

**Uso de humedales de flujo sub-superficial
construidos con corcho como medio filtrante
en el tratamiento de aguas residuales de una
industria vitivinícola en Barcelona, España**

Jhonny Ismael Bautista Quispe

Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano

Honduras

Noviembre, 2017

ZAMORANO
CARRERA DE AMBIENTE Y DESARROLO

Uso de humedales de flujo sub-superficial construidos con corcho como medio filtrante en el tratamiento de aguas residuales de una industria vitivinícola en Barcelona, España

Proyecto especial de graduación presentado como requisito parcial para optar
al título de Ingeniero en Ambiente y Desarrollo en el
Grado Académico de Licenciatura

Presentado por

Jhonny Ismael Bautista Quispe

Zamorano, Honduras

Noviembre, 2017

Uso de humedales de flujo sub-superficial construidos con corcho como medio filtrante en el tratamiento de aguas residuales de una industria vitivinícola en Barcelona, España

Jhonny Ismael Bautista Quispe

Resumen. Los humedales construidos de flujo sub-superficial constituyen una opción para el tratamiento de aguas residuales industriales, debido a que son sistemas eficientes de depuración de materia orgánica, nutrientes, metales pesados y pesticidas. El objetivo del estudio fue comparar el uso de humedales artificiales de flujo sub-superficial a escala piloto rellenos con corcho como medio filtrante en el tratamiento terciario de aguas residuales vitivinícolas. Se recolectó ocho muestras diarias de agua residual proveniente del tratamiento secundario con lodos activados de una industria vitivinícola (agua afluyente) y de agua residual efluente (salida) de un humedal horizontal y otro vertical. Para fines de esta investigación, se utilizó residuos de corcho de 2 - 3 mm de diámetro, se plantó *Phragmites australis* y la temperatura ambiental fue de 5 - 15 °C. Se analizaron en las muestras de aguas residuales: DBO5, DQO, pH, conductividad, temperatura, P total N total, NO₃, NH₄, metales pesados (Ni y Cu) y pesticida Metalaxyl. Se determinó que el humedal vertical tiene una remoción mayor de DQO, DBO5, NO₃ y NH₄ en comparación con el humedal horizontal que tiene una mayor remoción de pH (P = 0.042), conductividad (P = 0.034), Ni, Cu (P = 0.046) y Metalaxyl. Asimismo, existió una acumulación de P total del 43 y 63% para el humedal horizontal y vertical, respectivamente. Se concluyó que ambos humedales remueven contaminantes físico-químicos, orgánicos y metales pesados. También, que el humedal horizontal remueve los metales pesados y Metalaxyl por debajo de los Límites Máximos de Vertidos de Agua Residuales en Cataluña.

Palabras clave: Humedal horizontal, humedal vertical, remoción.

Abstract. Sub-surface flow constructed wetlands are an option for the treatment of industrial wastewater, because they are efficient systems for purification of organic matter, nutrients, heavy metals and pesticides. The objective of the study was the use of sub-surface flow artificial wetlands filled with cork as a filter medium in the tertiary treatment of wastewaters. Eight samples of waste water from secondary treatment with activated sludge from a winery (tributary water), and effluent wastewater (outlet) from a horizontal and a vertical wetland were collected. For the purposes of this research, cork residues of 2 - 3 millimeters of diameter were used, *Phragmites australis* were planted, and the environmental temperature was 5 - 15 °C. BOD5, COD, pH, conductivity, temperature, total P, total N, NO₃, NH₄, heavy metals (Ni and Cu) and pesticide Metalaxyl, were analyzed in the samples of wastewater. It was determined that the vertical wetland has a greater removal of COD, BOD5, NO₃, and NH₄ compared to the horizontal wetland that has a greater removal of pH (P = 0.042), conductivity (P = 0.034), Ni, Cu (P = 0.046) and Metalaxyl. Likewise, there was a total P accumulation of 43 and 63% for the horizontal and vertical wetlands, respectively. It was concluded that both wetlands remove physical-chemical, organic pollutants and heavy metals. Also, that the horizontal wetland removes heavy metals and Metalaxyl below the Maximum Residual Water Spill Limits in Catalonia.

Key words: Horizontal wetland, removal, vertical wetland.

CONTENIDO

Portadilla	i
Página de firmas	ii
Resumen	iii
Contenido	iv
Índice de Cuadros, Figuras y Anexos	v
1. INTRODUCCIÓN	1
2. METODOLOGÍA	6
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	10
4. CONCLUSIONES	17
5. RECOMENDACIONES	18
6. LITERATURA CITADA	19
7. ANEXOS	22

ÍNDICE DE CUADROS, FIGURAS Y ANEXOS

Cuadros	Página
1. Caracterización físico-química de las aguas residuales afluyente y efluentes	11
2. Resultados de análisis estadístico de Prueba T para muestras independientes.....	16

Figuras	Página
1. Humedales sub-superficiales a) flujo horizontal, b) flujo vertical	2
2. Instituto Politécnico Campus Terrassa (IPCT).....	6
3. Sistema de humedales construidos de flujo sub-superficial a escala piloto	7
4. Muestras de 50 ml del agua residual afluyente y efluente de los humedales	8
5. Medición de parámetros físico-químicos a) DBO5 y DQO b) Amonio, fósforo total y nitrógeno	9
6. Porcentaje de remoción de DQO, DBO5, pH, y Conductividad.	13
7. Porcentaje de remoción de N total, NO ₃ y NH ₄	14
8. Porcentaje de remoción de Ni, Cu y metalaxyl	15

Anexos	Página
1. Legislación Vigente en Cataluña sobre vertidos de aguas residuales.	22

1. INTRODUCCIÓN

Actualmente, España forma parte del grupo de los 10 países que producen el 80% del vino del planeta. No obstante, la Agencia Iberoamericana para la Difusión de la Ciencia y Tecnología (2010) sostiene que la producción de vino es una de las actividades con mayor impacto ambiental en la Unión Europea. Esto debido a la generación de residuos sólidos, aguas residuales y uso de pesticidas para la producción de uvas. Dicha industria genera entre dos y tres millones de toneladas anuales de residuos o subproductos (80 - 85% son residuos orgánicos) durante la etapa de vendimia (Ventosa, Clemente y Pereda, 2011).

Las aguas residuales de la industria vitivinícola se diferencian en cantidad y calidad según las épocas de vendimia, bodega y embotellado (Ventosa et al., 2011). Comúnmente, estas se producen en “los procesos de limpieza de los equipos y maquinaria que están en contacto con la materia prima..., así como en los derrames accidentales en los numerosos trasvases que se llevan a cabo durante el proceso de elaboración del vino” (Condorchem, 2017, p.1). Se caracterizan por tener un alto nivel de materia orgánica y un pH muy ácido, los cuales pueden afectar la calidad del agua (Ventosa et al., 2011). Por eso, la Legislación Vigente en Cataluña sobre vertidos de aguas residuales, establece los lineamientos que deben cumplirse antes de liberarlos al ambiente.

Otra forma mediante la cual la industria del vino contribuye a la contaminación del ambiente es por la emisión de pesticidas. Los pesticidas forman parte del agua residual al mezclarse con el agua empleada para el lavado de la materia prima, la cual contiene residuos en su superficie. Actualmente, España es el país de Europa que más pesticidas utiliza en la agricultura. El 20% de todos los pesticidas consumidos en la Unión Europea corresponden al país ibérico, de los cuales los fungicidas y bactericidas representan el 42% del total (Fita, Quelart, Ferro y García, 2010). Las aguas residuales de la industria vitivinícola contienen Metalaxyl (acilalanina), un fungicida usado en los viñedos contra enfermedades como el mildiu y la necrosis causados por los hongos *Oidium* y *Botrytis cinerea*, respectivamente (Cátedra UNESCO de Sostenibilidad [UNESCOSOST], 2016a).

Los humedales son sistemas diseñados y construidos para utilizar la vegetación, suelo/sustrato y las comunidades microbianas asociadas para el tratamiento de aguas residuales y escurrentía. Estos tratamientos se basan en diversos procesos físicos-químicos y biológicos dentro de la asociación de sustrato, plantas macrófitas y microorganismos. Los humedales construidos son un enfoque rentable y técnicamente factible por varias razones: son menos costosos de construir que otras opciones de tratamiento, las actividades de operación y mantenimiento requieren sólo de trabajo periódico, son capaces de tratar aguas residuales con componentes que difieren químicamente y en concentración, y facilitan la reutilización y el reciclaje del agua (Haberl y Langergraber, 2001).

Vymazal (2010) menciona que los primeros experimentos con macrófitas de humedales para el tratamiento de aguas fueron realizados en Alemania a principios de los años 50. Desde entonces, los humedales se han convertido en una tecnología fiable para el tratamiento de diversos tipos de aguas residuales. La clasificación básica se basa en el régimen de flujo de agua. Así, pueden ser de flujo superficial y flujo sub-superficial vertical u horizontal. Recientemente, la combinación de varios tipos de humedales construidos o sistemas híbridos se han utilizado para mejorar el efecto del tratamiento, especialmente para reducir el nitrógeno.

En los humedales de flujo sub-superficial, la circulación del agua se realiza a través de un medio granular con presencia de rizomas y raíces de plantas sembradas en el mismo (Vymazal, 2010). Para el caso de los humedales de flujo sub-superficial horizontal, el agua afluyente es suministrada en la zona superior, fluye lateralmente a través del medio granular, y es recolectada en la zona opuesta inferior (Figura 1a). Por otro lado, en los humedales de flujo sub-superficial vertical, el agua residual fluye de arriba hacia abajo mediante un medio poroso constituido por capas de sustrato fino y grueso; en la parte superior e inferior, respectivamente (Figura 1b) (Delgadillo, Camacho, Pérez y Andrade, 2010).

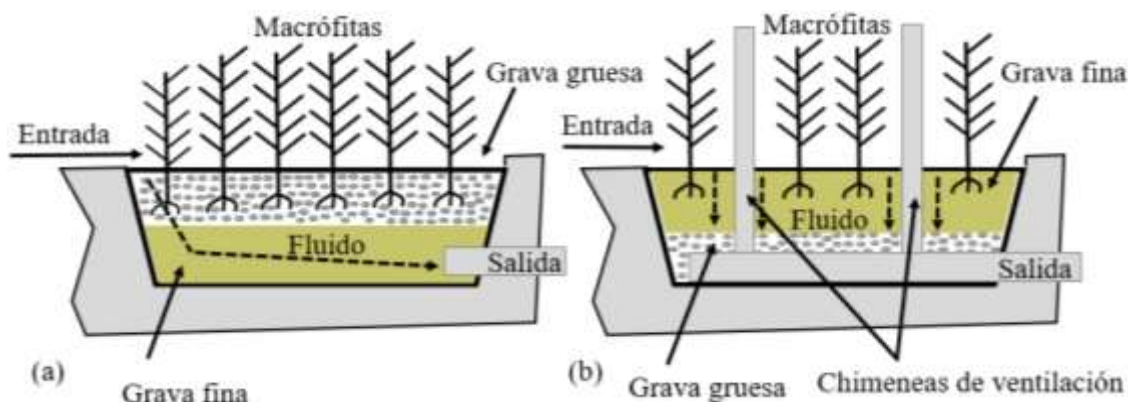


Figura 1. Humedales sub-superficiales a) flujo horizontal, b) flujo vertical. Fuente: Adaptado de Rabat (2016).

Existen distintos estudios en relación a los humedales artificiales. La literatura disponible sugiere que los humedales construidos pueden tolerar altas cargas de contaminantes y sustancias tóxicas sin perder su capacidad de eliminación, por lo que son sistemas muy eficaces. Además, se ha descrito que la vegetación y el medio poroso son factores que pueden optimizar la eficiencia del tratamiento de los contaminantes. Por ejemplo, en relación a la vegetación, Williams (2011) menciona que la rizósfera expansiva de arbustos herbáceos y especies arbóreas proporciona una zona de cultivo enriquecida para los microorganismos involucrados en los procesos de desintegración.

En su mayoría los estudios de humedales artificiales están vinculados al uso de estos sistemas naturales en el tratamiento de aguas residuales. Bernal et al. (2003) reportan la construcción de un humedal con flujo sub-superficial que operaba con agua residual municipal almacenada en un tanque de alimentación y distribuida con un caudal de 0.33

m³/día. Dicho humedal tenía un Tiempo de Retención Hidráulico (TRH) de 6 días y un área superficial de 8 m². Se usaron plantas macrófitas como *Typha* sp, las cuales crecen naturalmente en las riberas del río Magdalena en Colombia. Además, se usó grava fina como medio de soporte. Las eficiencias de remoción que se han obtenido llegan hasta el 97% para Sólidos Suspendidos Totales (SST), 90% para Demanda Química de Oxígeno (DQO) y el 92.3% para Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO5) a 20 °C.

López, López y León (2015) sustentan que los humedales artificiales son eficaces en el tratamiento de la vinaza, un producto líquido generado a partir de la destilación de etanol de la caña de azúcar. La vinaza se caracteriza por presentar partículas en suspensión, pH bajo (3,5 - 5), y una alta carga orgánica de 4,000 g/L expresada como DBO5 y DQO. Consecuentemente, con el objeto de disminuir la DQO y DBO5, el estudio de López et al. (2015) evaluó el uso de un humedal de flujo sub-superficial en el tratamiento de la vinaza a distintas concentraciones de carga orgánica con *Canna indica*. Se determinó que el humedal logró una remoción del 57.9% de DQO y 71.1% de DBO5, en un TRH de 3 días.

En otro estudio realizado por Chen, Kao, Yeh y Chao (2006) examinaron la eficacia y capacidad de uso de humedales construidos para la eliminación de contaminantes industriales. Para ello, se instalaron cuatro sistemas de humedales superficiales. Se usaron cuatro especies de plantas, incluyendo plantas flotantes *Pistia stratiotes* L. e *Ipomoea aquatica* y plantas emergentes *Phragmites communis* L. y *Typha orientalis* Presl. Los resultados mostraron que la planta piloto redujo la DQO, DBO5, SST, Fósforo total (P) y Nitrógeno amoniacal (NH₃-N) en una 61, 89, 81, 35 y 56%, respectivamente. También, se han usado humedales de flujo horizontal sub-superficial construidos con *Phragmites australis* y *Typha latifolia* para el tratamiento de aguas residuales de la curtiduría, las cuales presentan valores de 420 - 1,000 mg/L de DBO5 y 808 - 2,449 mg/L de DQO. Se reportó una remoción del 88% para DBO5 y del 92% para DQO, en un TRH de 2, 5 y 7 días (Calheiros, Rangel y Castro, 2007).

En Bulgaria, se han utilizado humedales con vegetación compuesta por plantas macrófitas (*Typha latifolia*, *Typha angustifolia*, *Phragmites communis*, *Scirpus lacustris*, *Juncus* spp.) para el tratamiento de aguas contaminadas con petróleo crudo y metales pesados como cadmio (Cd), cobre (Cu), plomo (Pb), manganeso (Mn) y hierro (Fe); y con concentraciones de aceites y metales pesados ocho veces superior a los niveles admisibles para las aguas destinadas a la agricultura y la industria. Se observó que el contenido de aceite de las aguas después del tratamiento se redujo a menos de 0.2 mg/L, y que las concentraciones de metales pesados disminuyeron por debajo de los niveles permisibles pertinentes (Groudeva, Groudev y Doycheva, 2001).

Sultana, Akrotos, Vayenas y Pavlou (2015) informaron que se han aplicado los humedales en el tratamiento de aguas residuales agroindustriales. Sin embargo, se ha reportado un caso particular del uso de los humedales artificiales en el tratamiento de aguas de la industria del vino en España. Las bodegas Marques de Arinzano construyeron en el año 2002 un humedal artificial que funcionó como una depuradora natural para el tratamiento de aguas residuales generadas durante el procesado de la uva y el proceso de vivificación. Los efluentes presentaron una alta contaminación orgánica de hasta 12,000 mg/L de DBO5. En tal sistema se pretendió recrear un ecosistema natural para favorecer los procesos físicos, químicos y

biológicos con el objetivo de alcanzar una mejora sinérgica de los ciclos de degradación de la materia orgánica y la estabilización de los nutrientes. El sistema alcanzó una eliminación del 90 - 95% de la carga contaminante medida en DBO5 (Asociación de Defensa de la Naturaleza [ADENA], 2002).

Por otro lado, la industria corchera, anexa a la industria del vino, contribuye con la producción de hasta 2,700 millones de toneladas de residuos cada año en la Unión Europea (Agencia Iberoamericana para la Difusión de la Ciencia y Tecnología, 2010). Una manera de disminuir los residuos de corcho es a través de su reuso para la adsorción de metales pesados y pesticidas debido a sus propiedades físicas y químicas. En el caso de los metales pesados, Sfaski, Azzouz y Abdelwahab (2013) demostraron que los residuos de corcho se pueden utilizar como sorbente natural para Cromo hexavalente (Cr VI), al lograr una adsorción del 77% de cromo con partículas de corcho menores a 0.08 mm de diámetro. En relación a los pesticidas, Domínguez et al. (2005) hallaron que partículas de corcho de 1 - 2 mm de diámetro adsorben la bifentrina en un 80%.

En este sentido, la Cátedra UNESCO de Sostenibilidad (UNESCOSOST) de la Universidad Politécnica de Cataluña (UPC) ha estudiado el potencial de detoxificación y descontaminación del sub-producto corcho debido a su origen natural y bajo costo. Para ello han empleado el corcho como medio granular en los humedales construidos. Esto debido a que su porosidad favorece el crecimiento de comunidades microbianas; y su potencial absorbente es capaz de remover contaminantes como pesticidas y metales pesados en aguas (UNESCOSOST, 2012).

Desde el año 2013 hasta el 2016 la UNESCOSOST desarrolló el proyecto REAGRITECH en zonas agrícolas de la ciudad de Lleida en la comunidad autónoma de Cataluña. Este consistió en la regeneración y reuso del agua de escorrentía contaminadas con nitratos y pesticidas asociadas a actividades agrícolas. Para ello, se usaron humedales artificiales como sistemas naturales combinados de tratamiento de aguas, los cuales incorporaron grava y residuos de corcho como medio filtrante. El agua tratada fue reutilizada en el riego de cultivos e incorporada nuevamente como agua de recarga en los acuíferos naturales (UNESCOSOST, 2017).

En este contexto, la UNESCOSOST, el Instituto Catalán del Suro (ICSURO), el Centro Tecnológico de Manresa (CTM) y una industria vitivinícola barcelonés realizan el proyecto ECORKWASTE LIFE14 ENV/ES/000460 - TÉCNICA Y PROYECTOS SA (TYPESA) - ASSOCIACIÓ AEI INNOVI (INNOVI), el cual pretende reutilizar los residuos de corcho como material absorbente en humedales artificiales para el tratamiento de sus aguas residuales. Actualmente, el tratamiento de aguas residuales de la industria vitivinícola incluye procesos primarios con dos sistemas de homogeneización y secundarios con un sistema de lodos activados antes de su descarga al río.

No obstante, el sistema de tratamiento no es eficiente en la remoción de metales pesados y pesticidas, debido a que se ha reportado la presencia de níquel (Ni), cobre (Cu) y pesticida Metalaxyl en el agua residual efluente del tratamiento secundario, los cuales se encuentran por encima de la legislación vigente en Cataluña sobre vertidos de aguas residuales. Por

esta razón, es necesario adicionar un tercer tratamiento de agua residual con humedales artificiales para mejorar aún más la calidad del agua residual.

En este sentido, la importancia del estudio radica en demostrar y comparar la efectividad de dos humedales artificiales (vertical y horizontal) de flujo sub-superficial a escala piloto, rellenos únicamente con residuos de corcho de 2 - 3 mm de diámetro, en la remoción de contaminantes físicos, químicos, orgánicos (pesticida Metalaxyl) y metales pesados, estos dos últimos parcialmente removidos por el sistema de tratamiento secundario de lodos activados de la industria vitivinícola.

Los objetivos del estudio fueron:

- Evaluar el uso de dos humedales (horizontal y vertical) en el tratamiento terciario de aguas residuales de una industria vitivinícola en Barcelona, España.
- Comparar la remoción de contaminantes físico-químicos, orgánicos y metales pesados entre los dos humedales vertical y horizontal.
- Determinar el tipo de humedal (vertical u horizontal) que remueve los metales pesados y pesticida por debajo de la legislación vigente en Cataluña sobre vertidos de aguas residuales.

2. METODOLOGÍA

Sitio de estudio.

La instalación de los humedales piloto construidos artificialmente y los análisis físico-químico de las muestras de agua residual efluente del tratamiento secundario de la industria vitivinícola, y agua residual afluyente de los humedales vertical y horizontal se llevaron a cabo en el Instituto Politécnico del Campus de Terrassa (IPCT) de la UPC (Figura 2). La evaluación de la remoción de Ni, Cu y Metalaxyl, se realizó en el Laboratory Cork Center del IC Suro, ubicados en Barcelona, España.



Figura 2. Instituto Politécnico Campus Terrassa (IPCT).

Construcción de los humedales artificiales.

El montaje de los humedales se desarrolló durante 3 días de acuerdo con el protocolo PNT-MyM/121001, el cual es un procedimiento de construcción y mantenimiento de los humedales construidos a escala piloto del IPCT. Los sistemas de humedales funcionaron autónomamente y la vegetación usada fueron seis plantas de *Phragmites australis* por ser la de mayor abundancia en los ríos aledaños a la industria vitivinícola. Estas se plantaron distribuidas aleatoriamente y uniformemente en la superficie de los dos humedales.

El sistema de tratamiento fue estabilizado con agua potable durante 1 semana. Constó de un tanque de alimentación de 120 L, un humedal vertical (HV) de 1.10 m de altura y 0.30 m de radio, un humedal horizontal (HH) de 0.6 m x 1.20 m x 0.5 m, un depósito de plástico de 90 L y dos bombas peristálticas (Figura 3) con caudales de 4.5 L/h (B1) y 8.5 L/h (B2). Posteriormente, el humedal vertical y horizontal fueron llenados con 38 y 44 kg de corcho de 2 - 3 mm de diámetro, respectivamente. La elección del diámetro se debió a su eficiencia en la adsorción de metales pesados como el Ni y Cu (UNESCOSOT, 2016) y Cr(VI) (Sfaski et al., 2013); y pesticidas como la bifentrina (Domínguez et al., 2005).

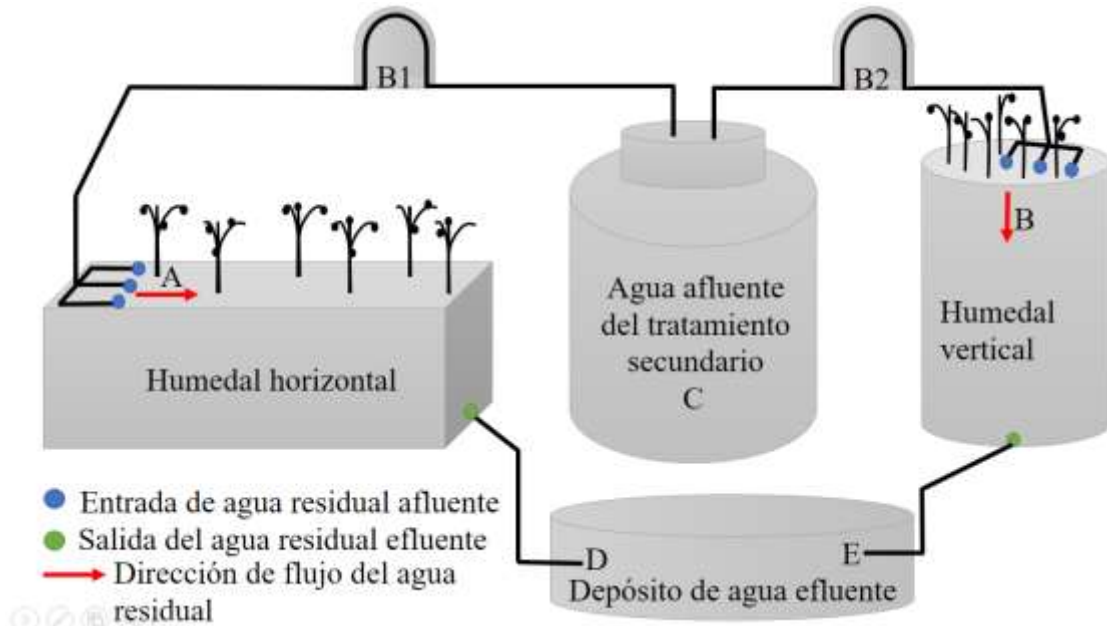


Figura 3. Sistema de humedales construidos de flujo sub-superficial a escala piloto. B1 y B2, bombas peristálticas; A y B, entrada de agua afluyente a los humedales; C, D y E, puntos de muestreo.

Traslado y vertido del agua residual efluente del tratamiento secundario en el tanque de alimentación.

Se depositó 500 L de agua residual efluente del tratamiento secundario con lodos activados de la industria vitivinícola en un contenedor con la misma capacidad, el cual fue trasladado desde “Sadurní d’Anoia” hacia el IPCT en Terrassa, a mediados de febrero del 2017 y ubicado en una zona con sombra y libre de contaminación. Dicha agua residual provino de la producción de vino en temporada navideña 2016. Posteriormente, se llenó cada día el tanque de alimentación con 60 L de agua residual efluente para el período de riego diario de los dos humedales: 20 L para el humedal horizontal y 40 L para el humedal vertical, durante 4 horas y 30 minutos (TRH).

Caracterización físico-química del agua residual afluyente del tratamiento primario y efluente de los humedales vertical y horizontal.

Recolección y análisis de muestras. Se analizó tres diferentes tipos de agua residual. Agua residual proveniente del tratamiento secundario con lodos activados de la industria vitivinícola (agua afluyente). Agua residual efluente (salida) del humedal horizontal y vertical (Figura 4). La muestra de agua residual afluyente (punto de muestreo C) fue recolectada del tanque de alimentación previo al riego de los humedales (Figura 3). Las muestras de aguas residual efluentes de los dos humedales (puntos de muestreo D y E) fueron recolectadas posterior al periodo de riego (4 horas y 30 minutos) de los humedales (Figura 3). Todas las muestras fueron depositadas en un depósito hermético para su posterior transporte al laboratorio. A continuación, se detalla el proceso de muestreo y análisis para cada parámetro estudiado:

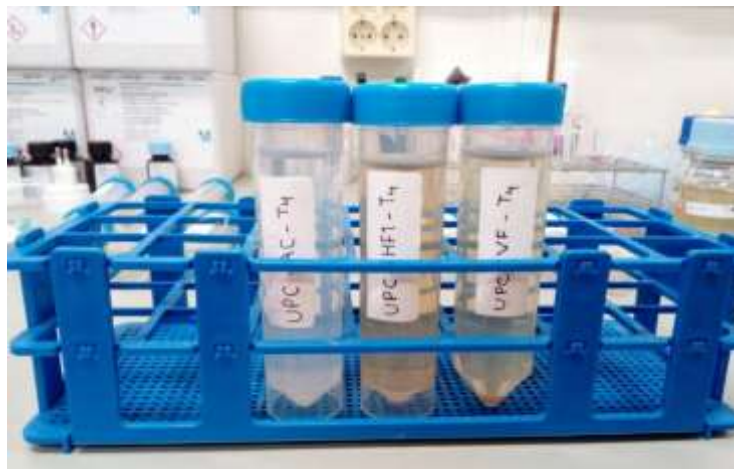


Figura 4. Muestras de 50 ml del agua residual afluyente y efluente de los humedales.

- a) DBO5 y DQO. Se tomó una muestra semanal de 250 ml del agua residual afluyente y efluente de los dos humedales en vasos de precipitado durante 2 semanas. Posteriormente, la DBO5 y la DQO se determinaron mediante los métodos de presión OXITOP y el método fotométrico Spectroquant NOVA 60, respectivamente (Figura 5a y b).
- b) pH, temperatura de agua y conductividad. Se tomó una muestra de 50 ml del agua residual afluyente y efluente de los dos humedales en un tubo faldón durante 8 días consecutivos. Para el análisis de pH se utilizó una sonda de pH HACH Lange modelo HQ14d, para la medición de la temperatura un termómetro digital Checktemp, y para la conductividad una sonda de conductividad HACH Lange modelo HQ11d.
- c) Amonio (NH_4), fósforo total (P), y nitrógeno total (N). Se tomó una muestra semanal de 50 ml del agua residual afluyente y efluente de los dos humedales en dos tubos de ensayo durante dos semanas. El análisis de los diferentes parámetros se efectuó con el método fotométrico Spectroquant NOVA 60 (Figura 5b).
- d) Ni y Cu. Se tomó tres muestras de 50 ml del agua residual afluyente y efluente de los dos humedales en un tubo faldón en un período de 2 semanas y se vertió tres gotas de ácido

nítrico Suprapur a cada muestra. Se refrigeró las muestras a una temperatura de 15 °C hasta su traslado al CTM, para su posterior análisis mediante el método de absorción atómica de llama.

- e) Metalaxyl. Se tomó una muestra de 40 ml del agua residual afluyente y efluente de los dos humedales en una botella de vidrio pequeña de 100 ml durante 8 días. Se refrigeró las muestras a una temperatura de 15 °C hasta su traslado al ICSuro, para su posterior análisis mediante el método de espectrometría de masa.

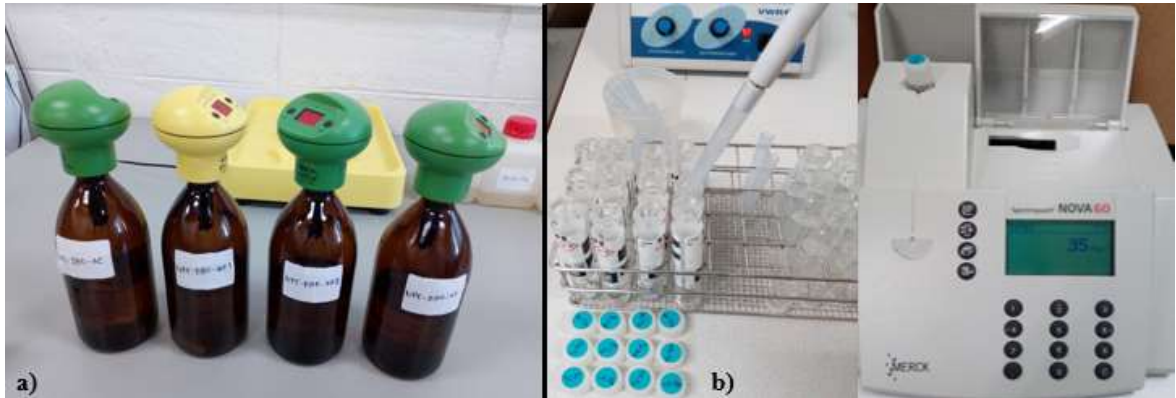


Figura 5. Medición de parámetros físico-químicos a) DBO5 b) DQO, amonio, fósforo total, y nitrógeno total.

Análisis estadístico.

Se realizó un análisis estadístico descriptivo a los resultados de los parámetros en donde se desarrollaron menos de tres muestreos (DBO5, DQO, NH₄, P total, y N total) y un análisis estadístico inferencial a los resultados de los parámetros en donde se efectuó más de tres muestreos (pH, conductividad, Ni, Cu y Metalaxyl). Para ello, se utilizó el programa “Statistical Package for the Social Sciences” (IBM® SPSS versión 19®) con un nivel de significancia del 5% ($P < 0.05$). Se planteó la hipótesis alterna (H_a): sí existe diferencia significativa en la remoción de los contaminantes físico-químicos, orgánicos (Metalaxyl) y metales pesados (Ni y Cu), entre ambos tipos de humedales. Para la prueba de hipótesis se aplicó una Prueba T para dos muestras independientes.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Caracterización físico-química del agua residual afluyente y efluente de los dos humedales vertical y horizontal.

Los valores obtenidos de la caracterización de aguas residuales efluentes del tratamiento secundario de la planta vitivinícola barcelonés (agua afluyente en el estudio), están por debajo del valor permisible establecido por la Legislación Vigente en Cataluña sobre vertidos de aguas residuales (Cuadro 1), a excepción de los metales pesados y el pesticida Metalaxyl. Al comparar el efecto del uso de los dos humedales artificiales en el tratamiento de las aguas residuales se puede observar que con ambos tipos de humedales (vertical y horizontal) hubo diferencia en los porcentajes de remoción de los diversos tipos de contaminantes presentes en el agua residual afluyente. Los porcentajes de remoción son categorizados en remoción alta (>75%), media-alta (50 - 74%), media-baja (25 - 49%) y baja (<25%).

En el caso de la DBO5 y la DQO existió un porcentaje de remoción media alta del 47 y 42%, respectivamente, por parte del humedal vertical (Cuadro 1 y Figura 2). En cambio, el humedal horizontal logró una remoción media-baja del 28% en DQO y una remoción nula para DBO5 (Cuadro 1 y Figura 6). En relación al pH, el porcentaje de remoción fue bajo para el humedal vertical (3%) y horizontal (6%). Situación similar ocurrió con la conductividad, en donde ambos humedales vertical y horizontal presentaron una remoción baja del 20 y 10%, respectivamente (Cuadro 1 y Figura 6).

Por otro lado, ambos tipos de humedales tuvieron una remoción baja de N total y NO₃. El humedal vertical obtuvo una remoción del 14% para N total y del 15% para NO₃ (Cuadro 1 y Figura 7). De forma similar, el humedal horizontal obtuvo una remoción del 10% para N total y del 1% para NO₃ (Cuadro 1 y Figura 7). Contrariamente, el porcentaje de remoción de NH₄ por parte del humedal horizontal fue medio (50%) y medio-alto (67%) por el humedal vertical (Cuadro 1 y Figura 7). En el caso particular del P total, existió una acumulación del 43 y 63% para ambos humedales (Cuadro 1).

Asimismo, los resultados indican que el humedal horizontal es más eficiente en la remoción de Ni y Cu, ya que alcanza porcentajes de remoción altos del 88 y 91%, respectivamente, en comparación con el humedal vertical que tiene un porcentaje remoción alto del 78% de Ni, pero tiene un porcentaje medio-bajo del 36% de Cu (Cuadro 1 y Figura 8). Ambos valores reportados de metales pesados en el agua efluente del humedal horizontal se encuentran por debajo de la Legislación Vigente en Cataluña sobre vertidos de aguas residuales. En el caso del pesticida Metalaxyl, ambos humedales vertical y horizontal logran una remoción alta del 90 y 92%, respectivamente.

Cuadro 1. Caracterización físico-química de las aguas residuales afluente y efluente.

Parámetros	Unidad	N ^{&}	Agua afluente	Agua efluente del HH	% Remoción HH	Agua efluente del HV	% Remoción HV
DQO	mg O ₂ /L	2	190.50 ± 19.1	137.00 ± 7.1	28.0	100.50 ± 16.3	47.0
DBO5	mg O ₂ /L	2	60.00 ± 0.0	60.00 ± 7.1	0.0	35.00 ± 0.7	42.0
pH	un. pH	8	8.18 ± 0.1	7.69 ± 0.1	6.0	7.97 ± 0.1	3.0
Temperatura	°C	8	16.06 ± 1.6	16.01 ± 1.8	0.3	16.21 ± 1.6	-0.9
Conductividad	Ms/cm	8	3.35 ± 0.1	2.67 ± 0.3	20.0	3.02 ± 0.0	10.0
P Total	mg P/L	2	1.50 ± 0.1	2.15 ± 0.6	-43.0	2.45 ± 0.9	-63.0
N Total	mg N/L	2	34.50 ± 0.7	31.00 ± 1.4	10.0	29.5 ± 2.1	14.0
NO ₃	mg NO ₃ /L	2	15.60 ± 5.9	15.50 ± 3.4	1.0	13.2 ± 1.7	15.0
NH ₄	mg NH ₄ /L	2	1.20 ± 0.1	0.60 ± 0.0	50.0	0.40 ± 0.1	67.0
Ni	µg/L	3	180.70 ± 12.6	21.30 ± 0.6	88.0	39.00 ± 16.5	78.0
Cu	µg/L	3	167.00 ± 39.0	14.30 ± 3.5	91.0	107.00 ± 56.0	36.0
Metalaxyl	ng/L	8	500.00 ± 0.0	41.12 ± 48.0	92.0	47.87 ± 53.5	90.0

[&] Número de muestras

Remoción de contaminantes físico-químicos, orgánicos y metales pesados entre los humedales vertical y horizontal.

Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO5). El humedal vertical presentó una remoción del 42% de la Demanda Bioquímica de Oxígeno, en contraste con la nula remoción del humedal horizontal (Cuadro 1 y Figura 6). La disminución de DBO5 ocurre rápidamente a través de la sedimentación y atrapamiento de materia en partículas en los espacios vacíos en la grava o en los medios de roca (Environmental Protection Agency [EPA], 1993). Los humedales verticales son muy efectivos en la remoción de la demanda bioquímica de oxígeno, debido a que se inundan y drenan intermitentemente, permitiendo que el aire rellene los poros del sustrato dentro del lecho y mejorando, de esta manera, la transferencia de oxígeno de la atmósfera al sistema (Zurita, De Anda y Belmont, 2009).

Demanda Química de Oxígeno (DQO). Similar a los resultados de la Demanda Bioquímica de Oxígeno, el promedio general de remoción de DQO fue más alto en el humedal vertical (47%) que en el horizontal (28%) (Cuadro 1 y Figura 6). Estos resultados se deben a que la DBO5 y la DQO miden la presencia de materia orgánica en las aguas residuales y a que los mismos principios de comportamiento y remoción dentro de los humedales construidos son aplicados a ambos parámetros (Zurita et al., 2009).

pH. La caracterización del agua residual efluente determinó que el pH del mismo era básico. En general, la disminución de pH fue baja para ambos tipos de humedales. Sin embargo, los análisis estadísticos demuestran que existió una diferencia significativa en la disminución de este parámetro entre ambos humedales ($P = 0.042$) (Cuadro 2). Para el agua efluente del humedal horizontal el pH fue de 7.69 y para el agua efluente del humedal vertical fue de 7.97. Sin embargo, existió una mayor remoción por parte del humedal horizontal (6%), a diferencia de la disminución del humedal vertical (3%) (Cuadro 1 y Figura 6).

Marín y Correa (2010) sostienen que un rango de pH de 6,5 - 8,5 es necesario para la existencia de la mayoría de la vida biológica, y que para procesos biológicos de nitrificación y desnitrificación, se recomiendan valores de pH de 7,2 - 9,0 y de 6,5 - 7,5, respectivamente. En este contexto, el pH de ambos humedales (vertical y horizontal) se mantuvo en el rango descrito con anterioridad, por lo que se asume que la viabilidad de los microorganismos no se vio afectada y que realizaron la degradación de la materia orgánica por medio de la nitrificación (humedal vertical) y desnitrificación (humedal horizontal).

Temperatura. No existió una variación entre la temperatura del agua afluente y aguas efluentes de ambos humedales. En ambos tipos de humedales la temperatura del agua se mantuvo por debajo de los 17 °C (Cuadro 1). Esta temperatura no tuvo una repercusión en la remoción de los parámetros estudiados, ya que los procesos físicos dentro de los humedales continúan independientemente de la temperatura (David, 1995). Tampoco tuvo una repercusión en la remoción del Ni y Cu, debido a que una temperatura inferior a 20° C no afecta el rango de remoción de ambos metales (UNESCOSOST, 2016b).

Es relevante destacar que los análisis físico-químicos de las aguas residuales se realizaron en la estación invernal en Barcelona, con una temperatura promedio entre 5 - 15 °C. Sin

embargo, esto no supuso una limitante para el funcionamiento de los humedales. David (1995), sostiene que los procesos físicos continúan independientemente de la temperatura, siempre y cuando el agua no se ha congelado. Asimismo, muchas de las reacciones químicas que ocurren dentro del sustrato del humedal, como la descomposición microbiana, generan calor al interior de los humedales.

Conductividad. Al igual que el pH, la remoción de la conductividad fue mayor en el humedal horizontal (20%), en comparación con el humedal vertical (10%) (Cuadro 1 y Figura 6). Asimismo, existió una diferencia significativa en la remoción de la conductividad entre ambos humedales ($P = 0.034$) (Cuadro 2).

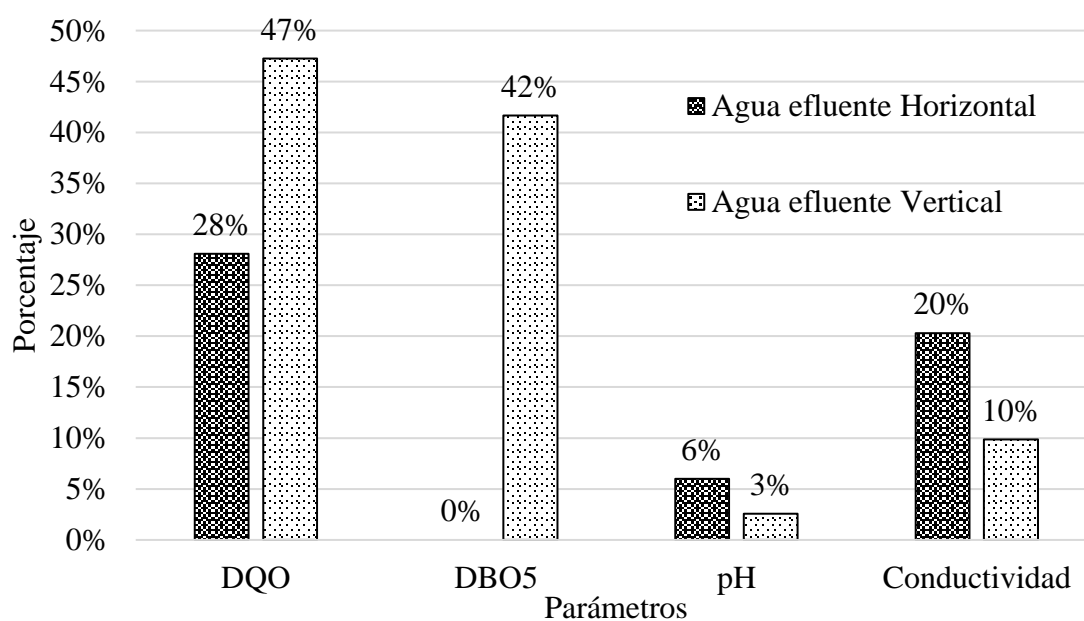


Figura 6. Porcentaje de remoción de DQO, DBO5, pH, y Conductividad.

Nitrógeno Total. En el estudio se demostró que la remoción de N total por parte del humedal horizontal es mayor (14%) que la remoción del humedal vertical (10%) (Cuadro 1 y Figura 7). El nitrógeno total es la suma de nitrógeno orgánico, amoníaco, nitrato y gas nitroso. La remoción del nitrógeno total se debe a los procesos de transformación del mismo llevados a cabo por microorganismos como las bacterias nitrificantes y desnitrificantes (Nelson, 2014). Los resultados coinciden con los hallazgos de estudios previos en donde se señalan que los humedales horizontales son frecuentemente menos efectivos que los humedales verticales en la remoción del nitrógeno, debido a la baja nitrificación en agua saturada (Vymazal, 2010; Zurita et al., 2009).

Nitratos (NO_3) y Amonio (NH_4). Similar a los resultados del nitrógeno total, el promedio general de remoción de nitratos en el humedal vertical fue más alto (15%) que el removido en el humedal horizontal (1%) (Cuadro 1 y Figura 7). Asimismo, esta situación se repite para el caso de la remoción del amonio, en donde la remoción por parte del humedal vertical

es muy alta (67%) en comparación con la remoción del humedal horizontal (50%) (Cuadro 1 y Figura 7).

Nelson (2014) detalla que los nitratos y el amonio son tomados por la microflora existente en los humedales construidos. Los resultados fueron esperados debido a que los nitratos y el amonio son parte del nitrógeno total medido. En este sentido, los mismos principios de comportamiento y remoción dentro de los humedales construidos son aplicados a ambos parámetros químicos (Zurita et al., 2009).

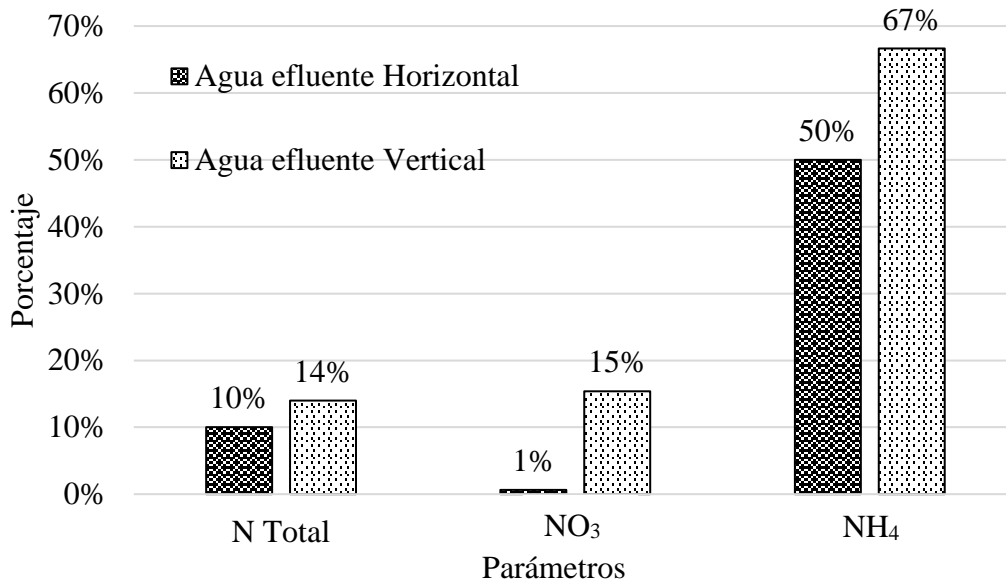


Figura 7. Porcentaje de remoción de N total, NO₃ y NH₄.

Fósforo Total. Las remociones de fósforo total por ambos humedales de estudio fueron nulas, ocurriendo una acumulación del 42 y 63% del fósforo total por parte del humedal vertical y horizontal, respectivamente (Cuadro 1). Delgadillo et al. (2010) argumentan que la remoción de fósforo ocurre principalmente como una consecuencia de tres procesos: la adsorción, complejización y reacciones de precipitación con Al, Fe, Ca y materiales arcillosos en la matriz del sustrato. Probablemente, la acumulación de fósforo se debió al tipo de material filtrante usado en los humedales construidos, el cual fue únicamente residuos de corcho de 2 - 3 mm de diámetro. Al parecer los sitios de adsorción del corcho se saturaron con otros contaminantes como son los metales pesados o los pesticidas. En este contexto, una manera de incrementar la tasa de remoción del fosforo total puede ser la implementación de medios filtrantes que incorporen agregados de arcilla ligeros (EPA, 1993).

Metales pesados. Los análisis estadísticos demuestran que existió una diferencia significativa en la remoción de cobre entre ambos humedales ($P = 0.046$) (Cuadro 2). En el caso del níquel, el humedal horizontal remueve en un 88%, mientras que el humedal vertical remueve en un 78%. Para el caso del cobre, solo el humedal horizontal resulta ser eficiente

en la remoción del mismo, ya que logró una remoción del 91%, en comparación con una remoción del 36% por parte del humedal vertical (Cuadro 1 y Figura 8).

Al parecer, el pH cercano a 8 de los efluentes de los dos tipos de humedales tuvo una influencia muy positiva en la remoción del níquel y cobre, el cual fue superior al 88 y 91% en el humedal horizontal y vertical, respectivamente (Figura 8). Esto difiere de los resultados hallados por las UNESCOSOST (2016b) que reportó una remoción del 68% de níquel a un pH de 7 con partículas de corcho de 2 - 3 mm de diámetro. Probablemente, una alta remoción de metales pesados se alcanza en medios básicos.

Los resultados son similares a los presentados en estudios de remoción de cromo (Cr) del agua por medio de residuos de corcho, en donde existió una remoción del 97% con partículas de corcho de diámetro menor a 0.008 mm, ya que, a menor tamaño de partícula, mayor es la superficie de contacto total (Sfaski et al., 2013). Asimismo, se observa que el metal pesado adsorbido en mayor proporción es el cobre con un porcentaje del 91%. Esto puede deberse a que la adsorción está influenciada directamente por la afinidad de un biomaterial a cada metal. En el caso del corcho, este tiene una alta afinidad al cobre (Silva, Vilar, Botelho y Boaventura, 2012).

La adsorción de ambos metales ocurre por una reacción de intercambio catiónico, en donde los iones metálicos con cargas positivas se unen a los sitios negativamente cargados en la superficie del material adsorbente, como es el corcho (Delgadillo et al., 2010). En el caso particular del estudio, el material adsorbente empleado fue residuos de corcho de diámetro pequeño (2 - 3 mm), debido a su alta capacidad de adsorción de metales pesados (56.58%) (UNESCOSOT, 2012), a causa del contenido de ácidos grasos en la estructura química del corcho que lo convierten en un material muy adsorbente (Villaescusa et al., 2002).

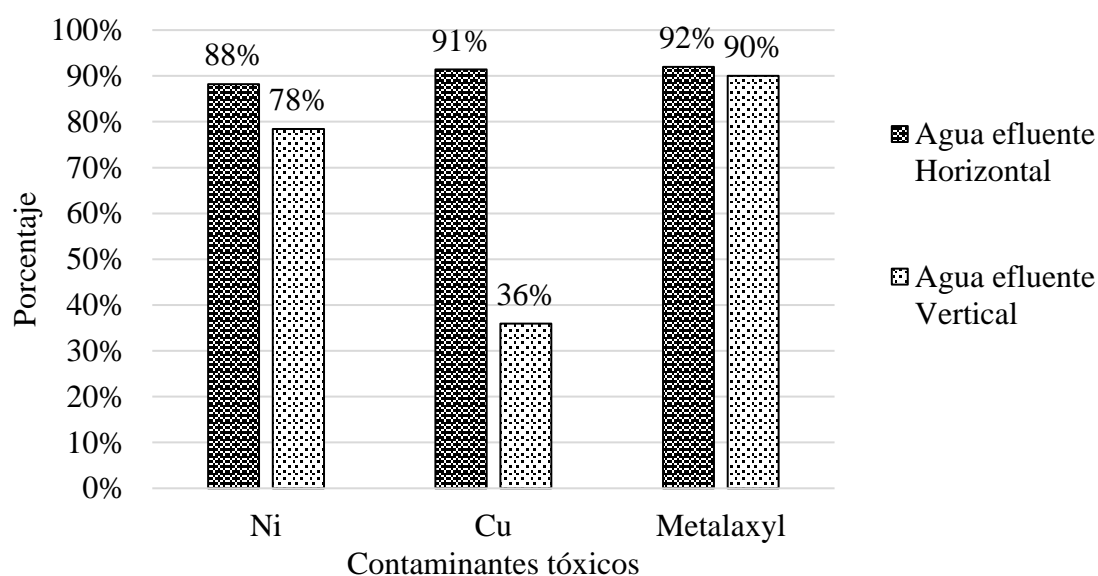


Figura 8. Porcentaje de remoción de Ni, Cu y Metalaxyl.

Metalaxyl. Los análisis estadísticos demuestran que no existió una diferencia significativa en la remoción del pesticida Metalaxyl entre ambos humedales ($P = 0.795$) (Cuadro 2). El humedal horizontal removió el fungicida en un 92%, mientras que el humedal vertical lo hizo en un 90% (Figura 8). Al igual que los metales pesados, los valores obtenidos en el agua efluente (Cuadro 1) están por debajo de los límites máximos de vertidos de aguas residuales en Cataluña para pesticidas totales, que es de $100 \mu\text{g/L}$. Estos resultados coinciden con los obtenidos a nivel de laboratorio por la UNESCOSOST (2012), la cual reportó una remoción por adsorción del 100% del pesticida Clorpirifós con partículas de corcho de 2 - 3 mm de diámetro. También, se asemeja al obtenido por Domínguez et al. (2005) que reportaron una adsorción del 80% del pesticida bifentrina con partículas de corcho de 1 - 2 mm.

Cuadro 2. Resultados de análisis estadístico de Prueba T para muestras independientes.

Parámetros	t	gl	Significancia (bilateral)
pH	-2.238	14	0.042
Conductividad	-2.557	14	0.034
Ni	-1.851	4	0.138
Cu	-2.861	4	0.046
Metalaxyl	-0.265	14	0.795

4. CONCLUSIONES

- Los humedales artificiales vertical y horizontal a escala piloto y rellenos con residuos de corcho de 2 - 3 mm de diámetro remueven contaminantes físico-químicos y metales pesados en aguas residuales vitivinícolas.
- El P total es el único contaminante químico que es acumulado por ambos humedales artificiales, siendo el humedal vertical el sistema con mayor acumulación en comparación que el humedal horizontal.
- El humedal vertical tiene una remoción mayor de DQO, DBO5, NO₃, y NH₄ en comparación con el humedal artificial horizontal que tiene una mayor remoción de pH, conductividad, y metales pesados (Ni y Cu). Asimismo, ambos humedales tienen una alta remoción del pesticida Metalaxyl.
- El humedal horizontal remueve los metales pesados (Ni y Cu) y el pesticida Metalaxyl por debajo de los límites máximos de vertidos de aguas residuales en Cataluña, a diferencia del humedal vertical que remueve únicamente el Ni y el pesticida Metalaxyl.

5. RECOMENDACIONES

- Instalar en la industria vitivinícola barcelonés, un sistema de tratamiento terciario con un humedal horizontal construido artificialmente, y relleno con residuos de corcho de 2 - 3 mm de diámetro, para el tratamiento secundario de sus aguas residuales. Además, agregar agregados de arcillas a los sistemas de humedales para dar solución a la acumulación de fósforo.
- Realizar tres muestreos a los parámetros DQO, DBO, P total, N total NO_3 y NH_4 , con el fin de obtener datos más exactos y efectuar un análisis estadístico que permita identificar si existen o no diferencias significativas entre la remoción de los humedales vertical y horizontal.
- Desarrollar un estudio para determinar el efecto de distintas concentraciones de metales pesados y pesticidas en la viabilidad de poblaciones microbianas (biofilms) de humedales artificiales; con el propósito de identificar concentraciones máximas de metales pesados y pesticidas en aguas residuales que serán tratadas con humedales.
- Llevar a cabo un estudio que compare la eficiencia en la remoción de contaminantes físico-químicos, orgánicos y metales pesados presentes en aguas residuales vitivinícolas, entre humedales artificiales de flujo sub-superficial (vertical y horizontal) e híbridos; con un medio poroso constituido por capas de residuos de corcho de distinto diámetro.

6. LITERATURA CITADA

- Agencia Iberoamericana para la Difusión de la Ciencia y Tecnología. (2010). Los residuos de la industria vitivinícola resultan muy contaminantes. Salamanca, España: Agencia DICYT. Recuperado de: <http://www.dicyt.com/noticias/los-residuos-de-la-industria-vitivinicola-resultan-muy-contaminantes>
- Asociación de Defensa de la Naturaleza. (2002). *Las bodegas Marqués de Arinzano construyen una depuradora natural para el tratamiento del agua residual*. Cataluña, España: ADENA
- Bernal, F., Mosquera, D., Maury, H., Gonzales, D. Guerra, R., Pomare, A. y Silva, M. (2003). *Humedales artificiales para el tratamiento de las aguas residuales en la corporación universitaria de la Costa*, Trabajo presentado en Seminario Internacional sobre Métodos Naturales para el Tratamiento de Aguas Residuales (pp. 149-155). Ciudad de México, México: Universidad del Valle de México.
- Calheiros, C., Rangel, A. y Castro, P. (2007). Treatment of industrial wastewater with two-stage constructed wetlands planted with *Typha latifolia* and *Phragmites australis*. *Water Research*, 41 (8), pp. 1790-1798.
- Cátedra UNESCO de Sostenibilidad. (2012). *Uso del corcho como medio granular en humedales construidos de flujo subsuperficial. Valoración como adsorbente y para aumentar la capacidad de detoxificación del sistema*, pp. 12-18. Barcelona, España: Universidad Politécnica de Cataluña.
- Cátedra UNESCO de Sostenibilidad. (2016a). *Integrated and sustainable management of cork waste generated in the cork industry: Report on winery wastewater physicochemical characterization*. Barcelona, España: Universidad Politécnica de Cataluña.
- Cátedra UNESCO de Sostenibilidad. (2016b). *Integrated and sustainable management of cork waste generated in the cork industry: Adsorption capacity of cork waste determined*, pp. 9-12. Barcelona, España: Universidad Politécnica de Cataluña.
- Cátedra UNESCO de Sostenibilidad. (2017). REAGRITTECH. Regeneración y reuso del agua de escorrentía y de drenaje en terreno agrícola a partir de sistemas naturales combinados de tratamiento de aguas. Barcelona, España: *Cátedra UNESCO de Sostenibilidad*. Recuperado de: <http://www.unescosost.org/project/reagritech/>

- Chen, T., Kao, C., Yeh, T. y Chao, A. (2006). Application of a constructed wetland for industrial wastewater treatment: A pilot-scale study. *Chemosphere*, 64 (3), pp. 497-502.
- Condorchem. (2017). Ingeniería Ambiental. Tratamiento de aguas residuales en la industria del vino. Barcelona, España: *Condorchem envitech*. Recuperado el 10 de febrero de 2017, de Condorchem envitech: <http://blog.condorchem.com/tratamiento-de-aguas-residuales-en-la-industria-del-vino/>
- David, L. (1995). *A handbook of constructed wetlands*, pp. 13-14. Pensilvania, Estados Unidos: Agencia de Protección Ambiental.
- Delgadillo, O., Camacho, A., Pérez, L. y Andrade, M. (2010). *Depuración de aguas residuales por medio de humedales artificiales*, pp. 17-18. Cochabamba, Bolivia: Centro Andino para la Gestión y Uso del Agua (Centro AGUA).
- Domínguez, V., Alves, A., Cabral, M. y Deleure-Matos, C. (2005). Sorption behaviour of bifenthrin on cork. *Journal of Chromatography*, 1069 (1), pp. 127-132.
- Environmental Protection Agency. (1993). *Subsurface flow constructed wetlands for wastewater treatment: A technology assessment*, pp. 3-16. Washington, Estados Unidos: Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos de América.
- Fita, J., Quelart, R., Ferro, L. y García, J. (22 de junio de 2010). España es el tercer mayor productor de vino del mundo pese a tener la mayor superficie vitícola. *La Vanguardia*. Recuperado de: <http://www.lavanguardia.com/vida/20100622/53950279192/espana-es-el-tercer-mayor-productor-de-vino-del-mundo-pese-a-tener-la-mayor-superficie-viticola.html>
- Groudeva, V., Groudev, S. y Doycheva, A. (2001). Bioremediation of wasters contaminated with crude oil and toxic heavy metals. *International Journal of Mineral Processing*, 62 (1-4), pp. 293-299.
- Haberl, R. y Langergraber, G. (2001). *Constructed wetland technology*. *Minerva Biotecnológica*, 13 (2), pp. 123-134.
- International Business Machines. (2010). *Manual del usuario del sistema básico de IBM SPSS Statistics 19*. Nueva York, Estados Unidos: IBM Corporation.
- López, A, López, A. y León, E. (2015). *Assessment of organic matter removal during the treatment of stillage in a constructed wetland using Canna indica*, pp. 118-120. Guadalajara, México: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- Marín, J. y Correa, J. (2010). *Evaluación de la remoción de contaminantes en aguas residuales en humedales artificiales utilizando la Guadua angustifolia Kunth*. (Tesis de grado). Universidad Tecnológica de Pereira, Facultad de Tecnología, Colombia: Universidad Tecnológica de Pereira.

- Nelson, M. (2014). *Constructed wetlands to treat wastewater*, pp. 9-13. Montebelluna, Italia: Wastewater Garden.
- Rabat, J. (2016). *Análisis de los modelos de diseño de los sistemas naturales de depuración*. (Trabajo fin de máster). Universidad de Alicante, Escuela Politécnica Superior, España: Universidad de Alicante.
- Sfaski, Z., Azzouz, N. y Abdelwahab, A. (2013). Removal of Cr(VI) from water by cork waste. *Arabian Journal of Chemistry*, 7 (1), pp. 37-42.
- Silva, S., Vilar, V., Botelho, C. y Boaventura, R. (2012). Use of cork powder and granules for the adsorption of pollutants: A review. *Water Research*, 46 (10), pp. 3152-3166.
- Sultana, M., Akrotos, C., Vayenas, D. y Pavlou, S. (2015). Constructed wetlands in the treatment of agro-industrial wastewater: A review. *Hemijiska Industrija*, 69 (2), pp. 127-142.
- Universidad Politécnica de Cataluña. (2016). *Legislación vigente en Catalunya sobre vertidos de aguas residuales*, pp. 1-32. Barcelona, España: Universidad Politécnica de Cataluña.
- Ventosa, E., Clemente, R. y Pereda, L. (2011). *Gestión integral de residuos y análisis del ciclo de vida del sector vinícola. Generación y Gestión de Residuos del Sector*, pp. 4-10. Castilla y León, España: Oficina de Publicaciones Oficiales de las Comunidades Europeas.
- Villaescusa, I., Fiol, N., Cristiani, F., Floris, C., Lai, S. y Nurchi, V. (2002). Copper(II) and nickel(II) uptake from aqueous solutions by cork wastes: A NMR and potentiometric study. *Polyhedron*, 21 (14-15), pp. 1363-1367.
- Vymazal, J. (2010). Constructed wetlands for wastewater treatment. *Water*, 2 (3), pp. 530-549.
- Williams, J. (2011). Phytoremediation in wetlands ecosystems: Progress, Problems, and Potential. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 21 (6), pp. 607-635.
- Zurita, F., De Anda, J. y Belmont, M. (2009). Treatment of domestic wastewater and production of commercial flowers in vertical and horizontal subsurface-flow constructed wetlands. *Ecological Engineering*, 35 (5), pp. 861-869.

7. ANEXOS

Anexo 1. Legislación Vigente en Cataluña sobre vertidos de aguas residuales

Parámetros	Unidad	Límite Máximo Permisible
DQO	mg O ₂ /L	1500
DBO5	mg O ₂ /L	500
pH	un. pH	6 - 10
Temperatura	°C	40
Conductividad	Ms/cm	6
P Total	mg P/L	50
N Total	mg N/L	70
NO ₃	mg NO ₃ /L	50
NH ₄	mg NH ₄ /L	50
Ni	µg/L	50
Cu	µg/L	40
Pesticidas totales	ng/L	100

Fuente: Universidad Politécnica de Cataluña (2016)