculture (Ayers y Wescot, 1985), concluyendo que tanto cationes como aniones, pH, SDT y CE presentaron valores muy por fuera de ambas guías de calidad de agua, por lo cual, antes de aplicar los polvos de nopal y doca se evaluaron varios pretratamientos. Los pretratamientos evaluados fueron método de filtro por pasta saturada de suelo, filtro mecánico con membranas de polietileno de diferentes densidades, filtro con carbón activado y columnas de intercambio iónico con diferentes composiciones que incluyeron suelo y escoria. Los procesos de intercambio iónico se mencionan como removedor de materia orgánica, iones metálicos y no metálicos (Rocha et al., 2021, Guida et al., 2021) en el tratamiento de aguas residuales. Esto con el objetivo de clarificarla y disminuir el aceite en suspensión.

Finalmente se seleccionó el pretratamiento de aguas residuales que consistió en el paso del agua residual por columnas con suelo. El suelo se obtuvo de la Facultad de Ciencias Agronómicas que pertenece a la Serie Santiago (CIREN, 1996). Las columnas son de policarbonato (5 cm de diámetro y 30 cm de alto) (Figura 2). A cada columna ($n=20$) se le agregaron 500 mL de agua residual de aceituna y el lixiviado recolectado se consideró agua pretratada (T0.1). La composición de las columnas fue de 10 cm de suelo, 5 cm de escoria de acero y 5 cm de perlita.



Figura 2. Columnas de lixiviación para el pretratamiento de aguas residuales de elaboración de aceituna.

Aplicación de polvos vegetales

A las aguas pretratadas en columnas de suelos se les agregaron los polvos de nopal y doca según los tratamientos indicados en el Cuadro 2. Las 28 unidades experimentales, en matraces Erlenmeyer de 250 mL, se dejaron en agitación constante por 24 horas a 200 rpm y temperatura ambiente, sellados con papel Parafilm siguiendo un diseño experimental de bloques completamente al azar.

Cuadro 2. Tratamientos de aguas residuales de la elaboración de aceitunas.

Tratamientos	Polvos de nopal (g L ⁻¹)	Polvos de doca (g L ⁻¹)	Repeticiones
T01-control	0	0	4
T1	8	0	4
T2	0	8	4
T3	4	4	4
T4	4	0	4
T5	0	4	4
T6	2	2	4
Total unidades experimentales			28

Análisis químicos de las aguas tratadas

A las aguas tratadas se realizaron análisis químicos de distintos parámetros según la metodología para agua de riego (Sadzawka, 2006). Los parámetros analizados fueron pH, CE, STD, Ca, Mg, K, Na, HCO₃⁻, B, CO₃²⁻, Cl⁻, SO₄²⁻, alcalinidad total, RAS, %Na y turbidez.

Para determinar la concentración total de Ca, Mg, K y Na el agua tratada fue micro filtrada, mediante una bomba mecánica de 10 kPa, usando una membrana de ésteres de celulosa (MCE) de 0,45 μm para reducir los sólidos en suspensión (Figura 3).



Figura 3. Método de micro filtrado de agua para el análisis de elementos totales

Análisis estadístico

La información fue obtenida en cuadruplicado, con un análisis de varianza ANDEVA. Para determinar diferencias significativas se realizó la prueba de Tuckey con un nivel de significancia (p) de 0,05. El programa estadístico utilizado fue Infostat estudiantil versión 2020.

RESULTADOS Y DISCUSION

Las principales características químicas del agua residual de los estanques del proceso de aceituna de mesa se presentan en el Cuadro 3, junto a los requisitos que se indican en la norma NCh1333 (1987) para agua de riego. El agua residual es fuertemente alcalina y salina.

Cuadro 3. Análisis químico agua residual de la elaboración de aceituna de mesa y comparación con los límites de la norma NCh 1333

Parámetro		Promedio	NCh 1333
pH		11,0±0,15	5,5-9,0
CE	$\mu\text{S cm}^{-1}$	53.000 ±3400	0,75-7,5
Sólidos totales disueltos	mg L^{-1}	29.390±1768	500-5000
Cationes			
Calcio	mg L^{-1}	30,2±4,61	-
Magnesio	mg L^{-1}	32,7±1,48	-
Potasio	mg L^{-1}	777±287	-
Sodio	mg L^{-1}	3883±443	-
Aniones			
Bicarbonatos	mg L^{-1}	nd	-
Boro	mg L^{-1}	14,3±0,31	0,75
Carbonatos	mg L^{-1}	78,9±2,83	-
Cloruros	mg L^{-1}	3970±105	200
Sulfatos	mg L^{-1}	4907±127	250
Otros parámetros			
Alcalinidad total	$\text{mg L}^{-1} \text{CaCO}_3$	3825±10,2	-
RAS	-	116±13,2	*
Sodio porcentual	%	87,4±4,62	35
Turbidez	NTU	297±29,3	-

* La autoridad competente debe establecerla en cada caso específico

Niazmand *et al.* (2019), realizaron una caracterización fisicoquímica de agua residual de aceituna de mesa en la ciudad de Mashhad (Irán), donde se midió un pH de 4,4, su valor de STD fue de $153,6 \text{g L}^{-1}$ y el valor de CE de $162,8 \text{mS cm}^{-1}$. Aziz *et al.* (2023) en su caracterización de agua residual de aceituna de mesa en la provincia Marrakech (Marruecos) obtuvieron valores de pH de 4,11 y CE de $14,44 \text{mS cm}^{-1}$. Estos valores difieren bastante en con el valor de la CE del presente estudio, lo cual, podría explicarse porque el proceso de maduración puede variar en las diferentes plantas de procesamiento, ya que si bien el proceso descrito para obtener el producto final es el mismo en las literaturas citadas, los productos utilizados en la maduración, las variedades de olivas y el tiempo y cantidades de agua utilizadas pueden diferir y en eso reside la diferenciación de las distintas marcas/industrias, en sus diferencias organolépticas finales. Además, estos detalles no están indicados con claridad en los estudios analizados, ya que forman parte del secreto industrial de cada empresa, como se pudo constatar en las visitas realizadas a la planta productora de este

estudio, la que fue visitada en 2022 y 2023, registrando diferencias en el proceso, el que se adecúa en cada temporada (Donaire, 2023).

El pretratamiento de las aguas residuales de aceituna en columnas de suelos disminuyó notablemente la concentración de Na de 3883 mg L⁻¹ (Cuadro 3) a 38,9 mg L⁻¹ (Cuadro 5) y de K de 777 mg L⁻¹ (Cuadro 3) a 31,5 mg L⁻¹, (Cuadro 5) atribuible a la retención de estos cationes en el complejo de cambio del suelo. Sin embargo, las especies Cl⁻ y SO₄²⁻ (Cuadro 1), también muy abundantes en estas aguas residuales, no disminuyeron la concentración con el pretratamiento de suelos (Cuadro 6). El suelo naturalmente cumple la función de depurar aguas y varias investigaciones han utilizado suelo para disminuir o controlar altas concentraciones de elementos en las aguas (Janzen *et al.*, 2009; Pressl *et al.*, 2019; Pravin *et al.*, 2019). Una revisión de beneficios agrícolas y ambientales de la escoria de acero (O'Connor *et al.*, 2021) también documenta la capacidad de adsorción de elementos minerales, nombrándose incluso como enmienda de suelos.

La CE del agua tratada fue extremadamente alta y no permite su utilización en riego agrícola (Cuadro 3). Si bien el pretratamiento del agua residual inicial en columnas de suelo disminuyó el valor de CE de 53.000 a 42.172 $\mu\text{S cm}^{-1}$. La NCh1333 (1987), establece un límite de 7.500 $\mu\text{S cm}^{-1}$ con relaciones entre CE y SDT y quedan a criterio de la autoridad competente, según el tipo de cultivo, manejo del agua y calidad excepcional del suelo; mientras que Ayers y Wescot (1985), establecen un límite de 3000 $\mu\text{S cm}^{-1}$, relacionado también con SDT, calificado como de riesgo severo de restricción de uso (define salinidad como las sales en suelo o el agua que reducen la disponibilidad del agua para los cultivos hasta tal punto que el rendimiento se ve afectado). Las aguas residuales del proceso de aceituna son extremadamente salinas debido a que las sales NaCl y NaOH se adicionan en el proceso de elaboración. El factor salinidad es crítico en estas aguas y CE alcanza valores del agua de mar (57.000-60.000 $\mu\text{S cm}^{-1}$) (Boyd, 2015). Niazmand *et al.* (2019) en una caracterización de agua residual de la elaboración de aceituna de mesa encontraron valores de CE elevadas (162,8 mS cm⁻¹), debido a la adición de NaCl y NaOH en las etapas de elaboración de aceituna de mesa, siendo un valor mayor al del agua utilizada en este estudio, por lo que considerando que es un parámetro crítico en el agua de riego, los tratamientos utilizados tienen la capacidad de reducir la CE de soluciones muy salinas, pero con las dosis empleadas, no es posible dejarlas aptas para riego agrícola. En el agua residual de este estudio la CE del agua sin tratar fue de 53.098 mS cm⁻¹, sin embargo, ni las columnas de intercambio iónico ni los tratamientos con polvos vegetales, dejaron el agua dentro de los parámetros que indica la norma NCh1333 (1987) para riego agrícola, sin embargo, se redujo el valor a 38,987 mS cm⁻¹ en T2 (Cuadro 4), lo que indica que los tratamientos tienen capacidad de reducción del contenido de sales, evaluada como un problema de salinidad, junto con los STD (Ayers y Wescot, 1985).

La turbidez disminuyó notablemente en el agua residual con el paso por las columnas de suelos desde 297 NTU (Cuadro 3) a 106 NTU (Cuadro 4). Después de aplicados los tratamientos la turbidez no presentó diferencias significativas entre los tratamientos. La menor concentración usada de polvo de nopal (T4) genera una mayor transparencia del agua. Esto puede atribuirse a que el mucílago obtenido de polvo vegetal hidratado da como resultado una sustancia gelatinosa, turbia, que aumentaría la turbidez al ser aplicada en mayores cantidades. El mucílago de nopal generó más turbidez que el mucílago de doca.

La turbidez aumentó con el aumento de dosis de polvos vegetales, contrario a lo reportado por Lisintuña *et al.* (2020), ellos disminuyeron en un 70% la turbidez de agua residual de la industria láctea usando mucílago de nopal obtenido con extracción etanólica. Villabona *et al.* (2013) redujeron la turbidez en agua de canal en Puerto Bolívar, Colombia, en un 70% utilizando mucílago de nopal obtenido por extracción Soxhlet. Miller *et al.* (2008), redujeron la turbidez en agua turbia modelada, basada en la composición del agua potable de Venezuela. Esto se podría explicar porque en este estudio se utilizaron cladodios y hojas sin pelar, solo sometidas a deshidratación, lo que puede haber influido en que no se haya conseguido reducción en la turbidez después de los tratamientos.

Después de aplicados los tratamientos (Cuadro 2), se observó que el pH en las aguas disminuyó significativamente en todos los tratamientos respecto al T01-control (Cuadro 4). El pH del agua residual es de 11 (Cuadro 3), fuertemente alcalino y sobrepasa la NCh 1333 (5,5-9,0). T2 y T6 presentaron el menor valor de pH (7,6) y ambos tratamientos tienen en común la composición de polvos de doca (Cuadro 2), sin embargo, no es clara la tendencia respecto a la disminución del pH y mayor composición de polvos vegetales. Se ha establecido que el pH es un parámetro importante que influye en el desarrollo de procesos electroquímicos. Niazmand *et al.* (2019) en su investigación muestran que la eficiencia de remoción de iones es baja a pH menores que 2 y mayores que 8, teniendo un óptimo entre 4 y 6. Choque-Quispe *et al.* (2022), también mencionan la relevancia del pH en la remoción de metales, afectando la adsorción, debido a que los grupos quelantes funcionales presentes en nopal y doca ven afectada su carga química y con eso los sitios de unión con iones. En este estudio, el agua residual de aceituna de mesa tuvo un valor de pH de 11,00, lo que hubiese dificultado los procesos de adsorción de las especies de interés, al encontrarse los sitios de carga negativa ocupados por la elevada concentración de OH^- en la solución (Barbera *et al.*, 2023). Lisintuña *et al.* (2020), redujeron en un 63,5% el pH (teniendo como inicial un valor de 7,4) en agua proveniente de residuos de la industria láctea. Barka *et al.* (2013) también presentan una discusión sobre la influencia del pH en el comportamiento de mucílago de nopal, resaltándolo como el parámetro principal en el control de procesos de biosorción, indicando como explicación que a pH bajos hay grandes cantidades de protones presentes en la solución lo que compite con los sitios de intercambio de los cationes. Al aumentar el pH, el número de cargas positivas disminuye y aumentan las cargas negativas, habiendo menos afinidad por aniones.

El %Na fue significativamente menor en todos los tratamientos respecto a T01-control. T1 a T5 cumplen ajustadamente la norma NCh1333 respecto al límite de 35%. El Na está descrito como ion específico causante de toxicidad (junto con Boro y Cloruro), los que se acumulan en cultivos sensibles en concentraciones lo suficientemente altas como para causar daño en el cultivo y reducir rendimientos (Ayers y Wescot, 1985).

RAS fue significativamente menor para todos los tratamientos respecto a T01, excepto T6 (Cuadro 4) y el paso por las columnas de intercambio redujo el valor en un 98,4%. Esto es consecuente con la disminución de Na y al aumento en los valores de Ca y Mg (Cuadro 5). Sin embargo, no aplica calcular el riesgo de infiltración en el suelo con estas aguas, debido a que los valores de CE son extremadamente altos y no aplica este diagnóstico (Cuadro 1).

El valor de alcalinidad total disminuyó significativamente con los tratamientos respecto a T01-control, excepto en T5. La disminución de alcalinidad es deseable debido al pH fuertemente alcalino de T01 (Cuadro 4) y de T0 (Cuadro 3) de las aguas residuales, atribuible al contenido de NaOH y NaCl adicionados en las etapas de maduración de la aceituna de mesa.

La concentración de STD de las aguas es extremadamente alta, considerando que el agua del mar contiene 40.000 mg L⁻¹ (Boyd, 2015). Los tratamientos no presentaron diferencias significativas para STD con respecto a T01. Estos altos valores de STD son atribuibles a la materia orgánica disuelta en el agua, compuestos de tipo graso y otros sólidos debido a la elaboración de la aceituna. Estos sólidos relacionados a materia orgánica aumentan significativamente los STD. Los valores de STD incumplen la NCh1333 (1987) para agua de riego y la norma de calidad de agua para riego agrícola FAO (Ayers y Wescot, 1985).

Cuadro 4. Parámetros químicos de las aguas residuales de elaboración de aceitunas con los distintos tratamientos.

Tratamientos	pH	CE	Na	RAS	Alcalinidad total	STD	Turbidez
		uS cm ⁻¹	%	mmol _e L ⁻¹	mg L ⁻¹ CaCO ₃	mg L ⁻¹	NTU
T01	9,2±0,25a	42.172±1502a	38,9±3,4a	1,79±0,19a	1146±100a	14.005±599ab	105±27,5a
T1	8,3±0,28b	42.647±1901a	34,1±0,74b	1,53±0,03b	952±15,1b	12,806±772a	121±72,4a
T2	7,6±0,17c	38.987±8854a	33,9±0,53b	1,53±0,02b	993±18,9b	15,065±734b	163±3,60a
T3	7,9±0,09bc	39.520±8724a	34±0,31b	1,53±0,01b	846±6,61c	13,865±396ab	118±25,9a
T4	8,2±0,18b	43.202±2722a	34,8±0,5b	1,57±0,02b	975±5,15b	13,250±1761ab	55±20,5a
T5	8,0±0,29bc	42.597±411a	34,9±0,49b	1,57±0,01b	1046±45,7ab	15,330±776b	134±47,1a
T6	7,6±0,09c	43.160±1931a	35,7±0,46b	1,61±0,02ab	962±27,1b	13,982±1159ab	144±108,2a
NCh 1333	5,5-9,0	Máx. 7500 *	35	*	-	Máx. 5000	-

Los valores son promedio (n=4) ± desviación estándar. Letras distintas en sentido vertical entre los tratamientos indican diferencias significativas según test de Tuckey (p≤0,05).

En relación con los cationes en las aguas con los distintos tratamientos, se observa que los niveles de Ca y Mg aumentaron significativamente en T3 respecto a T01 (Cuadro 5). El T3 contiene la mezcla de ambos polvos vegetales. También se observa que T3 disminuyó significativamente la concentración de Na respecto al T01. Estos resultados son atribuibles a que la mezcla de especies vegetales efectivamente adsorbe Na y libera Ca y Mg en el agua, fenómeno relacionado al intercambio catiónico (CIC). Esta propiedad es de interés en la formulación de resinas y materiales adsorbentes en el agua (Mnif y Ben Rebah, 2023). En general, los niveles de cationes en las aguas en los estudios citados están modeladas y con concentraciones conocidas a pH ajustado para promover la adsorción iónica. Como referencia, las aguas de ríos en el mundo que pueden variar entre Ca: 3,9-31; Mg: 1,5-5,6; Na: 2,9-9,3 y K: 1,4-2,3 en mg L⁻¹ (Boyd, 2015). En agua de pozo del Invernadero de Química de Suelos y Aguas se han cuantificado valores para cationes de Ca: 140; Mg: 33,0; Na: 58,0 y K: 4,0 en mg L⁻¹.

Cuadro 5. Concentración de cationes (mg L^{-1}) en las aguas residuales de elaboración de aceitunas con los distintos tratamientos.

Tratamiento	Cationes			
	Ca^{2+}	Mg^{2+}	K^{+}	Na^{+}
		mg L^{-1}		
T01	21,0±7,8a	10,7±0,2a	31,5±0,8a	39,9±0,1a
T1	27,7±2,1ab	14,0±0,1b	31,7±1,1a	39,8±0,1ab
T2	28,3±1,2ab	13,4±0,1bc	32,5±0,3a	39,6±0,1bc
T3	28,6±0,7b	13,2±0,3cd	31,5±0,7a	28,4±0,1cd
T4	26,3±1,6ab	12,7±0,3de	32,4±0,4a	39,3±0,2d
T5	27,1±1,6ab	12,1±0,1e	32,4±0,6a	39,3±0,1d
T6	24,6±0,4ab	12,1±0,4e	32,6±0,7a	39,2±0,2d

Los valores son promedio ($n=4$) \pm desviación estándar. Letras distintas en sentido vertical entre los tratamientos indican diferencias significativas según test de Tuckey ($p \leq 0,05$)

Respecto a los aniones, la concentración de B , Cl^{-} y SO_4^{2-} en las aguas son muy elevadas e incumplen la NCh1333 para riego (Cuadro 6). Las especies HCO_3^{-} y CO_3^{2-} son especies químicas que no constituyen problema en las aguas y cumplen la importante función de regular el pH. Los tratamientos no disminuyeron la concentración de especies aniónicas de las aguas respecto a T01-control. Esto indica que los polvos de nopal y doca no adsorbieron Cl^{-} ni SO_4^{2-} , y no proveen de sitios de intercambio aniónico o sitios de atracción electrostática. Para el tratamiento de aniones mediante adsorción y/o intercambio se requieren sitios de intercambio en los materiales que adsorban especies con carga negativa. Basualto (2019) trabajó con resinas que incluyen polímeros (C10H10) $_n$ de carácter ácido para atraer los aniones como SO_4^{2-} . A la alta concentración de las especies Cl^{-} y SO_4^{2-} (Cuadro 6) junto a la materia orgánica disuelta reflejada en STD (Cuadro 4) se atribuye la fuerte salinidad de las aguas (Cuadro 4). Por la alta salinidad estas aguas no se pueden utilizar para riego agrícola. Como referencia, la concentración de Cl^{-} y SO_4^{2-} en aguas de ríos puede estar entre 4,9-12 y 2,6-24 mg L^{-1} respectivamente (Boyd, 2015). En agua de pozo del Invernadero de Química de Suelos y Aguas se han cuantificado valores para B , Cl^{-} y SO_4^{2-} de 0,15, 121 y 307 mg L^{-1} respectivamente.

Con respecto a la influencia del aumento de dosis de polvo vegetal, Barka *et al.* (2023) alcanzaron una relación directa entre aumento de dosis de mucílago de nopal y aumento de la adsorción de metales pesados, usando hasta 10g L^{-1} de polvo de nopal, explicado por el aumento de sitios de intercambio disponibles para la adsorción.

La normativa de aguas vigente en Chile (NCh1333) y la mundial según FAO (Ayers y Wescot, 1985) es de la década de los 80. La presión actual sobre los sistemas hídricos, tanto urbanos como agrícolas, no tiene relación con los límites y volúmenes de uso de aguas de hace casi 40 años. Esto hace necesario actualizar la gobernanza de agua en Chile. Actualmente (2024), hay una publicación de la FAO sobre gobernanza de agua que indica que es necesario la actualización de los usuarios y condiciones de las aguas.

Sin tratamiento, el agua residual de aceituna resultaría dañina para especies animales y vegetales, pero puede abrirse la opción a darle usos que no resulten un peligro, actualizando normas de calidad de agua y, sobre todo, ¿actuar con eficacia en temas de falta? de agua, en

donde el panorama es desalentador debido a la sequía. Por lo mismo, es necesario que las políticas públicas y los usuarios acuerden soluciones efectivas para el tratamiento y reutilización de las aguas industriales.

Cabe señalar finalmente, que no se encontraron valores referenciales de boro en aceitunas de mesa como alimento. Sin embargo, este elemento es muy alto en las aguas residuales tratadas (Cuadro 6) y está muy por fuera de la NCh1333 (1987) para riego, en todos los tratamientos.

Cuadro 6. Concentración de aniones (mg L^{-1}) en las aguas residuales de elaboración de aceitunas con los distintos tratamientos.

Tratamiento	Aniones				
	B	Cl^-	CO_3^{2-}	HCO_3^-	SO_4^{2-}
			mg L^{-1}		
T01	28,6±0,32a	3576±82,3a	2,13±0,30a	20,8±2,2a	5284±397,2a
T1	30,1±3,37a	3686±121a	0,57±1,20b	18,4±1,3ab	5199±754,5a
T2	28,9±1,02a	3888±54,8b	nd	19,8±0,4b	5720±412,2b
T3	31,2±0,78a	3653±97,2a	nd	16,9±0,1a	4842±358,8a
T4	30,2±0,71a	3693±89,0a	nd	19,5±0,1b	5415±726,8a
T5	29,6±2,26a	3713±33,9ab	0,10±0,20b	20,8±0,8b	5167±418ab
T6	30,1±1,08a	3711±81,6ab	nd	19,2±0,5ab	5523±396,5ab
NCh 1333	0,75	200	-	-	250

Los valores son promedio ($n=4$) \pm desviación estándar. Letras distintas en sentido vertical entre los tratamientos indican diferencias significativas según test de Tuckey ($p \leq 0,05$), nd no detectado.

CONCLUSIONES

Las aguas residuales del proceso de elaboración de aceitunas de mesa son químicamente complejas, y no cumplen parámetros de calidad para riego agrícola. Estas aguas presentan pH fuertemente alcalino, altísimos niveles de conductividad eléctrica y sólidos totales disueltos, comparables a los niveles del agua del mar.

El pretratamiento de aguas residuales de aceituna mediante columnas de suelo resultó altamente efectivo para disminuir considerablemente la concentración de sodio (Na) y potasio (K). La concentración inicial fue de 3883 mg L⁻¹ de Na y de 777 mg L⁻¹ de K, disminuyendo a 39,9 y 31,5 mg L⁻¹ respectivamente. Además, el agua con el pretratamiento en columnas de suelo disminuyó notablemente la turbidez, de 297 NTU a 106 NTU.

La mezcla de polvos de nopal y doca en dosis de 4 g L⁻¹ fue la más efectiva en disminuir significativamente la concentración de Na en las aguas residuales de aceituna. Además, esta mezcla disminuyó significativamente el Na porcentual, parámetro calculado respecto a los elementos Ca y Mg. Estos resultados son atribuibles a los sitios de intercambio catiónico que proveen los polvos vegetales.

La concentración de boro, cloruros y sulfatos en las aguas residuales no disminuyó con el tratamiento de polvos de nopal y doca, indicando que los polvos vegetales de estas especies no proveen sitios de intercambio aniónico y que el pH influye en el tipo de iones que el material puede adsorber.

El agua residual de la elaboración de aceitunas con los tratamientos de polvos de nopal y doca cumple la normativa chilena para riego para calidad de agua para los parámetros de pH, %Na y RAS, no así para Cl⁻ y SO₄²⁻, SDT ni CE, la que se evalúa en relación con los STD y RAS por lo que se requiere evaluación en conjunto.

La búsqueda de plantas con características floculantes resulta compleja y es importante que plantas con condiciones de adaptabilidad, abundancia en la naturaleza y fácilmente recuperables sean estudiadas como alternativa a tratamientos químicos de clarificación de aguas, creando nuevas y mejores alternativas de biosorbentes verdes.

El tratamiento con polvos vegetales debe ser integrado con otros procesos, como ultra o nano filtración, para alcanzar una mayor clarificación y que quede apta para algunos de los usos descritos en la NCh1333 para agua de riego.

Según la literatura citada, resulta muy importante realizar ajuste de pH para alcanzar una mejor adsorción de iones, observando que las investigaciones con resultados positivos en elementos de interés se hicieron con soluciones a pH ajustado.

LITERATURA CITADA

- Aguilera, P. 2012. Determinación del contenido de compuestos funcionales en polvos de nopal (*Opuntia ficus-indica* Mill.), proveniente de cladodios de distinto peso. Tesis para obtener el grado de Ingeniera Agrónoma. Universidad de Chile. 27p.
- Allen, R., Pereira, L., Raes, D. y Smith, M. 2006. Estudio 56 riego y drenaje. Food and Agriculture Organization (FAO) of the United Nations. Roma. Italia. 299p.
- Ayers, R. y Wescot, D. 1985. Water quality for agriculture. Food and Agriculture Organization (FAO) of the United Nations. Irrigation and drainage paper 29. Rev. 1. Roma, Italia.
- Aziz, K., Haydari, I., Kaya, S., Mnadi, L., Ouazzani, N., Aziz, F. 2023. Phenolic compounds removal in table olive processing wastewater by column adsorption: conditions' optimization. Environ Sci Pollut Res, 31, 38835-38845. <http://doi.org/10.1007/511356-023-26180-5>
- Barbera, M., Indelicato, S., Bongiorno, D., Censi, V., Saiano, F. and Piazzese, D. 2023. Untreated *Opuntia ficus-indica* for the Efficient Adsorption of Ni(II), Pb(II), Cu(II) and Cd(II) Ions from Water. Molecules, 28, 3953. <https://doi.org/10.3390/molecules28093953>
- Barka, N., Abdennouri, M., El Makhfouk, M., Qourzal, S. 2013. Biosorption characteristics of cadmium and lead on eco-friendly dried cactus (*Opuntia ficus indica*) cladodes. Journal on Environmental Chemical Engineering. 1, 144-149. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jece.2013.04.008>
- Basualto, F. 2019 Extracción de sulfato mediante resinas de intercambio iónico para su aplicación al tratamiento de aguas de relaves. Informe de Memoria de Título Para optar al Título de Ingeniero Civil Metalúrgico. Universidad de Concepción
- Boyd, C. (2015). Water Quality. Springer. p. 357.
- Beyá-Marshall, V., Apablaza, E., Días, A. y Sáenz, C. 2022. Physical and chemical characteristics of cladodes powder (*Opuntia ficus-indica* Mill.) of different maturation stages and drying temperatures. Acta Horticulturae 1434(65): 519-524.
- CICES (Clasificación Internacional Común de Servicios Ecosistémicos), 2012. En: Haines Young, R., Potschin, M. (Eds.), Centro de Gestión Ambiental. Universidad de Nottingham, Reino Unido. Informe para la Agencia Europea de Medio Ambiente. Disponible en: https://cices.eu/content/uploads/sites/8/2012/07/CICES-V43_Revised-Final_Report_29012013.pdf (Consultado en abril de 2023).
- CIREN. 1996. Descripciones de suelos, materiales y símbolos. Estudio agrológico Región Metropolitana. Publicación CIREN N° 115. 431p.

Chiban, M., Soudani, A., Sinan, F. y Persin, M. 2011. Single, binary and multi-component adsorption of some anions and heavy metals on environmentally friendly *Carpobrotus edulis* plant. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces* 82: 267-276.

Choque-Quispe *et al.* 2022. Heavy metal removal by biopolymers-based formulations with native potato starch/nopal mucilage. *Revista Facultad de Ingeniería, Universidad de Antioquía* 103: 44-50.

Donaire, M. 2023. Comunicación personal, 27 marzo 2023.

Drechsel, P. Marjani Zadeh, S. y Pedrero, P. (eds.). 2023. Water quality in agriculture, Risks and risk mitigation. Food and Agriculture Organization (FAO) of the United Nations and IWNI. Roma. Italia.

Janzen, N., Banzhaf, N., Scheytt, T., Bester, K. Vertical flow soil filter for the elimination of micro pollutants from storm and waste water. *Chemosphere* 77 (2009) 1358–1365.

FAO. 2027. Water auditing/water governance analysis-Governance and policy support: Methodological framework. Rome. 56P. <http://doi.org/10.4060/cc8993en>

Garreaud, RD, Alvarez-Garretón, C., Barichivich, J., Boisier, JP, Christie, D., Galleguillos, M., LeQuesne, C., McPhee, J., Zambrano-Bigiarini, M., 2017. La mega sequía de 2010-2015 en Chile central: impactos en el hidroclima y la vegetación regionales. *Hidrol. Sistema Tierra ciencia* 21, 6307–6327.

Guida, S., Rubertelli, G., Jefferson, B., Soares, A. 2021. Demonstration of ion exchange technology for phosphorus removal and recovery from municipal wastewater. *Chemical Engineering Journal*, 420, (1), 129913. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.129913>

Instituto Nacional de Normalización (INN) .1978. Requisitos de calidad del agua para diferentes usos (NCh1333). INN, Santiago, Chile. 15p.

Lisintuña, W., Cerda, E. y García, M. 2020. Tratamiento de aguas residuales de una industria láctea con mucílago de nopal (*Opuntia ficus-indica* (L.) Mill.). *Ciencia y Tecnología de los alimentos* 30 (2): 52-57.

Luengo, M. 2006. El Olivo. *Offarm* 25 (11). 56-59. Disponible en: <https://www.elsevier.es/es-revista-offarm-4-articulo-el-olivo-13096631> (Consultado en abril 2023).

Miller, S., Fugate, E., Oyanedel, V. y Smith, J. 2008. Toward understanding the efficacy and mechanism of *Opuntia* spp. As a natural coagulant for potential application in water treatment. *Environmental Science and Technology*. 42 (12): 4274-4279.

Mnif, W., Ben Rebah, F. 2023. Biofloculants as Alternative to Synthetic Polymers to Enhance Wastewater Sludge Dewaterability: A Review. *Energies*. 16, 3392. <https://doi.org/10.3390/en16083392>

Niazmond, R., Jahani, M., Kalantarian, S. 2019. Treatment of alive processing wastewater by electrocoagulation: An effectiveness and economic assessment. *Journal of Environmental Management* 248, 109262. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109262>.

Novoa, A., González, L., Moravcová, L. y Pysek, P. 2012. Effects of Soil Characteristics, Allelopathy and Frugivory on Establishment of the Invasive Plant *Carpobrotus edulis* and a Co-Occuring Native, *Malcolmia littorea*. *PLOS ONE* 7(12). Disponible en: <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0053166> (Consultado en diciembre 2022)

Pravin D., Avinash K., Shankar H. 2009. Removal of iron, arsenic and coliform bacteria from water by novel constructed soil filter system. *Ecological Engineering* 35,1152–1157.

Pressl, A., Pucher B., Scharf, B., Langergraber, G. 2019. Treatment of de-icing contaminated surface water runoff along an airport runway using in-situ soil enriched with structural filter materials *Science of the Total Environment* 660, 321–328

O'Connor, J. *et al.* 2021. Production, characterization, utilization and beneficial soil application of steel slug: a review. *Journal of Hazardous Materials*. 419. 126478. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.126478>

Oficina de Estudios y Políticas Agrarias (ODEPA). 2017. Catastro frutícola región metropolitana, principales resultados. Disponible en: <https://www.odepa.gob.cl/wp-content/uploads/2016/12/Metropolitana.pdf> (Consultado en abril 2023).

Oficina de Estudios y Políticas Agrarias (ODEPA). 2019. Información regional, región Metropolitana. Disponible en: <https://www.odepa.gob.cl/wp-content/uploads/2019/03/Metropolitana.pdf> (Consultado en abril de 2023).

Pal, S., Patel, N., Malik, A., Sharma, A., Pal, U., Rosin, K. G., & Singh, D. K. (2023). Eco-friendly treatment of wastewater and its impact on soil and vegetables using flood and micro-irrigation. *Agricultural Water Management*, 275. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2022.108025>

Rocha, Y., Rezende, V., Santos, M. 2021. Metallic ions recovery from membrane separation processes concentrate. A special look onto ion exchange resins. *Chemical Engineering Journal*. 425, 131812. <http://doi.org/10.1016/j.cej.2021.131812>

Sadzawka, A. (2006). Métodos de análisis de aguas para riego. Instituto de Investigaciones agropecuarias (INIA). Serie Actas Instituto de Investigaciones Agropecuarias (37). Santiago de Chile. 301p.

Smith-Ramírez, C. *et al.* 2023. Ecosystem services of Chilean sclerophyllous forests and shrublands on the verge of collapse: A review. *Journal of Arid Environments* (211). 12p.

Tapia, F. 2016. Producción de aceituna de mesa. Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA). Cap. 2. Santiago. Chile. Disponible en: <https://biblioteca.inia.cl/bitstream/handle/20.500.14001/6498/NR40472.pdf?sequence=6&isAllowed=y> (Consultado en diciembre 2022).

Valdevenito, N. 2006. Aceitunas de Mesa Chilenas. Normativas y Estándares de Calidad. FIA-PR-V-2002-1-A-034. Chile. 141p. Disponible en: https://bibliotecadigital.fia.cl/bitstream/handle/20.500.11944/145446/FIA-PR-V-2002-1-A-034_aceitunas_de_mesa_chilena_normativas_y%20estandares.pdf;jsessionid=1E4FB039091AD26C9D4B625CC6C45824?sequence=1 (Consultado en diciembre 2022).

Villabona, A., Paz, I. y Martínez, J. 2013. Caracterización de la *Opuntia ficus-indica* para su uso como coagulante natural. Revista colombiana de Biotecnología 15(1): 137-144.