

## **INNOVACIÓN EN PROCESOS Y DESARROLLO TECNOLÓGICO PARA EL APROVECHAMIENTO DE EFLUENTES DE LA INDUSTRIA DEL OLIVO COMO FUENTE DE AGUA APTA PARA RIEGO**

**Santiago Aquino**, Departamento de Química Industrial y Aplicada, Facultad de Ciencias Exactas Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba, santi.aquino.sa@gmail.com

**Victoria Chá**, Departamento de Química Industrial y Aplicada, Facultad de Ciencias Exactas Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba, victoriacha93@gmail.com

**Pablo Daniel Ribotta**, Departamento de Química Industrial y Aplicada, Facultad de Ciencias Exactas Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba, ICYTAC (Instituto de Ciencia y Tecnología de Alimentos Córdoba), UNC-CONICET, pribotta@agro.unc.edu.ar

**Patricia Gómez**, Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Catamarca, analiticaunca@gmail.com

**María Andrea Marín**, Departamento de Química Industrial y Aplicada, Facultad de Ciencias Exactas Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba, ma.andrea.marin@gmail.com

**Hernán Severini**, Departamento de Química Industrial y Aplicada, Facultad de Ciencias Exactas Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba, hernanseverini@gmail.com

**Resumen**— Con el propósito de contribuir al desarrollo de procesos sustentables en la industria argentina se diseñó un sistema de tratamiento para la utilización del agua de vegetación del proceso productivo de extracción de aceite de oliva como agua para riego. Se caracterizó física y químicamente el agua de vegetación (pH=6,18, oxígeno consumido (OC) de 1.900 mg/L, contenido de aceites y grasas de 27.051 mg/L). Se evaluaron a escala laboratorio y piloto un conjunto de posibles tratamientos. La determinación del más adecuado se realizó considerando los resultados obtenidos para los parámetros exigidos por la legislación y las condiciones óptimas de diseño. El tratamiento propuesto incluye las siguientes etapas: decantación por gravedad, floculación con  $\text{FeCl}_3$  y  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , sedimentación, absorción de aceites y grasas, neutralización y dilución del líquido obtenido. Se obtuvieron porcentajes de reducción del 99,82% para el caso de grasas y aceites y 91,7% para el oxígeno consumido. Además, se realizó una estimación del beneficio que podría obtenerse con la producción de jabones vegetales artesanales, resultando probable que se compense el total de los costos en dos campañas, momento a partir del cual la producción de jabones estaría destinada aproximadamente un 50% a solventar el total de los costos operativos de la planta de tratamiento, el resto sería beneficio.

**Palabras clave**— *aceite de oliva, agua de vegetación, efluente.*

### **1. Introducción**

Los Proyectos de Desarrollo Tecnológico y Social (PDTS) son proyectos de investigación orientados al desarrollo de tecnologías asociadas a una oportunidad estratégica o a una necesidad de mercado o de la sociedad y dirigidos a la generación de productos, procesos, prospectivas o propuestas. Cuentan con una o más organizaciones públicas o privadas demandantes y con posibles adoptantes del resultado desarrollado.

Este trabajo se originó a partir de un PDTS entre la Universidad Nacional de Córdoba, la Universidad Nacional de Catamarca (UNCa) y la Cooperativa 12 Olivos, de San Fernando del Valle de Catamarca, fundada por 13 productores de aceitunas de la región junto a la UNCa, como alternativa de agregado de valor mediante la producción de aceite de oliva. La planta

productora fue construida en 2009 y se encuentra radicada en el parque industrial El Pantanillo en la ciudad de San Fernando del Valle de Catamarca. La producción de aceite de oliva se realiza en un proceso de 2 fases, que genera dos corrientes de residuos, una de residuos ‘sólidos’ llamada orujo, y la otra un efluente líquido llamado alpechín o ‘agua de vegetación’ obtenida a la salida de la centrífuga vertical. Actualmente ambas corrientes se juntan para ser desechadas sin ningún tratamiento previo, ni aprovechamiento de sus características útiles.

El objetivo general del PDTS fue desarrollar procesos de recuperación del agua de vegetación, que contribuyan a reducir el consumo de agua, a disminuir la masa de alperujo y a obtener un residuo sólido más seco que simplifique su manejo. Para lograr este objetivo se reunió un equipo interdisciplinario, compuesto por profesionales y estudiantes de ambas unidades académicas y se plantearon 4 objetivos específicos.

1. Desarrollar procesos de recuperación del agua de vegetación provenientes de los efluentes de la industria del aceite de oliva que permitan su reúso en el proceso o su empleo con fines agrícolas.
2. Evaluar el efecto del empleo del agua de vegetación como agua de riego de cultivos con resistencia a la salinidad media a moderada.
3. Evaluar el efecto fitosanitario del agua de vegetación recuperada del proceso de industrialización de la aceituna para aceite.
4. Evaluar el empleo del agua de vegetación para la extracción de compuestos bioactivos de los residuos agroindustriales del olivo.

Como parte del objetivo número uno, se buscó diseñar un sistema de tratamiento del agua de vegetación para obtener agua apta para riego que cumpla con la Resolución 65/05 para el control de vertido de líquidos residuales de la provincia de Catamarca

## **2. Materiales y Métodos**

### **2.1. Caracterización del agua de vegetación**

Se recolectó parte de la corriente de salida del equipo en un tambor de 200 L y de él una muestra de 12 L, que se trató con azida sódica para su conservación. La muestra se transportó refrigerada hasta la ciudad de Córdoba y allí se congeló hasta su utilización.

Se seleccionaron los parámetros de la norma que tienen relevancia en relación a la procedencia del efluente, y/o son necesarios para diseñar el sistema de tratamiento. Las determinaciones: grasa y aceites, sólidos totales, en suspensión, fijos y volátiles y sedimentables, se llevaron a cabo según Standard Methods for the examination of water and wastewater (American Public Health Association, American Water Works Association, Water Pollution Control Federation, 1992).

La determinación de pH se realizó con cintas de pH y la determinación de oxígeno consumido, se realizó mediante la técnica propuesta por D.I.P.A.S Córdoba.

### **2.2. Evaluación y selección de métodos de tratamiento**

Se realizaron un conjunto de ensayos para seleccionar variables sobre las cuales trabajar, acotar el rango de valores de las variables seleccionadas y aumentar la escala.

#### **2.2.2 Tratamientos físico-químicos**

Se compararon de manera cualitativa los tratamientos: floculación, saponificación de grasas y aceites, oxidación, reacción de fenton y pseudo-fenton. Los mismos se pensaron y realizaron

según lo descrito en “Olive processing waste management: literature review and patent survey” (M. Niaounakis, C. P. Halvadakis, 2006).

### **2.2.3 Combinación óptima de reactivos**

Para lograr la eliminación de materia orgánica y oxidación de polifenoles se trató químicamente el agua de vegetación con distintas cantidades de  $\text{FeCl}_3$  en medio básico ( $\text{Ca(OH)}_2$ ), a diferentes tiempos y velocidades de agitación, que resultaron de un ensayo similar Jar Test, diseñado con el programa StatGraphic, a partir del cual se obtuvo una superficie de respuesta. Los rangos para las variables de operación se determinaron a partir de ensayos preliminares, tal como se muestran en la tabla 1 a continuación,

Tabla 1. Resumen de combinación de variables operativas y variable de respuesta

Factores	Bajo	Alto	Unidades	Respuestas	Unidades
$\text{FeCl}_3$	0,4	0,6	% v/v	OC	mg/L
$\text{Ca(OH)}_2$	0,4	0,9	g base/mL $\text{FeCl}_3$		
Tiempo <sup>1</sup>	30,0	60,0	Min		
Velocidad <sup>1</sup>	40,0	80,0	Rpm		

Fuente: extraído de StatGraphic, según diseño propio.

Se llevaron a cabo las 28 corridas según las combinaciones indicadas por el programa, y se midió el oxígeno consumido a cada una y a un blanco por duplicado.

### **2.2.4 Tratamiento de separación de aceite emulsionado**

Para determinar si el agua debía pasar por un filtro absorbente de aceites, y si debía hacerlo antes o después de tratarla con los reactivos y sedimentar, se realizó:

1. Se decantaron 500 mL de agua de vegetación para separar el aceite no emulsionado.
2. Se separaron 250 mL y se filtraron a través de un filtro armado con 5,7 g de fibras del material orgánico absorbente de aceites contenido con tela “cancan”. El filtro tiene un espesor de 4,5 cm.
3. Se trataron estos 250 mL de agua filtrada, y los otros 250 mL de agua no filtrada con la combinación determinada como óptima de reactivos, tiempo y velocidad de agitación.
4. Se dejaron sedimentar en dos probetas.
5. Se filtraron los 250 mL de agua sedimentada que no fueron inicialmente filtrados, por un filtro con las mismas características que el del punto 2.
6. Se determinó oxígeno consumido, grasas y aceites (técnica 5520 B.), sólidos totales (2540 B.) y sólidos sedimentables gravimétricos en 10 minutos y 2 horas (técnica 2540 F.) según (American Public Health Association, American Water Works Association, Water Pollution Control Federation, 1992).

## **2.3 Tratamiento completo a escala laboratorio**

Se ensayó el líquido obtenido según descripto para obtener los resultados del tratamiento completo a escala laboratorio. Además, se encargó al laboratorio del Instituto Superior de Investigación, Desarrollo y Servicios en Alimentos (ISIDSA), determinaciones de cationes.

<sup>1</sup> Los valores de velocidad y tiempo de agitación lenta que se ensayan se determinan a partir de datos de ensayos publicados en los que se trabaja a 40 rpm agitando hasta periodos de 45 minutos (M. Niaounakis, C. P. Halvadakis, 2006).

## **2.4. Dimensionamiento de equipos**

### **2.4.1 Decantación por gravedad**

La operación para separar el aceite no emulsionado consistió en una decantación simple por gravedad, etapa condicionada sólo por el caudal a tratar y la óptima separación del aceite. Uno de los objetivos del diseño fue que se ajustara a los recursos económicos de la cooperativa por lo que se buscaron soluciones prácticas y poco costosas.

### **2.4.2 Sedimentación**

Para la separación del flóculo formado por el tratamiento con cloruro férrico e hidróxido de calcio se seleccionó una operación de sedimentación. Se llevó a cabo un ensayo en una probeta de 100 mL (L. Metcalf, H. P. Eddy, 1977), y se aplicó el método de Talmadge y Fitch para el diseño de sedimentadores.

Se tomó como concentración deseada, una concentración 5 veces más diluida que la conseguida en la torta de filtración, y 2,5 veces más concentrada que al inicio de la sedimentación. Con el área limitante y el volumen a tratar se calculó el radio y la altura del sedimentador.

### **2.4.3 Agitación: selección del agitador, dimensionamiento y cálculo de potencia**

Para seleccionar el tipo agitador se tuvieron en cuenta el patrón de flujo necesario (radial, tangencial o axial), la velocidad de agitación necesaria y la viscosidad del fluido a agitar. Su dimensionamiento y el cálculo de la potencia requerida se realizó de acuerdo a McCabe et. al. (2007). Para el cálculo de la potencia se realizó la suposición de que el fluido a agitar es newtoniano y se consideró que el tanque contiene deflectores

### **2.4.4 Filtración**

Se llevaron a cabo ensayos de filtración a caída de presión constante, para determinar la resistencia del lecho filtrante ( $R_m$ ) y la compresibilidad de la torta ( $\alpha$ ).

Se realizaron 3 ensayos a distintos valores de  $\Delta p$  (10, 15 y 20 cm):

1. Se colocó fiselina como medio filtrante en un buchner modificado de 30 cm de columna de vidrio.
2. Se llenó el buchner con los lodos provenientes de operación de sedimentación hasta la altura que corresponda.
3. Se tomaron datos de tiempo y volumen filtrado manteniendo siempre la altura de columna de líquido asegurando un  $\Delta p$  constante.
4. Se graficaron los datos  $t/V$  vs.  $V$
5. Se calcularon los valores de  $\alpha$  y  $R_m$

A continuación con los valores de  $\alpha$  y  $\Delta p$  de los ensayos realizados, se calculó el coeficiente de compresibilidad de la torta ( $s$ ) según la ecuación empírica más frecuente a la que responde  $\alpha$  (Warren L. McCabe, Julian C. Smith, Peter Harriott, 2007):

$$\alpha = \alpha_0 \cdot (\Delta p)^s$$

### **2.4.5 Absorción de aceite**

Se llevaron a cabo 2 ensayos idénticos al descrito en el punto anterior, utilizando como medio filtrante las fibras de absorbente orgánico, con valores de caída de presión de 10 y 15 cm de columna de líquido. El cartucho filtrante se preparó con una densidad aparente de  $0,26 \text{ g/cm}^3$  y un espesor de 3 cm. En esta oportunidad, el ensayo devolvió datos de resistencia de medio filtrante.

Se obtuvo una función que describe el comportamiento de la resistencia del medio filtrante en función de la caída de presión. Teniendo en cuenta que las fibras orgánicas se comprimen con el paso del agua, el espesor del filtro puede ser una variable importante al momento del diseño de la bomba que impulsa el fluido a través del filtro.

Para diseñar el filtro de fibras absorbentes se consideró:

- Densidad aparente del material absorbente dentro del cartucho de contención.
- Granulometría de las fibras orgánicas.
- Capacidad absorbente del material brindada por el proveedor: 1 kg fibras absorben 8 L de aceite.
- Facilidad operacional.

#### **2.4.6 Neutralización**

El pH del agua tratada con la mejor combinación de reactivos es de 13, por lo que hay que neutralizar antes de utilizar el agua obtenida para riego (la norma exige entre 6 y 8,5 UpH). Se titularon 20 mL de muestra con HCl 1M con fenolftaleína como indicador. Los datos obtenidos se utilizaron para determinar la cantidad de ácido necesaria para neutralizar una unidad de volumen de efluente tratado.

#### **2.4.7 Transporte de fluidos**

La selección del diámetro de las tuberías a utilizar se realizó de acuerdo a los descrito por McCabe et. al. (2007), utilizando la siguiente ecuación:

$$V_{op} = \frac{12. m^{0.1}}{\rho^{0.36}}$$

Dónde  $V_{op}$  es la velocidad óptima de circulación del fluido por la tubería,  $m$  la velocidad masiva de flujo y  $\rho$  la densidad del fluido. Para el agua y fluidos similares  $V_{op}$  se encuentra entre 0.9 y 1.8 m/s (Warren L. McCabe, Julian C. Smith, Peter Harriott, 2007, pág. 209). Con el caudal de trabajo deseado se pueden obtener, mediante tablas,  $V_{op}$  y un diámetro de tubería recomendado (<https://www.reboca.com/pdf-informacion/manual-tecnico-es.pdf>, 2017). Este es el criterio que se aplicó para la selección de las tuberías sin dejar de considerar los costos de la tubería y los accesorios, así como la fricción con los mismos.

Para el cálculo de la potencia requerida por la bomba se utilizó la ecuación general de la energía (Mott, 1996, pág. 195).

Las etapas de bombeo en el sistema propuesto son 2:

1. Bombear el agua de vegetación desde el decantador por gravedad hacia el sedimentador/reactor.
2. Bombear el sobrenadante del sedimentador hacia el filtro de absorción de aceite y contenedor de dilución/almacenamiento.

Para disminuir los costos asociados a esta operación se decidió utilizar una única bomba que, mediante un sistema de válvulas pueda realizar todo el transporte de fluidos. Se calcularon separadamente las bombas necesarias para las dos operaciones de bombeo del sistema y se seleccionó aquella de mayor potencia requerida.

#### **2.4.7.1 Bombeo desde el decantador de aceite al sedimentador/reactor.**

La potencia de la bomba necesaria para esta operación se calculó aplicando la ecuación general de la energía a los puntos del fluido comprendidos entre la parte inferior del decantador de grasas y aceites (para considerar la peor condición, es decir, cuando está casi vacío, esto es, sin la presión ejercida por el fluido por encima de él) y la descarga de la tubería en la parte superior del sedimentador/agitador, realizando las siguientes consideraciones:

- La parte inferior del decantador se encuentra a 20 cm del nivel de piso.
- La descarga de la tubería en el sedimentador/agitador se ubica a 1,7 m del nivel del piso.
- La presión en la superficie libre del líquido en todos los puntos es la presión atmosférica.
- El fluido en el punto "1" se encuentra en un recipiente de sección muy grande comparada con la cañería, por lo que puede tomarse que su velocidad es cero.
- La velocidad en el punto "2" es 1 m/s.
- El fluido no entrega energía por lo que el término  $h_R$  es cero.
- La longitud de la tubería es de 8 metros y esta cuenta con 4 codos a 90°.
- Como accesorios el sistema cuenta con dos válvulas de tres vías, una de dos vías y un grifo.
- La densidad, viscosidad y peso específico del fluido a transportar no difieren de los del agua, se utilizan los valores para ésta en los cálculos en que sean necesarios.

#### **2.4.7.2 Bombeo a través de cartucho absorbente hacia contenedor de almacenamiento.**

El cálculo de la potencia necesaria para la bomba que debe impulsar el fluido desde el agitador/sedimentador hasta el tanque de dilución y almacenamiento, pasando por el filtro de fibras absorbentes, se realizó considerando lo siguiente:

- El punto "1" se ubica en la toma del sedimentador/agitador a 0,75 m del nivel del piso.
- El punto "2" corresponde a la descarga de la tubería en el tanque de dilución y almacenamiento y se ubica a 1,9 m del nivel del piso.
- La presión en la superficie libre del líquido en todos los puntos es la presión atmosférica.
- El fluido en el punto "1" se encuentra en un recipiente de sección muy grande comparada con la cañería, por lo que puede tomarse que su velocidad es cero.
- La velocidad en el punto "2" está dada por el caudal necesario para filtrar el máximo volumen de agua en 1,5 h, dividido el área de la sección transversal de la tubería.
- La longitud de la tubería es de 8 metros y esta cuenta con 4 codos a 90°.
- Como accesorios el sistema cuenta con una válvula de tres vías y una de dos vías.
- El fluido pierde energía al pasar por el filtro absorbente.
- La densidad, viscosidad y peso específico de los fluidos a transportar no difieren de los del agua por lo que se utilizan los valores para ésta en todos los cálculos.

Para calcular la potencia requerida para impulsar el fluido a través del cartucho absorbente se siguieron los siguientes pasos:

1. Se fijó un tiempo de residencia que asegure el contacto suficiente entre fibras y agua.
2. Se calcularon las dimensiones del cartucho, fijando el área filtrante y el volumen de fibra, y despejando el espesor.
3. Se calculó la resistencia del medio filtrante haciendo uso de la relación obtenida de  $R_m$  en función del espesor del filtro.
4. Se calculó la pérdida de carga en el filtro. Utilizando como datos el  $R_m$  obtenido, el área fijada, la viscosidad del fluido y el caudal necesario (relacionado con el tiempo de residencia fijado).

## 2.5. Estimación de costos

Para determinar los costos de instalación (inversión) se tuvo en cuenta el precio de mercado de cada uno de los equipos. Se consideró la energía consumida por el agitador y la bomba y los insumos para la operación del sistema de tratamiento para un período de 90 días (una campaña). Esto incluye reactivos. No se consideró el costo de mano de obra ya que se pensó el sistema considerando las horas/hombre disponibles actualmente, ni los costos de servicios distintos de la energía eléctrica consumida por los equipos, que permanecen constantes.

Los precios se obtuvieron de páginas web, vía telefónica o mail con empresas proveedoras. El costo en energía eléctrica se determinó considerando el precio de kW que paga la planta y la potencia consumida por la bomba y el agitador.

## 3. Resultados y Discusión

### 3.1. Caracterización del agua de vegetación

Los ensayos de sólidos arrojaron los resultados que se presentan en la Tabla 22 a continuación:

Tabla 2. Resultados de ensayos de determinación de sólidos.

Determinación	Sólidos (g/100 mL)
Sólidos fijos y volátiles a 105 °C (totales)	0,1680
Sólidos fijos a 500°C	0,0130
Sólidos volátiles a 500°C	0,1550
Sólidos totales en suspensión a 105°C	0,0012
Sólidos solubles	0,1713

Fuente: elaboración propia.

Se puede observar, que, del total de sólidos, solo el 7,7% son sólidos fijos, por lo que la mayoría de los sólidos es materia orgánica, pulpa de aceituna, restos de carozo, entre otros.

Los resultados de los demás ensayos que permitieron caracterizar el agua de vegetación se presentan en la Tabla 3, comparados con los valores que exige la normativa.

Tabla 3. Resultados de determinaciones ensayadas vs. valores exigidos por ley.

Determinación	Resultado	Valor de norma	Unidad
pH	6,2	6,0 - 8,5	UpH
Aceites y grasas totales	27051	<1	mg/L
Aceites y grasas emulsionados	2113		mg/L
Oxígeno consumido	1900	<80	mg/L
Sólidos totales a 105 °C	0,1770		g/100 mL
Sólidos fijos y volátiles a 105 °C	0,1680		g/100 mL
Sólidos fijos a 500°C	0,0130		g/100 mL
Sólidos volátiles a 500°C	0,1550		g/100 mL
Sólidos totales en suspensión a 105°C	0,0012		g/100 mL
Sólidos solubles	0,1713		g/100 mL
Sólidos sedimentables en 10 minutos	1 mm		
Sólidos sedimentables en 2 h	2 mm		

Fuente: elaboración propia.

Se puede ver que un 7,8% de las grasas y aceites se encuentran en emulsión, por lo que se dedujo que sería necesaria una etapa de tratamiento adicional a una decantación por gravedad.

### 3.2. Evaluación y selección de métodos de tratamiento

#### 3.2.1 Tratamientos físico-químicos

De los tratamientos propuestos, el único que devuelve resultados satisfactorios de forma cualitativa (transparencia de sobrenadante) es la floculación con cloruro férrico e hidróxido de calcio.

#### 3.2.2 Combinación óptima de reactivos

Los resultados de OC y la combinación óptima resultante del tratamiento estadístico de los mismos se presentan en la tabla 4 a continuación:

Tabla 4. OC medidos en los distintos tratamientos

N.º corrida	FeCl <sub>3</sub> (% v/v de solución 40%)	Ca(OH) <sub>2</sub> (g base/ mL FeCl <sub>3</sub> )	tiempo (min)	velocidad (rpm)	pH	OC (mg/L)
1	0,5	0,65	60	40	8-9	625
2	0,6	0,65	45	40	9-10	595
3	0,5	0,65	30	40	9-10	675
4	0,5	0,90	45	40	10-11	565
5	0,4	0,65	45	40	7-8	675
6	0,5	0,40	45	40	7-8	745
7	0,5	0,65	45	60	6-7	685
8	0,4	0,65	30	60	6-7	705
9	0,4	0,40	45	60	4-5	695
10	0,6	0,40	45	60	4-5	645
11	0,5	0,90	30	60	11-12	555
12	0,5	0,40	60	60	5-6	655
13	0,6	0,65	30	60	10	595
14	0,5	0,90	60	60	12-13	555
15	0,5	0,65	45	60	10	655
16	0,4	0,65	60	60	10	675
17	0,4	0,90	45	60	12-13	565
18	0,6	0,65	60	60	6-7	665
19	0,5	0,40	30	60	4-5	810
20	0,5	0,65	45	60	10	635
21	0,6	0,90	45	60	13-14	515
22	0,5	0,65	45	60	6-7	705
23	0,4	0,65	45	80	10-11	495
24	0,6	0,65	45	80	7-8	565
25	0,5	0,65	30	80	7-8	625
26	0,5	0,40	45	80	5-6	625
27	0,5	0,90	45	80	9-10	615
28	0,5	0,65	60	80	7-8	695

Fuente: elaboración propia

#### 3.2.3 Tratamiento de separación de aceite emulsionado

Las dos variaciones del tratamiento llevadas a cabo a escala laboratorio y los resultados obtenidos se muestran la tabla 5 a continuación.



Tabla 51. Resultados de los ensayos realizados al agua tratada luego de tratamiento completo.

Determinación	Filtrada antes del tratamiento químico	Filtrada luego de operación de sedimentación
OC [mg/L]	231,6	158,3
Grasas y aceites [mg/L]	266,14	49,60
Sólidos totales [mg/L]	8155	6610
Sólidos sedimentables en 10 min [mg/L]	130	110
Sólidos sedimentables en 2 horas [mg/L]	205	140

Fuente: elaboración propia

Si bien los resultados informados en la tabla 5 no cumplen con la legislación, ambos tratamientos disminuyen los niveles de OC y grasas y aceites. Se consiguieron mejores resultados cuando se sedimenta primero, probablemente porque en la operación de sedimentación haya sólidos que queden suspendidos, y durante la filtración son removidos. A partir de estos resultados se definió que la operación de absorción de aceite y simultánea filtración de sólidos en suspensión se debía realizar luego de la operación de sedimentación.

### 3.3 Tratamiento completo a escala laboratorio

Se diluyó el agua al 50% y se obtuvieron los valores que se muestran en la tabla 6:

Tabla 62. Resultados de los ensayos realizados al agua al 50% luego de tratamiento completo.

Determinación	Filtrada antes del tratamiento químico	Valor de Norma
OC [mg/L]	79,15	<80
Grasas y aceites [mg/L]	24,8	<1
Sólidos sedimentables en 10 min [mg/L]	55	<0,5
Sólidos sedimentables en 2 horas [mg/L]	70	<1
Determinaciones tercerizadas [mg/L]		
Hierro	1,7580	<2
Cromo	14,410	<0,2
Aluminio	0,2720	<5
Vanadio	0,0230	-----
Boro	0,3960	<2
Cobalto	0,0007	<2
Arsénico	<0,000028	<0,1
Selenio	0,00189	<0,1
Molibdeno	0,00190	-----
Plata	0,00084	-----
Cadmio	0,00179	<0,1
Estaño	0,00075	-----
Bario	0,04550	<2
Mercurio	0,00032	<0,01
Plomo	0,01880	<0,1

Fuente: elaboración propia

En la figura 1 puede verse el agua cruda y el fluido resultante del tratamiento completo.

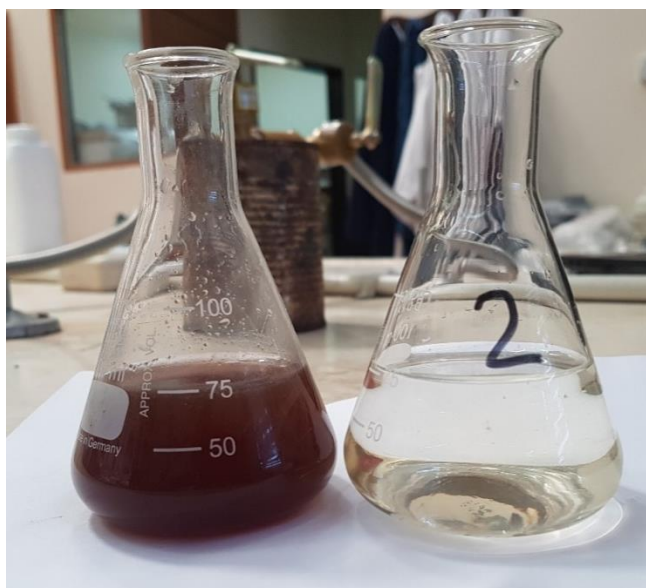


Figura 1. A la izquierda agua cruda y a la derecha agua sometida al tratamiento propuesto.

Como se puede observar, todas las determinaciones de cationes realizadas (con excepción del cromo) arrojan valores por debajo de los límites exigidos por la normativa, incluso el hierro, catión utilizado para flocular. No se identifican fuentes lógicas para una concentración tan elevada de cromo, ni durante el proceso productivo de la planta, ni durante el tratamiento propuesto. Este valor pudo deberse a contaminación del recipiente de muestreo o del equipo utilizado por el laboratorio externo (ICP masa).

### **3.4 Dimensionamiento de equipos**

Los caudales por hora y por jornada diaria considerando que se trabaja 8 horas con la planta funcionando en continuo, y un tiempo de arranque de dos horas, se muestran en la Tabla 7. Se toman 8 horas porque las jornadas que hay grandes cantidades de fruto por procesar, se llega a trabajar 10 horas, y se busca que el dimensionamiento soporte volúmenes de efluentes para el máximo nivel productivo.

Tabla 7. Caudales calculados a partir de datos registrados en planta 12 Olivos.

Corriente	kg/h	kg/día
aceitunas procesadas	590	4720
agua de vegetación	93	750
Aceite	55,4	443,2

Fuente: elaboración propia

El caudal relevante para este proyecto es el caudal de agua de vegetación. A la hora del dimensionamiento del sistema, se tuvo en cuenta que estuviera preparado para tratar el máximo caudal diario de efluente.

En la tabla 8, a continuación, se muestran los resultados del dimensionamiento y la comparación con los equipos disponibles en el mercado.

*Innovación en procesos y desarrollo tecnológico para el aprovechamiento de efluentes de la industria del olivo como fuente de agua apta para riego*

Tabla 8. Dimensionamiento y comparación con los equipos disponibles en el mercado

Equipo	Diseño		Mercado
Decantador de aceite	Tanque de 750 L de capacidad		Capacho de 1.000 L de polietileno, abierto en la parte superior que se llena mediante una manguera. Grifo inferior conectado a válvula de 3 vías.
Tanque agitado	Sedimentación	Agitación	Capacidad: 1.000 L
			Diámetro: 1,06 m
			Altura: 1,69 m
			Material: polietileno de alta densidad
			Conexiones incluidas
	Diámetro: 1,34 m	Diámetro: 1,34 m	Estructura metálica
	Altura: 0,51 m	Altura: 1,34 m	
Resistencia química.	Resistencia química.		
Agitador	Turbina de seis palas inclinadas a 45°		Turbina de 3 palas inclinadas
	Impulsor conectado a variador de velocidad		Potencia: 0,25 HP
	Potencia: 1 HP		
Filtro de fibras absorbentes	Filtro de 4 L de capacidad		Carcasa de polipropileno, desmontable, con forma cilíndrica.
	Densidad aparente: 0.26 g/cm <sup>3</sup>		Capacidad: 4 litros
	Granulometría: 100 µm		Saco de tela tipo “cancan” relleno con 1 kg de fibras orgánicas
	Colmatación: 5 o 6 días (1 Kg de absorbente/8 L de aceite)		Radio: 5 cm
	Resistencia química.		Largo: 50 cm
Tanque de dilución	Más de 1500 L de capacidad.		Tanque vertical de polietileno de alta densidad con protección UV con capacidad para 8.000 L.
	Resistencia química.		
Bomba y conexiones	Potencia: 0,23 HP		Bomba monofásica
	Caudal: 3,06 m <sup>3</sup> /h		Potencia 0,75 HP
	Altura máxima: 10,26 m		Caudal 3,3 m <sup>3</sup> /h
	Tubería de polipropileno de 32 mm de diámetro		Altura máxima 10 m
			Tubería de polipropileno de 32 mm de diámetro

Fuente: elaboración propia

La figura 2, a continuación representa el esquema de proceso con sistema de tratamiento de efluente.

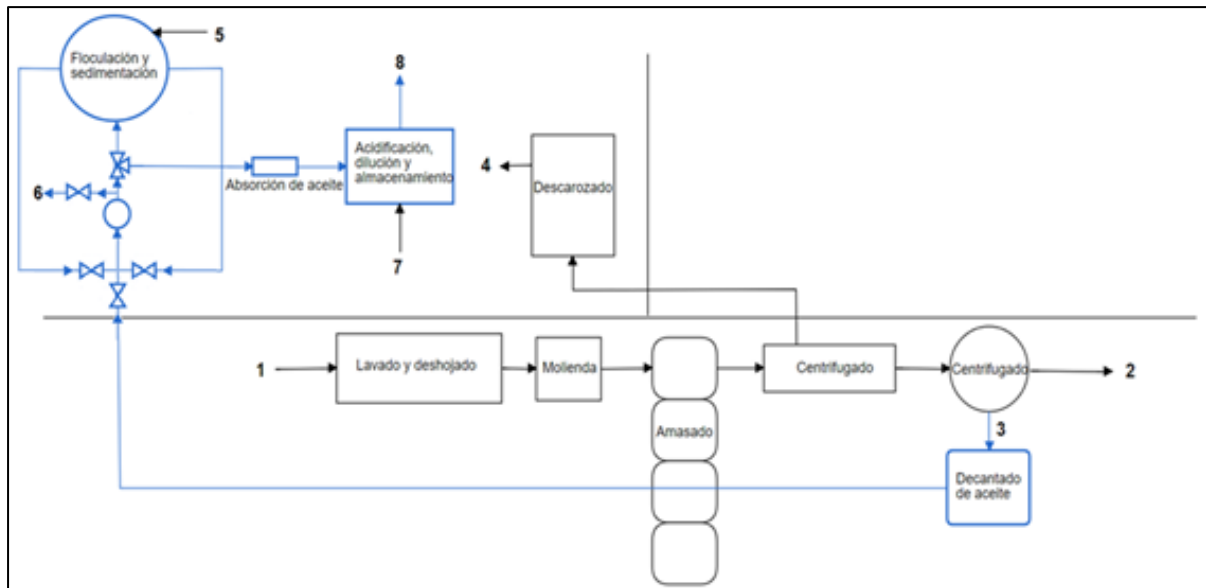


Figura 30. Esquema de proceso con sistema de tratamiento de efluente, realización propia

### 3.5. Estimación de costos

En la tabla 9 y 10 se muestran los precios de mercado conseguidos, los proveedores consultados, y los costos asociados al tratamiento del agua de vegetación generada en una campaña completa (90 días).

Tabla 3. Estimación de costo de inversión (en rojo los que se descartan por su alto costo)

Inversión				
Ítem	Costo	Proveedor	Cantidad necesaria	Cant. x costo
Contenedor de 1000 L de polietileno	\$1000	-----	1 unidad	\$1000
Contenedor de 8000 L de polietileno	\$24800	Plásticos Laspiur	1 unidad	\$24800
<b>Contenedor de 8000 L de PRFV</b>	<b>\$57000</b>	<b>Plásticos Laspiur</b>	-----	-----
Sedimentador	\$19500	Formingplast	1 unidad	\$19500
Cañería de PVC	\$6 por metro	-----	8 metros	\$48
Válvulas	\$100 c/u	-----	2 unidades	\$200
Bomba	\$2750	Komasa	1 unidad	\$2750
Agitador industrial	\$12800	CRISMET S.H.	1 unidad	\$12800
Variador de velocidad	\$5200	CRISMET S.H.	1 unidad	\$5200
Canasta de polipropileno para filtro absorbente	\$710	Sueiro e hijos SA	1 unidad	\$710
<b>Filtro prensa</b>	<b>\$109000</b>	<b>Industrias Khan</b>	-----	-----
<b>TOTAL</b>				<b>\$67008</b>

Fuente: elaboración propia

*Innovación en procesos y desarrollo tecnológico para el aprovechamiento de efluentes de la industria del olivo como fuente de agua apta para riego*

Tabla 10. Estimación de costos de operación.

Costos de operación				
Ítem	Costo	Proveedor	Cantidad necesaria para una campaña completa	Cantidad X costo
Ácido clorhídrico	\$230 los 10 L	Química Carabelli	747 L	\$17181
Cloruro férrico	\$21,12 el kg de solución al 40%	Todo Droga	560 kg	\$11832
Hidróxido de calcio	\$960 los 400 kg	Todo Droga	398 kg	\$960
Absorbente orgánico	\$63 por kg	Grupo RFG	18 kg	\$1134
Energía bomba	0,7689 \$/kWh	EC S.A.P.E.M	180 horas	\$7739
Energía agitador			45 horas	\$645
TOTAL				\$39491

Fuente: elaboración propia

La tarifa energética, naturalmente, es función de la banda horaria del gasto y de la empresa que la provee. Para la estimación de costos se tomó la tarifa para la banda ‘resto’ de 5 am a 18 pm, tarifa de EC S.A.P.E.M, Catamarca. Y la cantidad necesaria se calculó considerando el uso de la bomba 2 horas por día y del motor del impulsor durante el período de agitación, todos los días de la campaña.

Si se quisiese reducir el costo total, puede prescindirse del sedimentador comercial propuesto y utilizar un contenedor convencional de 1000 L, realizándole as modificaciones necesarias. Posiblemente su operación sea más engorrosa y se corra el riesgo de que su desempeño no sea el óptimo. En caso de optarse por esta opción, el costo de inversión se reduce a \$48508. Otro equipo del que también podría prescindirse es el contenedor de almacenamiento de 8000 L, almacenando el agua tratada en los contenedores de 1000 L que sean necesarios según el volumen que se maneje. Suponiendo el manejo de 8000 L para que el costo sea comparable, se reduciría a \$31708.

Por otro lado, es preciso tener en cuenta para concluir la estimación de costos, el beneficio que la Cooperativa podría conseguir de la recuperación de los 19 L de aceite de la etapa de decantación. Con 1710 L de aceite recuperados en una campaña completa, suponiendo que la iniciativa de producir jabones se mantenga, para que pueda solventar los costos de inversión, se debería obtener un beneficio mínimo de \$39,10 por litro de aceite de oliva utilizado para producir jabones. Se buscaron formulaciones de jabones vegetales artesanales, y en promedio se tiene que para 100 g de jabón se usan 75 ml de aceite. Con esta información tenemos con 1710 L de aceite se producirían 15200 jabones por campaña (de 150 g cada uno). Si consideramos que se pueden vender a \$40 la unidad (precio promedio del mercado) la ganancia bruta sería de \$355 por litro de aceite utilizado. De esta forma, si los otros costos para producir jabón artesanal permitiesen alcanzar un beneficio neto de por lo menos 11% del ingreso bruto, entonces el costo de inversión de \$67008 se vería compensado con el aceite recuperado de una campaña. Con respecto a los costos operativos de una campaña, que son un poco más de la mitad que los costos de inversión, se verían solventados con la venta de poco más de la mitad de la producción de jabones de una campaña (considerando el mismo porcentaje de beneficio).

#### **4. Conclusiones**

Se logró diseñar un sistema de tratamiento que permite la utilización del agua de vegetación como agua para riego.

El agua tratada presentó un valor para grasas y aceites de 24,8 mg/L, para oxígeno consumido de 79,15 mg/L y para sólidos sedimentables en diez minutos y dos horas de 55 mg/L y 70 mg/L respectivamente. Si bien estos valores, a excepción del OC, se ubican por encima de los límites que establece la normativa, las reducciones obtenidas son importantes, alcanzando el 99,82% para el caso de grasas y aceites y 91,7% para el oxígeno consumido. Además, los valores de las determinaciones de cationes realizadas resultan por debajo de los límites exigidos por la legislación, a excepción del cromo cuya verificación queda pendiente.

Además, el beneficio que podría obtenerse con la producción de jabones vegetales artesanales serviría, luego de la amortización de los costos en dos campañas, para solventar casi el 50% de los costos operativos de la planta de tratamiento.

De acuerdo a lo anteriormente expuesto, los resultados experimentales y la propuesta de tratamiento nos permiten afirmar que es posible obtener agua de riego a escala piloto.

Los principales temas que permanecen latentes son los siguientes:

- ✓ Estudiar con más profundidad la disminución del oxígeno consumido y de grasas y aceites para lograr cumplir con la normativa.
- ✓ Analizar de forma más rigurosa la capacidad de las fibras orgánicas de absorber aceite emulsionado.
- ✓ Concluir la operación de tratamiento de lodos proveniente del sedimentador para establecer cuál de las opciones planteadas en este proyecto es la óptima, o si existe otra que no se haya contemplado.
- ✓ Analizar polifenoles del agua resultante del tratamiento.
- ✓ Si se avanzase en la reducción de valores de los parámetros limitantes para el uso en riego, construir y poner a punto la planta de tratamiento diseñada.

#### **5. Referencias**

- [1] American Public Health Association, American Water Works Association, Water Pollution Control Federation. (1992). Standard Method for the Examination of Water and Wastewater. Madrid: Ediciones Días de Santos SA.
- [2] M. Niaounakis, C. P. Halvadakis. (2006). Olive Processing Waste Management: Literature review and patent survey. Amsterdam – Boston – Heidelberg – London – New York – Oxford: Elsevier.
- [3] L. Metcalf, H. P. Eddy. (1977). Tratamiento y depuración de las aguas residuales. Barcelona: Editorial Labor SA.

*Innovación en procesos y desarrollo tecnológico para el aprovechamiento de efluentes de la industria del olivo como fuente de agua apta para riego*

- [4] Warren L. McCabe, Julian C. Smith, Peter Harriott. (2007). Operaciones unitarias en ingeniería química, Séptima edición. México, D.F: McGraw-Hill Interamericana.
- [5] <https://www.reboca.com/pdf-informacion/manual-tecnico-es.pdf>. (2017, 11 7). Retrieved from <https://www.reboca.com/pdf-informacion/manual-tecnico-es.pdf>
- [6] Mott, R. L. (1996). Mecánica de fluidos aplicada. Prentice Hall.
- [7] Crespi, J. (2004). España Patent No. ES 2 239 914 A1.
- [8] Curi et al. (1980). Theory and practice of biological wastewater treatment.
- [9] Fuller, W.H y Warrick, A.W. (1985). Soils in waste treatment and utilization. Boca Raton, Florida: CRC ress Inc. .
- [10] Martínez Nieto, L. y Garrido Hoyos, S.E. (1994). El alpechín, un problema medio ambiental en vías de solución. Qupimica e Industria.
- [11] Ramos-Cormezana. (1986). Preliminary results proc. int. Symp. on olive by-product valorization. Sevilla, España.
- [12] Rodriguez, J. G. (2000). Depuración de alpechín por procesos combinados químicos y biológicos. Badajoz.
- [13] Sáiz-Jimenez. (1987). Sludge from the waste water of olive processing industry.