**SIMPOSIO INTERNACIONAL DE INDUSTRIA**

**Título**

**Evaluación de la depuración de aguas oleosas mediante un humedal subsuperficial horizontal**

***Title***

**Assessment of oil wastewater depuration with a horizontal subsurface wetland**

Maira María Pérez Villar[mairapv@uclv.edu.cu](mailto:mairapv@uclv.edu.cu), Mayara Montiel Martín [mmontiel@uclv.cu](mailto:mmontiel@uclv.cu), Cristiam Alejandro Rodríguez Cis [crodriguez@uclv.cu](mailto:crodriguez@uclv.cu), Yaribey Mayusca González Roche [yaribeygr@uclv.edu.cu](mailto:yaribeygr@uclv.edu.cu)

Universidad Central ¨Marta Abreu¨ de Las Villas, Cuba.

**Resumen:**

En la presente investigación, se realizó la caracterización de las aguas residuales procedentes del fregado de equipos en el área de transporte de la Empresa Constructora de Vías Férreas (SOLCAR). Estas aguas residuales son transportadas por un canal pasando por una trampa de grasas, como tratamiento primario. La caracterización ofreció como resultado que las aguas residuales efluentes de dicho tratamiento primario no cumplen con el Límite Máximo Permisible Promedio (LMPP) según (NC, 27/2012) para los parámetros Demanda Química de Oxígeno y sólidos sedimentables, demostrándose que este sistema de tratamiento no es suficiente para la depuración de las aguas residuales. Se implementó un humedal subsuperficial como tratamiento secundario, lográndose el cumplimiento con el límite de vertimiento para todos los parámetros evaluados y obteniéndose eficiencias de remoción por encima del 85 %. Se realizó además el estudio cinético de la remoción de materia orgánica en el humedal, observándose un comportamiento cinético que se ajusta al modelo de saturación o Monod. Se obtuvieron las constantes cinéticas y de saturación para los 3 días evaluados, incrementándose su valor a medida que aumenta la carga orgánica emitida al humedal.

***Abstract:***

In the present research, the characterization of the wastewater from the cleaning of automobile in the transport area of the Railway Construction Industry (SOLCAR) was carried out. These wastewaters are transported through a channel passing through a grease trap, as a primary treatment. The characterization offered as a result that the effluent wastewater from primary treatment does not comply with the Average Maximum Allowable Limit according to (NC, 27/2012) for the parameters Chemical Oxygen Demand and settlements solids, demonstrating that this treatment system is not sufficient for the purification of the wastewater. A subsurface wetland was implemented as secondary treatment, achieving compliance with the discharge limit for all parameters evaluated and obtaining removal efficiencies above 85 %. It was also carried out the kinetic study of the organic matter removal in the wetland, being observed a kinetic behavior that adjusts to the saturation model or Monod. There were obtained the kinetic and saturation constants for the three days evaluated, increasing its value as the organic load emitted to the wetland increases.

**Palabras Clave:** aguas residuales oleosas, depuración, estudio cinético, humedal subsuperficial

***Keywords:*** oil wastewater, depuration, kinetic study, subsurface wetland

**1. Introducción**

El manejo inadecuado de las aguas residuales de origen urbano, industrial y agrícola ha incrementado la contaminación de los cuerpos receptores, por lo que la depuración de las mismas es una necesidad imperiosa de la sociedad moderna. Tratar el agua de uso industrial en el área donde se consume o utiliza, así como su adecuado tratamiento al final del proceso productivo es muy importante tanto para la salud y preservación de las especies como para que las comunidades alcancen un nivel satisfactorio de desarrollo sostenible ([Tejas et al., 2016](#_ENREF_44)).

El municipio de Placetas cuenta con una Empresa Constructora de Vías Férreas (SOLCAR), en la cual hay un área para el fregado de autos en el taller automotor. Producto a esto se generan aguas residuales oleosas con alto contenido de grasas, aceites e hidrocarburos. Actualmente estas aguas son transportadas por un canal pasando por una trampa de grasas como tratamiento primario, lo que no permite la depuración de las mismas por debajo del Límite Máximo Permisible Promedio según la norma cubana de vertimiento ([NC, 27/2012](#_ENREF_33)). De acuerdo con lo anteriormente expuesto, resulta necesaria la búsqueda de soluciones para la implementación de un tratamiento secundario de bajo costo y elevada eficiencia, para ello, entre las alternativas más apropiadas se encuentran los humedales subsuperficiales.

Este método natural de tratamiento es de bajo costo, con empleo bajo o nulo de energía eléctrica, no requiere personal altamente calificado para su operación y mantenimiento y se adapta a las características del terreno. El empleo de la vegetación en los humedales permite que ocurran mecanismos de fitorremediación, los cuales actúan como filtros biológicos que pueden descomponer, estabilizar y absorber los contaminantes de las aguas residuales ([Carballeira et al., 2016](#_ENREF_7)).

En Cuba se han desarrollado diversas investigaciones sobre el empleo de humedales construidos de flujo subsuperficial para el tratamiento de aguas residuales, tanto domésticas como industriales; ([González et al., 2016](#_ENREF_14)); ([Pérez, 2013](#_ENREF_37)). Los resultados obtenidos demuestran que estos sistemas de tratamiento son eficientes y factibles cuando se emplean como tratamiento secundario o terciario, obteniendo elevadas eficiencias de remoción de la mayoría de los contaminantes, por lo que el objetivo de este trabajo es evaluar la depuración de los contaminantes en un humedal subsuperficial como tratamiento secundario de las aguas residuales generadas en la planta de fregado de autos de SOLCAR

**2. Metodología**

**2.1 Caracterización de las aguas residuales efluentes del sistema de tratamiento primario (trampa de grasas)**

La caracterización del agua residual efluente del sistema de tratamiento primario se realizó mediante muestras compuestas proporcionales al flujo a la salida de la trampa de grasas durante tres días (Figura 1), dichas muestras fueron tomadas manteniendo el tiempo entre muestras constantes (30 minutos) y el volumen proporcional al flujo en ese momento, durante 4 horas, en diferentes horarios. El muestreo se realizó según ([INRH, 2004](#_ENREF_17)).



**Punto de Muestreo**

**Punto de Muestreo**

Figura 1. Punto de muestreo a la salida de la trampa de grasas

Los ensayos fueron realizados según los métodos estándar para aguas y aguas residuales ([APHA, 2005](#_ENREF_2)). Los procedimientos analíticos empleados son reportados en la Tabla 2.1. No se realizó análisis de los nutrientes por las características de estas aguas residuales, las que presentan elevada carga orgánica y bajo contenido de nutrientes, corroborado en caracterizaciones realizadas anteriormente por la entidad.

Tabla 1. Métodos analíticos empleados

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Determinación | Símbolo | Unidades | Método Empleado |
| Potencial de hidrógeno | pH | U de pH | Método electrométrico |
| Conductividad Eléctrica | CE | µS/cm | Método electrométrico |
| Demanda Química de Oxígeno | DQO | mgO2/L | Método dicromato |
| Sólidos Sedimentables | SS | mL/L | Cono |
| Sólidos Suspendidos Totales | SST | mg/L | Método gravimétrico |
| Grasas, Aceites e Hidrocarburos | GAH | mg/L | Partición gravimétrica con n-hexano |

**2.2. Evaluación de la remoción de contaminantes en el humedal**

Para evaluar la depuración del agua residual en el humedal se tomaron muestras compuestas a la salida de la trampa de grasas (entrada al humedal) y a la salida del humedal (Figura 2 y 3), fueron tomadas, manteniendo el tiempo entre muestras constantes (15 minutos) y el volumen proporcional al flujo durante 5 horas, de forma tal que se barriera el tiempo comprendido entre las 9 am y las 2 pm. El muestreo se realizó según ([INRH, 2004](#_ENREF_17)). Los parámetros y métodos analíticos empleados fueron los descritos en el acápite 2.1 para la caracterización del agua residual efluente de la trampa de grasas.

Figura 3. Punto de muestreo del agua residual efluente al humedal

Figura 2. Punto de muestreo del agua residual afluente al humedal

**2.3. Evaluación del comportamiento cinético de la remoción de materia orgánica en el humedal implementado**

Se procedió a realizar el estudio cinético de la remoción de materia orgánica, a través del ensayo de DQO, teniendo en cuenta que con este ensayo se determina tanto la materia orgánica biodegradable como la no biodegradable y la mayor facilidad y confiabilidad de dicho ensayo con respecto a la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO). La evaluación cinética de la remoción de materia orgánica en el humedal se realizó en tres días correspondientes a los meses de enero, febrero y marzo de 2020, donde ya existía un desarrollo adecuado de la vegetación en el humedal, se tomó el valor de temperatura promedio en cada día evaluado. El experimento se realizó con un flujo de agua residual discontinuo, se determinó la concentración de DQO en el agua residual afluente al humedal y en el agua residual efluente del humedal a diferentes tiempos de retención, se tomaron muestras de agua residual efluente a 1, 3, 5, 9 y 24 horas, respectivamente.

**3. Resultados y discusión**

**3.1. Caracterización de las aguas residuales efluentes del sistema de tratamiento primario instalado actualmente en el taller automotor**

Según lo establecido en la Norma Cubana Obligatoria ([NC, 27/2012](#_ENREF_33)) para las descargas en el cuerpo receptor Clase A, el agua residual efluente no cumple con el límite de vertimiento para la DQO y los Sólidos Sedimentables (Tabla 2). Estos resultados están en correspondencia con el sistema de tratamiento existente actualmente en la entidad que consta de un sistema de trampa de grasas, lo que no permite la eliminación de la materia orgánica disuelta, la cual necesita de un tratamiento secundario. En cuanto a los sólidos sedimentables, está determinado principalmente por el polvo que se arrastra en la escorrería del agua lluvia, aunque estos valores son bajos, no cumple con la norma por la rigurosidad de la misma con el cuerpo receptor A, que tributa a fuentes de abasto de agua a la población.

Tabla 2. Caracterización del agua residual efluente de la trampa de grasas (n=3)

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Determinación analítica | Promedio | Desviación estándar (DE) | Coeficiente de variación (CV) | LMPP NC-27:2012 |
| pH (u) | 7,66 | 0,16 | 2,1 | 6,5-8,5 |
| CE (µS/cm) | 790,7 | 20,7 | 2,6 | 1400 |
| Sólidos Sedimentables (mL/L) | **3,1** | **0,5** | **16,1** | 1 |
| Sólidos Suspendidos Totales (mg/L) | 0,045 | 0,006 | 13,3 | - |
| DQO (mgO2/L) | **205,1** | **34,6** | **16,9** | 70 |
| Grasas, Aceites e Hidrocarburos (mg/L) | < 10 | - | - | 10 |

**3.2 Eficiencia de remoción del humedal como tratamiento secundario**

Se observa una disminución de la concentración de los contaminantes en el humedal desde los primeros cuatro meses de su puesta en funcionamiento (Tabla 3), lográndose el cumplimiento con el límite de vertimiento según ([NC, 27/2012](#_ENREF_33)) para cuerpo receptor A en todos los parámetros analizados.

Tabla 3 Caracterización del agua residual afluente y efluente del humedal a los cuatro meses de su puesta en funcionamiento, febrero 2019 (n=3)

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Determinación analítica | Promedio Afluente | DE | CV | Promedio Efluente | DE | CV | LMPP NC-27:2012 |
| pH (u) | 6,8 | 0,02 | 0,3 | 7,6 | 0,04 | 0,5 | 6,5-8,5 |
| CE (µS/cm) | 931,7 | 5,5 | 0,6 | 907,0 | 7,5 | 0,8 | 1400 |
| Sólidos Sedimentables () | **3,3** | **0,3** | **9,1** | **0,2** | **0,03** | **15,0** | **1** |
| Sólidos Suspendidos Totales (mg/L) | 0,4 | 0,02 | 5,0 | 0,04 | 0,003 | 7,5 | - |
| DQO (mgO2/L) | **192,4** | **2,2** | **1,1** | **18,2** | **1,0** | **5,5** | **70** |
| Grasas, Aceites e Hidrocarburos (mg/L) | < 10 | - | - | < 10 |  |  | 10 |

Se observa una disminución de la concentración de los contaminantes en el humedal desde los primeros cuatro meses de su puesta en funcionamiento (Tabla 3), lográndose el cumplimiento con el límite de vertimiento según ([NC, 27/2012](#_ENREF_33)) para cuerpo receptor A en todos los parámetros analizados.

Los resultados obtenidos después de un año de funcionamiento (Tabla 4) muestran una mayor concentración de DQO en el agua residual efluente, pudiendo estar determinado por el incremento de la concentración de este contaminante en el agua residual afluente al humedal. A pesar de la carga orgánica más elevada en esta agua residual a tratar, el sistema de tratamiento logra la disminución de todos los parámetros por debajo del Límite Máximo Permisible Promedio según la ([NC, 27/2012](#_ENREF_33)). Estos resultados están de acuerdo con lo planteado por diferentes autores sobre la capacidad de los humedales subsuperficiales para adaptarse a variaciones de caudal y carga contaminante ([Delgadillo et al., 2010](#_ENREF_10)) ([González et al., 2016](#_ENREF_39)).

**Tabla 4** Caracterización del residual afluente y efluente del humedal al año y cuatro meses de su puesta en funcionamiento, febrero 2020 (n=3)

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Determinación analítica | Promedio Afluente | DE | CV | Promedio Efluente | DE | CV | LMPP NC-27:2012 |
| pH (u) | 6,6 | 0,03 | 0,5 | 7,7 | 0,01 | 0,1 | 6,5-8,5 |
| CE (µS/cm) | 945,4 | 8,5 | 0,9 | 851,3 | 8,9 | 1,0 | 1400 |
| Sólidos Sedimentables () | **5,2** | **0,8** | **15,4** | 0,2 | 0,02 | 10,0 | **1** |
| Sólidos Suspendidos Totales (mg/L) | 0,8 | 0,05 | 6,3 | 0,03 | 0,0025 | 8,3 | - |
| DQO (mgO2/L) | **460,8** | **24,1** | **5,2** | 64,0 | 5,0 | 7,8 | **70** |
| Grasas, Aceites e Hidrocarburos(mg/L) | < 10 |  |  | < 10 |  |  | 10 |

Se obtuvieron eficiencias de remoción por encima del 85 % para todos los parámetros evaluados (Tabla 5). A los cuatro meses de la puesta en funcionamiento, ya existía un grado de desarrollo de las plantas si se compara con el humedal recién sembrado, lo que permite las eficiencias de remoción alcanzadas. A pesar del incremento de la carga contaminante al año de la puesta en funcionamiento, se obtienen eficiencias de remoción por encima del 85 % para los contaminantes evaluados, las que están en correspondencia con las reportadas por diferentes autores para humedales subsuperficiales como tratamiento secundario ([Harouiya et al., 2011](#_ENREF_16)). Estos resultados muestran las ventajas de estos métodos naturales de tratamiento en la remoción de compuestos orgánicos, los que son removidos por la combinación de procesos físicos químicos y biológicos entre las plantas, el sustrato y los microorganismos, siendo la degradación microbiana el mecanismo de remoción fundamental reportado por la mayoría de los autores ([Lee et al., 2010](#_ENREF_27)).

Tabla 5. Eficiencias de remoción obtenidas en el humedal

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Parámetro | Eficiencia remoción (%)Febrero/2019 | Eficiencia remoción (%) Febrero/2020 |
| Sólidos Sedimentables () | 94,3 | 96,2 |
| Sólidos Suspendidos Totales (mg/L) | 91,2 | 96,1 |
| DQO (mgO2/L) | 89,9 | 86,1 |

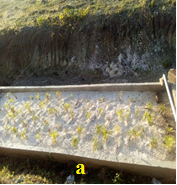


Figura 4. Humedal subsuperficial, (a) recién plantado, (b) cuatro meses (c) un año y cuatro meses

**3.3. Comportamiento cinético de la remoción de materia orgánica en el humedal implementado**

Se procede a realizar el estudio cinético de la remoción de materia orgánica, a través del ensayo de DQO, en el humedal. Los valores de DQO en los tres días analizados se muestran en la Tabla 6, observándose la variabilidad en la carga orgánica emitida en los diferentes días evaluados. Debido a esto se realiza el análisis del comportamiento cinético en los tres días evaluados por separados.

Tabla 6. Valores de DQO en el tiempo a los tres días evaluados

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Tiempo (horas) | DQO (mg/L) | | | |
| **15-01-2020** | | **20-02-2020** | **17-03-2020** |
| 0 | 739,20 | | 316,80 | 326,40 |
| 1 | 140,80 | | 115,20 | 134,40 |
| 3 | 132,00 | | 96,00 | 124,80 |
| 5 | 96,80 | 86,40 | | 105,60 |
| 9 | 79,20 | 76,80 | | 86,40 |
| 24 | 52,80 | 67,20 | | 72,00 |

En el tratamiento del agua residual con el humedal subsuperficial se produce una disminución de la DQO (Tabla 6) desde la primera hora de tiempo de retención, demostrando la efectividad de este sistema natural de tratamiento para la remoción de materia orgánica. Sin embargo para lograr valores de DQO en el agua residual efluente por debajo del límite de vertimiento se necesita un tiempo de retención del agua residual en el humedal de 24 horas, aproximadamente un día, lo que se corresponde con el calculado en el diseño, a pesar del incremento de la carga orgánica del agua residual, lo que está en correspondencia con lo planteado por ([Liang et al., 2017](#_ENREF_28)) acerca de la posibilidad de los humedales subsuperficiales de adaptarse a las variaciones de caudal y carga contaminante.

Se realizó el ajuste de estos datos determinados experimentalmente a los modelos cinéticos más reportados ([Mitchell and Mcnevin, 2001](#_ENREF_31)) ([Reed and Crites, 1995](#_ENREF_38)) para la remoción de contaminantes mediante humedales subsuperficiales.

1. Modelo de primer orden: es el modelo más utilizado para estimar la remoción de los contaminantes en estos sistemas.
2. Modelo de orden cero: se reporta principalmente para altas concentraciones de los contaminantes en el agua residual.
3. Modelo de saturación o Monod: según diferentes autores ([Mitchell and Mcnevin, 2001](#_ENREF_31)) puede explicar el comportamiento cinético de primer orden para bajas concentraciones y de cero orden para altas concentraciones.

Se obtuvo un mejor ajuste al modelo de Saturación o Monod para los tres días evaluados.. Este modelo es el modelo típico reportado para humedales subsuperficiales ([Reed and Crites, 1995](#_ENREF_38)), ([Mitchell and Mcnevin, 2001](#_ENREF_31)) y ([Vymazal, 2005](#_ENREF_48) ). A pesar del incremento en la carga orgánica al humedal en el primer día evaluado, se observa un comportamiento cinético similar, lo que está en correspondencia con lo planteado acerca de la capacidad de estos sistemas de tratamiento de adaptarse a las variaciones de caudal y carga contaminante.

Las constantes obtenidas para la remoción de DQO con el modelo de saturación o Monod a los tres días evaluados se reportan en la Tabla 7. Se observa una variación en los valores de las constantes en dependencia fundamentalmente del incremento en la carga orgánica emitida hacia el humedal en la evaluación realizada en el mes de enero, la cual duplicó el valor de DQO del resto de los días evaluados. Estos resultados permiten el diseño de humedales subsuperficiales en dependencia de la carga orgánica del agua residual a depurar.

Tabla 7. Constantes obtenidas por el modelo de saturación a 30 °C

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| DQO | 15-01-2020 | 20-02-2020 | 17-03-2020 |
| Constante de Saturación (K) mg/L | 32,26 | 222,22 | 204,08 |
| Constante cinética (k) mg L-1h-1 | 0,12 | 4,8 | 5,39 |

**4. Conclusiones**

1. Las aguas residuales efluentes del sistema de tratamiento primario (Trampa de grasas) de la Empresa Constructora de Vías Férreas no cumplen con la norma de vertimiento en los parámetros de DQO y Sólidos Sedimentables.
2. Con la implementación del humedal subsuperficial horizontal de 12 m2 de área, después del sistema de trampa de grasas, se logra la remoción de los contaminantes por debajo del límite de vertimiento.
3. El humedal subsuperficial mostró eficiencias de remoción de sólidos superiores al 90 % y de materia orgánica por encima del 85 %, en el período evaluado.
4. La remoción de materia orgánica en el humedal mostró el mejor ajuste al modelo cinético de Saturación o Monod, obteniéndose las constantes cinéticas y de Saturación para diferente carga contaminante, lo que permiten el diseño de humedales subsuperficiales horizontales para las condiciones climáticas en las que fueron obtenidas.
5. **Referencias bibliográficas**
6. APHA 2005. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater,* Washington, DC, USA, American Public Health Association.
7. CARBALLEIRA, T., RUIZ, I. & SOTO, M. 2016. Effect of plants and surface loading rate on the treatment efficiency of shallow subsurface constructed wetlands. *Ecological Engineering,* 90.
8. DELGADILLO, O., CAMACHO, A., L.PÉREZ & ANDRADE, M. 2010. *Depuración de aguas residuales por medio de humedales artificiales,* Cochabamba – Bolivia, Centro Andino para la Gestión y Uso del Agua (Centro AGUA).
9. GONZÁLEZ, M. R., PÉREZ VILLAR, M. M. P., MARTINEZ NODAL, P. M. & MORALES, Y. D. 2016. Humedales subsuperficiales horizontales en la depuración de aguas oleosas. Cinética de remoción de DQO. *Afinidad,* 73**,** 293-297.
10. HAROUIYA, N., RUE, S. & LIENAR, A. 2011. Phosphorus removal by apatite in horizontal flow constructed wetlands for small communities: pilot and full-scale evidence. *Water Science and Technology,* 63**,** 1629-1637.
11. INRH 2004. Procedimiento para la aplicación de la norma NC-27:1999. Vertimiento de aguas residuales a las aguas terrestres y al alcantarillado. Especificaciones.
12. LEE, K., DRIZO, S. & RIZZO, A. 2010. Evaluating the efficiency and temporal variation of pilot-scale constructed wetlands and steel slag phosphorus removing filters for treating dairy wastewater. *Water Research,* 44**,** 4077-4086.
13. LIANG, Y., ZHU, H., BAÑUELOS, G., ZHOU, B. Y. & CHENG, Q. 2017. Constructed wetlands for saline wastewater treatment. *Ecological Engineering,* 98**,** 27-285.
14. MITCHELL, C. & MCNEVIN, D. 2001. Alternative analysis of BOD removal in subsurface flow constructed wetlands employing monod kinetics. *Water Research,* 35**,** 1295-1303
15. NC 27/2012. Vertimiento de aguas residuales a las aguas terrestres y al alcantarillado. Especificaciones. Oficina Nacional de Normalización. La Habana.
16. PÉREZ, M. 2013. *Evaluación del Comportamiento de Humedales Subsuperficiales de Flujo Vertical en la Purificación de Aguas Residuales Domésticas.* Tesis de doctorado, Universidad Central "Marta Abreu" de las Villas.
17. REED, S. & CRITES, R. 1995. *Natural Systems for Waste Management and Treatment,* New York, Mcgraw Hill.
18. TEJAS, R. G., KIDO, J. M., ANTUNEZ, G. R. & SALGADO, M. S. 2016. Contaminación del agua. *Revista de Ciencias Ambientales y Recursos Naturales,* Vol.2.
19. VYMAZAL, J. 2005 Horizontal sub-surface flow and hybrid constructed wetlands systems for wastewater treatment. *Ecological engineering,* 25**,** 478-490.