

UNIVERSIDAD NACIONAL DE RIO CUARTO
FACULTAD DE AGRONOMIA Y VETERINARIA
SECRETARIA ACADEMICA

Trabajo Final presentado para Optar al Grado de Ingeniero Agrónomo

Modalidad: Proyecto

**Evaluación del comportamiento de humedales artificiales en
la depuración de aguas residuales urbanas**

Alumna: Ponzi, Juliana Vanesa

DNI 34272580

Director: Dr. Ing. Raúl Jesús Crespi

Río Cuarto, Córdoba

Noviembre de 2014

UNIVERSIDAD NACIONAL DE RÍO CUARTO
FACULTAD DE AGRONOMÍA Y VETERINARIA



CERTIFICADO DE APROBACIÓN

Título del Trabajo Final: **Evaluación del comportamiento de humedales artificiales en la depuración de aguas residuales urbanas**

Autora: Ponzi, Juliana Vanesa.

DNI: 34.272.580

Director: Dr. Ing. Raúl Crespi

Aprobado y corregido de acuerdo con las sugerencias de la Comisión Evaluadora:

(Nombres)

Fecha de Presentación: ____/____/____.

Secretario Académico

Dedicatoria

A Dios por haberme permitido llegar hasta este punto y haberme dado la salud para completar este ciclo de mi vida.

A mis padres, Marcela y Néstor, por los valores que me inculcaron y por ser el pilar básico de todo lo que soy; a mis hermanos por su incondicional apoyo en todo momento.

A mis abuelos y a Guillermo, por trasmitirme mucha fuerza a través de sus palabras para no abandonar nunca este sueño.

A Ezequiel, Juan Pablo y Sabina por ser parte de este trayecto recorrido y por acompañarme en cada paso para llegar a mi meta.

Agradecimiento

A la Universidad Nacional de Río Cuarto como institución misma, y a los docentes por brindar conocimiento y capacitación.

De manera especial a Raúl, por ser mi guía, por darme la posibilidad de compartir con él este proyecto y poner todo de sí mismo para que se logre, a pesar de los obstáculos.

A Matías y Tito por todo el trabajo, la compañía y el apoyo brindado a lo largo de la realización del proyecto.

A mis amigos y compañeros Ian, Ezequiel, Facundo, Sabina, Laura, Juan Pablo, Federico y Nicolás por estar siempre atentos para colaborar.

A Sabrina Giménez, Marcelo Arana y Antonia Ogero por su colaboración en la identificación de las especies utilizadas en este proyecto.

A todos aquellos que participaron directa o indirectamente en la elaboración de la tesis.

¡Muchas Gracias!

INDICE
ÍNDICE GENERAL

Contenido	Pág.
RESUMEN	X
SUMMARY	XI
I- INTRODUCCIÓN.....	1
II- ANTECEDENTES.....	3
2.1. Humedales naturales	4
2.2. Humedales artificiales.....	4
2.3. Tipos de Humedales artificiales.....	4
2.3.1. Sistema de flujo superficial (FSL) ó FWS (Surface flow wetlands)	4
2.3.2. Sistema de flujo subsuperficial o SFS (Subsurface flow wetlands)	5
2.3.3. Sistema de Filtros mediante Macrófitas en Flotación (FMF)	5
2.4. Principales Componentes de los humedales artificiales	5
2.4.1 Sustrato.....	5
2.4.2 Vegetación.....	6
2.4.2.1 Junco (<i>Schoenoplectus californicus</i>).....	6
2.4.2.2 Lemna o Lenteja de Agua (<i>Lemna minor K.</i>).....	7
2.4.3 Agua Residual.....	8
2.4.3.1 Características Químicas del Agua Residual.....	8
2.4.3.2 Características Físicas de las Aguas residuales	10
2.4.3.3 Características Biológicas de las Aguas residuales	11
2.5. Mecanismos de remoción de los Humedales artificiales	12
2.6. Rendimiento de los humedales	13
III- Hipótesis y Objetivos	14
3.1. HIPÓTESIS	14
3.2. OBJETIVOS	14
3.2.1 Generales	14
3.1.2 Específicos.....	15
IV- MATERIALES Y MÉTODOS.....	15
4.1. Descripción del experimento	15

4.2. Diseño Experimental.....	18
4.3. Diseño y Construcción de los humedales.....	20
4.4. Instalación del Sistema Hidráulico.....	24
4.5. Implantación y Siembra de la Vegetación.....	25
4.6. Seguimiento del Proyecto.....	27
4.7. Muestreo	30
V- RESULTADOS Y DISCUSIÓN	32
5.1. Evaluación de parámetros físico-químicos y biológicos.....	32
5.2 . Análisis estadístico	40
5.2.1. SST	40
5.2.2. Materia orgánica	41
5.2.3. Microorganismos patógenos	43
5.2.4. Nutrientes	44
VI- CONCLUSIONES	46
VII- BIBLIOGRAFÍA.....	47
VIII - ANEXO.....	53

INDICE DE TABLAS

N° Tabla	Pág.
Tabla 1. Mecanismos de remoción de contaminantes en humedales artificiales.	13
Tabla 2. Asignación de tratamientos a los humedales.	19
Tabla 3. Evaluación, resumen de medidas y remoción de SST.	33
Tabla 4. Evaluación, resumen de medidas y remoción de SSed.	34
Tabla 5. Presencia, resumen de medidas y remoción de coliformes totales y fecales.	35
Tabla 6. Evaluación de la carga orgánica, eficiencia de remoción y resumen de medidas.	36
Tabla 7. Evaluación del contenido de fósforo total, su remoción y resumen de medidas.	37
Tabla 8. Evaluación del contenido de Nt, su remoción y medidas resumen.	38
Tabla 9. Medición de T° C, pH y CE durante 4 días y sus medidas resumen.	39

INDICE DE FIGURAS

N°	Pág.
Figura 1. Elección del terreno dentro del predio de la Planta Piloto de Tratamiento y Reutilización de Efluentes Urbanos de la UNRC.	15
Figura 2. Plano general y ubicación del ensayo. Planta Piloto de Tratamiento y Reutilización de Efluentes Urbanos de la UNRC.	16
Figura 3. Cámara receptora de efluentes Planta Piloto de Tratamiento y Reutilización de Efluentes Urbanos de la UNRC.	17
Figura 4. Canasto de prefiltrado y recipiente residuos peligrosos. Planta Piloto de Tratamiento y Reutilización de Efluentes Urbanos de la UNRC.	17
Figura 5. Tanque sedimentador de lodos. Planta Piloto de Tratamiento y Reutilización de Efluentes Urbanos de la UNRC.	18
Figura 6. Vista en perspectiva de la unidad experimental.	20
Figura 7. Perfil frontal del humedal.	20
Figura 8. Apertura de un surco con reja de grandes dimensiones en la Planta de Tratamientos y Reutilización de Efluentes Urbanos de la UNRC.	21
Figura 9. Actividades primarias realizadas en el predio experimental.	22
Figura 10. Relevamiento planialtimétrico de la línea de humedales.	22
Figura 12. Colocación de adoquines y base de arena.	23
Figura 11. Impermeabilización con PE de media densidad.	23
Figura 13. Red de tuberías y llave esférica de entrada de agua al humedal.	24
Figura 14. Red de tuberías de carga y descarga.	24
Figura 15. Población de juncos (<i>Schoenoplectus californicus</i>) y rizoma respectivo.	25
Figura 16. Acondicionamiento de los juncos para su posterior implantación	26
Figura 17. Procedimiento de instalación de los tutores hidráulicos.	26
Figura 18. Procedimiento de siembra de Lemnas (<i>Lemna minor K</i>).	27
Figura 19. Sistema de humedales establecido para evaluación.	27
Figura 20. Presentación de diferentes estados fenológicos de junco.	28
Figura 21. Época estival. Crecimiento exponencial del humedal.	28
Figura 22. Cosecha de <i>Lemna minor K</i> . en cada humedal manteniendo la cobertura.	29
Figura 23. Instalación de tanque estabilizador de presión.	30
Figura 24. Presentación de recipientes de toma de muestras.	30
Figura 25. Dispositivo para determinación de sólidos sedimentables.	31
Figura 26. Termorreator y multiparamétrico para determinación DQO, Nt y Pt.	31
Figura 27. Equipo de laboratorio para determinar sólidos suspendidos.	32

Figura 28. SSed recogido en cono Imohff en la Planta de Tratamiento y Reutilización de Efluentes de la UNRC.	34
Figura 29. Remoción de SST en humedales artificiales.	41
Figura 30. Remoción de DQO por medio de humedales artificiales.	42
Figura 31. Remoción de DBO ₅ en mgL-1 en humedales artificiales.	42
Figura 32. Remoción de coliformes totales por medio de humedales artificiales.	43
Figura 33. Remoción de coliformes fecales por medio de humedales artificiales.	44
Figura 34. Remoción de Nt por medio de humedales artificiales.	45
Figura 35. Remoción de Pt por medio de humedales artificiales.	46

INDICE DE ANEXOS

Nº	Pág.
Anexo 1. Tabla de Medidas resumen de los parámetros evaluados (InfoStat).	53
Anexo 2. Hipótesis utilizadas para la comprobación de Supuestos del ANOVA.	53
Anexo 3. Tabla resumen de resultados de la prueba Shapiro- wilk.	54
Anexo 4. Tabla de resultados del test de Levene para SST.	54
Anexo 5. Tabla de resultados del test de Levene para CT.	54
Anexo 6. Tabla de resultados del test de Levene para CF.	54
Anexo 7. Tabla de resultado del test de Levene para DQO.	55
Anexo 8. Tabla de resultados del test de Levene para DBO ₅ .	55
Anexo 9. Tabla de resultados del test de Levene para Pt.	55
Anexo 10. Tabla resultados del test de Levene para Nt.	55
Anexo 11. Resultado de Análisis estadístico univariado (ANOVA) de SST.	56
Anexo 12. Resultado de Análisis estadístico univariado (ANOVA) de DQO.	56
Anexo 13. Resultado Análisis estadístico univariado (ANOVA) de DBO ₅ .	56
Anexo 14. Resultado de Análisis estadístico univariado (ANOVA) de CT.	56
Anexo 15. Resultado de Análisis estadístico univariado (ANOVA) de CF.	57
Anexo 16. Resultado de Análisis estadístico univariado (ANOVA) de Nt.	57
Anexo 17. Resultado de Análisis estadístico univariado (ANOVA) de Pt.	57

LISTA DE SÍMBOLOS

CF= Coliformes fecales

CT= Coliformes totales

DBO= Demanda biológica de oxígeno

DBO₅= Demanda biológica de oxígeno transcurridos 5 días de reacción.

DQO= Demanda química de oxígeno

FMF= Sistema de filtros de macrófitas en flotación

FSL= Sistema de flujo superficial

FWS= Sistema de flujo superficial

N= Nitrógeno

NMP= Número más probable

Nt= Nitrógeno total

P= Fósforo

Pt= Fósforo total

SDT= Sólidos disueltos totales

SFS= Sistema de flujo subsuperficial

SSed= Sólidos sedimentables

SST= Sólidos suspendidos totales

TRH= Tiempo de residencia hidráulica

RESUMEN

El tratamiento de las aguas residuales urbanas, es un tema preocupante y de gran trascendencia a nivel mundial. El objetivo fundamental de este trabajo fue: evaluar la capacidad de remoción de contaminantes de los efluentes urbanos generados por la población estudiantil universitaria que reside en las Residencias Estudiantiles Universitarias (REU) pertenecientes a la Universidad Nacional de Río Cuarto (UNRC), bajo las condiciones ecológicas de la región de Río Cuarto (Córdoba, Argentina). A tal fin se diseñaron en 2012 en la Planta de Tratamiento y Reutilización de Efluentes Urbanos de esta Universidad seis humedales artificiales de flujo superficial (FSL) en los cuales se utilizaron dos especies vegetales: una flotante, llamada *Lemna* (*Lemna minor* k.) y otra emergente, llamada Junco (*Schoenoplectus californicus*), esta última se condujo con tutores hidráulicos para que se comportara como plantas flotantes. Las variables estudiadas fueron analizadas mediante el programa estadístico InfoStat utilizando un análisis estadístico univariado (ANOVA). Los resultados indican que el tratamiento híbrido conformado por *Lemnas* + Juncos (L + J), tuvo un mejor comportamiento, si se compara con el tratamiento conformado solo por *Lemnas* (L); ya que obtuvo mayor remoción en cuanto a SST (p= 0,0432), DBO₅ (p= 0,0051), CT (p=0,047), Nt (p= 0,0076) y Pt (p= 0,0158). En cambio, a la hora de remover CF (p= 0,2302) y DQO (p= 0,0826) ambos tratamientos se comportan de manera indistinta. Las eficiencias de remoción obtenidas fueron: 66 %, 95 %, 82 %, 60 %, 72 %, 67 %, 21 % y 9 % para SST, Ssed, CT, CF, DQO, DBO₅, Nt y Pt respectivamente. Estos resultados demostraron que los FSL constituyen una eficiente tecnología no convencional para el tratamiento de las aguas residuales urbanas.

Palabras claves: aguas residuales urbanas – tratamiento - humedales artificiales – plantas flotantes – planta piloto.

SUMMARY

The treatment of urban wastewater is a disturbing and far-reaching global issue. The main objective of this experience was: to evaluate the pollutant removal capability of urban effluents generated at the National University of Río Cuarto, under the ecological conditions of the region of Río Cuarto (Cordoba, Argentina). To this end, were designed in 2012 in the Treatment and Reuse Plant of Urban Effluent of this University, six Free Water Surface (FWS) wetlands in which two plant species were used: a floating, called Lemna (*Lemna minor k*) and other emerging, called Junco (*Schoenoplectus californicus*), the latter acted with hydraulic tutors to behave like floating plants. The variables were analyzed using the statistical program InfoStat using univariate statistical analysis (ANOVA). The results indicate that the hybrid formed by treatment Juncos Lemnas + (L + J) had a better performance as compared with forming only by Lemnas treatment (L); since gained further removal on Total Suspended Solids (TSS), ($p = 0.0432$), Biochemical Oxygen Demand (BOD_5) ($p = 0.0051$), Total Coliforms (TC) ($p = 0.047$), Total Nitrogen (TN), ($p = 0.0076$) and Total Phosphorus (TP), ($p = 0.0158$). However, when removing Fecal Coliforms (FC) ($p = 0.2302$) and Chemical Oxygen Demand (COD), ($p = 0.0826$) behave both treatments interchangeably. Removal efficiencies obtained were 66%, 95%, 82%, 60%, 72%, 67%, 21% and 9% for TSS, SSed, TC, FC, COD, BOD_5 , TN and TP respectively. These results demonstrated that FWS is an efficient technology for unconventional treatment of urban wastewater.

Keywords: urban wastewater - treatment - artificial wetlands - floating plants - pilot plant.

I- Introducción

El incremento de la población ejerce una presión sobre el agua y los alimentos cada vez mayor (Esteves y Faleschini, 2011); por otra parte, la disponibilidad del agua se encuentra cada día más limitada, producto de su contaminación física-química y biológica (Romero *et al*, 2009); en consecuencia, la provisión de agua representa uno de los mayores problemas con que se enfrentará la humanidad en un futuro inmediato.

Es evidente que en la actualidad se registra una creciente degradación de ríos, lagos y bahías que se han transformado de lugares con ecosistemas agradables a sitios con olores putrefactos y ambientes no recomendables para la vida humana (Campos, 2005).

La contaminación del agua no sólo elimina parte de la vegetación y fauna autóctona acuática, sino que también ocasiona desequilibrios generalizados a todo el ecosistema terrestre que de estas masas de agua depende. El exceso de materia orgánica y nutrientes en el agua (nitrógeno y fósforo) conduce a la eutrofización, es decir, el agotamiento de oxígeno y la muerte de la mayoría de los seres vivos (Estrada, 2010).

Una de las respuestas más promisorias frente a esta contaminación, fue la puesta en marcha de programas que contemplan la Gestión Integral de los Recursos Hídricos, donde se otorga un importante valor al ciclo completo del agua, incluyendo el agua residual.

Por esto, es importante tomar conciencia que la disposición de residuos es un problema de todos los habitantes de cualquier comunidad, independientemente de su tamaño y que la puesta en marcha de nuevas instalaciones de tratamiento de aguas contaminadas depende básicamente -más allá de la capacidad técnica, económica y operativa- de una decisión institucional que involucre políticas explícitas al respecto tendientes a una planificación ecosistémica del agua a nivel nacional, provincial y local, a modo de optimizar la gestión de las actividades involucradas, que deben llevar implícito dos conceptos fundamentales: eficiencia y sostenibilidad (Crespi *et al*, 2005).

Los métodos naturales se presentan como una opción tecnológica sostenible para las pequeñas y medianas comunidades dada su alta eficiencia, bajos costos de operación, mantenimiento y fácil construcción. Además, el aprovechamiento de los efluentes de las plantas de tratamientos de agua, no solo representan una reserva de agua, sino también una fuente potencial de entrada de nutrientes, con beneficios económicos y ambientales (Bernal *et al*, 2003).

El interés en los sistemas naturales está basado en la conservación de los recursos asociados con estos sistemas como opuesto al proceso de tratamiento convencional de aguas residuales que es intensivo respecto al uso de energía y químicos (Chafloque y Gomez, 2006).

Entre estos sistemas naturales se encuentran los lagunajes y los humedales artificiales, que se caracterizan por ser reservorios de agua libre o suelos saturados, con un régimen laminar de circulación del agua ya sea de forma permanente o estacional.

La observación de la mejora en la calidad del agua en humedales naturales llevó al desarrollo de humedales artificiales para tratar de reproducir en ecosistemas construidos los beneficios de calidad del agua y hábitat (EPA, 2000).

En los últimos tiempos, entre las distintas Tecnologías no Convencionales existentes, los humedales artificiales son los que están experimentando un mayor grado de desarrollo e implementación, resultando una gran opción para obtener agua de buena calidad, debido principalmente a su elevada eficiencia en la reducción de materia orgánica, nutrientes y patógenos, lo que disminuye los posibles efectos adversos de los vertidos sobre los medios receptores (Moshiri, 1993).

Es indudable que los humedales artificiales son ecosistemas que pueden ser utilizados para el tratamiento de aguas residuales de una manera segura, confiable, estética y económica. La remoción de contaminantes es eficiente y no se invierte en el suministro de energía adicional para su funcionamiento (Romero *et al*, 2009). Además tienen una ventaja muy importante a la hora del manejo, que es la no producción de biosólidos que requieren tratamiento posterior y disposición final (Giacoman *et al*, 2010).

En base al diseño e instalación de una serie de humedales artificiales de agua libre con macrófitas acuáticas flotantes y emergentes que actuaron como flotantes, se trató de estudiar su comportamiento en lo que hace a la depuración de aguas residuales procedentes de una pequeña población de estudiantes de la UNRC, para tal fin, se programó una disposición estadística para evaluar la depleción de ciertos efectos contaminantes como SST, Ssed, DBO₅, DQO, Nt, Pt, CT y CF, pH y temperatura.

II- Antecedentes

La idea de utilizar el suelo como medio depurador de las aguas residuales procedentes de las ciudades data de la antigüedad clásica. El historiador griego Herodoto (484-425 A.C), dejó escrito, que en Babilonia, el agua residual, en lugar de evacuarla a un río se canalizaba en un sumidero donde decantaba y sedimentaba. Tras esta fase inicial de depuración, el agua, una vez liberada de las partículas más groseras, se filtraba en formaciones permeables.

Más de dos mil años tuvieron que transcurrir para que a finales del siglo XIX, específicamente en 1898, en Fresno Country (California), se retoma la idea de utilizar el suelo como elemento capaz de depurar el agua residual en forma eficaz (Merino *et al*, 2003).

Según Kadlec y Knight (1996) los primeros experimentos destinados a probar la capacidad de depuración de sistemas de humedales fueron llevados a cabo por Seidel en 1952, en el instituto Max Plank de Alemania. A partir de entonces y durante las décadas de 1950 y 1960 Seidel trabajó junto a Kickuth y desarrollaron el tratamiento conocido como “Root Zone Method”, que correspondió a un humedal de flujo subsuperficial relleno con arcilla.

En 1971 se inició el estudio de un humedal natural al que se le vertía un efluente secundario con el objetivo de evitar la eutrofización de un lago situado aguas abajo (Houghton Lake, Michigan) y a partir de 1972 se empezaron a estudiar otros humedales construidos de flujo superficial en Michigan, Florida y California que trataban efluentes secundarios.

El primer estudio de un humedal construido de flujo subsuperficial a escala real se realizó en 1974 en Wolverton, Mississippi. Este humedal, que fue diseñado siguiendo el modelo del Instituto Max Plank, sigue operativo al día de hoy y trata agua residual doméstica (Olmedilla *et al*; 2000).

Según estadísticas realizadas en 1991 en los Estados Unidos de América (USA) existen más de 200 humedales artificiales operativos que están tratando aguas residuales municipales, industriales y aguas de las industrias agroalimentarias. La mayoría de estas comunidades usa los humedales para el pulido de efluentes de laguna. Además, las comunidades en una amplia gama de tamaños utilizan esta tecnología, incluyendo las grandes ciudades como Phoenix, Arizona, y el Condado de Orange, Florida (Estrada, 2010).

Durante la última década, España ha impulsado el uso de tecnologías no convencionales (también denominadas extensivas o naturales) investigando la distribución del agua en humedales artificiales de flujo vertical y horizontal (Salas Rodríguez, 2010).

A pesar de sus beneficios, los humedales construidos no han sido utilizados con este fin en Argentina hasta la fecha (Dotro *et al*, 2010), pero dentro del Dominio subtropical, en

el Sistema Paraná- Paraguay merece destacarse la importancia que en la conservación de la biodiversidad desempeñan humedales antrópicos, como es el caso de los canales de irrigación de los arrozales (Schnack *et al*, 2000).

2.1. Humedales naturales

Los humedales naturales son medios semiterrestres con un elevado grado de humedad (Chafloque y Gómez, 2006), que permanecen inundados o saturados de agua un tiempo lo suficientemente prolongado (Beascochea *et al*, 2003) para que crezcan en él vegetales, animales y microorganismos especialmente adaptados a esas condiciones ambientales. Estos seres vivos junto a procesos físicos-químicos son capaces de depurar el agua eliminando grandes cantidades de materia orgánica, sólidos, nitrógeno, fósforo y en algunos casos productos químicos tóxicos. (Montoya y Ramirez, 2010). La alta productividad de estos sistemas da como resultado una alta biomasa microbiana y en consecuencia una alta capacidad de descomponer materia (Orozco, 2010).

2.2. Humedales artificiales

Un humedal artificial, es un sistema construido para el tratamiento de aguas residuales que consta de un estanque o cauce poco profundo, no más de 0.60 m, diseñado por el hombre (Frers, 2008). Consiste en el uso de plantas acuáticas flotantes, macrófitas emergentes, y sistemas con macrófitas emergentes en flotación (Beascochea *et al*, 2003), sobre un lecho de grava impermeabilizado (Delgadillo *et al*, 2010), para no contaminar los ecosistemas adyacentes (Zambrano *et al*, 2004), donde la depuración del agua ocurre por la interacción entre los componentes del humedal y los fenómenos físicos, químicos y biológicos dentro del humedal, con la intervención del sol como fuente principal de energía (Arias y Brix, 2003).

2.3. Tipos de Humedales artificiales

Las clasificaciones más recientes de humedales se hacen en función de la presencia o ausencia de una superficie de agua libre en contacto con la atmósfera (Lahora, 2003) y/o el tipo de vegetación presente (EPA, 2000):

2.3.1. Sistema de flujo superficial (FSL) ó FWS (Surface flow wetlands)

En el cual el nivel del agua está sobre la superficie del medio de soporte (Silva y Zamora, 2005) y la vegetación sembrada flota o está fija en el fango y emergiendo sobre la superficie del agua (Lara, 1999). En los humedales FLS el agua fluye sobre la superficie del suelo con vegetación desde un punto de entrada hasta el punto de descarga (EPA, 2000), y el

tratamiento se produce durante la circulación del agua a través de los tallos y raíces de la vegetación (Merino *et al*, 2003).

2.3.2. Sistema de flujo subsuperficial o SFS (Subsurface flow wetlands)

Más que el tipo de flujo, lo que realmente define al humedal SFS es que no hay, como tal, una columna de agua continua (Beascochea *et al*, 2003), sino que la circulación del agua es de tipo subterráneo a través de un medio granular (Serrano y Hernandez, 2008) ; donde la lámina de agua no es visible, y el flujo atraviesa un lecho relleno con arena, grava o suelo, donde crecen las plantas, que sólo tienen las raíces y rizomas en contacto con el agua (Estrada, 2010). El agua se puede mover tanto de forma horizontal como vertical a través de la zona radicular de las macrófitas (Beascochea *et al*, 2003).

2.3.3. Sistema de Filtros mediante Macrófitas en Flotación (FMF)

Su estructura y tipo de flujo es similar a los humedales FSL, en cuanto a que se trata de canales debidamente aislados, con flujo superficial. El rasgo diferencial más notable se refiere al manejo de la vegetación emergente como flotante (Beascochea *et al*, 2003). Este tipo de filtro es capaz de realizar un tratamiento secundario y terciario del agua residual, eliminando no solo la materia orgánica, sino también el fósforo y el nitrógeno (Beascochea y Fernandez, 2005). Al crecer flotando, estas especies forman una densa esponja de raíces y rizomas que ocupan todo el volumen de la laguna o canal, y obligan a que el agua circule por esta maraña de vegetación, que actúa a su vez como soporte de microorganismos que degradan la materia orgánica (Pozo, 2012).

2.4 Principales Componentes de los humedales artificiales

Los humedales artificiales consisten en el diseño correcto de una cubeta que contiene (Lara, 1999):

2.4.1 Sustrato

Sirve de soporte a la vegetación permitiendo la fijación de la población microbiana, que va a participar en la mayoría de los procesos de eliminación de los contaminantes (Alonso, 2013). Los sustratos incluyen suelo, arena, grava, roca y materiales orgánicos como el compost (Lara, 1999). La principal característica del medio es que debe tener la permeabilidad suficiente para permitir el paso del agua a través de él. Esto obliga a utilizar suelos de tipo granular, principalmente grava seleccionada con un diámetro de 5 mm aproximadamente (Delgadillo *et al*, 2010).

2.4.2 Vegetación

La vegetación proporciona superficies para la formación de películas bacterianas, facilita la filtración y la adsorción de los constituyentes del agua residual, permite la transferencia de oxígeno a la columna de agua y controla el crecimiento de algas al limitar la penetración de luz solar (Lara, 1999).

Las especies más utilizadas son macrófitas (Serrano y Hernández, 2008), pero en humedales artificiales se han ensayado varias posibilidades: lagunas con microalgas (lagunaje natural o aireado), macrófitas flotantes (Jacinto de agua, Lenteja de agua), macrófitas sumergidas y macrófitas emergentes (helófitos) (Navarro y Vásquez, 2004).

Un tipo especial de macrófitas son los helófitos, plantas capaces de arraigar en suelos encharcados o anegados, con una parte sumergida y otra emergente. Los helófitos más usados en depuración son (Lahora, 2003) las espadañas y aneas (*Typha* spp.), los juncos (*Scirpus* spp.) y los carrizos (*Phragmites* spp.) (EPA, 2000).

También las plantas flotantes se revelan como interesantes, por su remoción de fósforo y de nitrógeno ya que el crecimiento es muy rápido y su recolección relativamente fácil (Romero *et al*, 2009), una de ellas que recientemente se está utilizando es la planta acuática *Lemna* sp. (León y Chavez, 2010).

A pesar de las distintas especies usadas se ha comprobado que la tasa de remoción de la carga orgánica no está influenciada por la especie vegetal cultivada (De Matos *et al*. 2011) sino por el período de retención del humedal (Lara, 1999). Pero cada una de las especies puede crecer en situaciones particulares, por lo tanto la elección debe estar asociada a las condiciones de operación de los sistemas (Romero *et al*, 2009), el potencial de crecimiento (una área de vegetación densa es más efectiva para el tratamiento de contaminantes) la supervivencia, el costo de plantación y mantenimiento (Cardona y Vanegas, 2009).

En este estudio se han utilizado dos especies: junco (*Schoenoplectus californicus*) que es una planta macrófita emergente que actúa como flotante y otra flotante conocida como Lemna o lenteja de agua (*Lemna minor* K).

2.4.2.1 Junco (*Schoenoplectus californicus*)

Según Delgadillo *et al* (2010) el junco pertenece a la siguiente clasificación:

Familia: *Cyperaceae*

Género: *Schoenoplectus*

Especie: *Schoenoplectus californicus*

Nombre Vulgar: Junco

Se trata de una especie perenne, rizomatosa, que en su hábito natural se comporta principalmente como acuática helófito (Beascochea *et al*, 2003).

Posee un crecimiento retardado entre los meses de mayo a agosto debido a la presencia de heladas presentando, por lo tanto, una coloración amarillenta con tendencia a café, con características necróticas; mientras que en los meses de septiembre a diciembre, presenta un crecimiento normal, con características de rebrotes. Durante los meses de enero a abril presentan máximo desarrollo y crecimiento.

En un período anual, presenta dos floraciones, no obstante existen algunos tallos floríferos durante todo el año. La primera floración es de abril a junio. La segunda es de septiembre a diciembre (Proyecto 21.04; 2003).

Son plantas de climas templados que prosperan en posiciones soleadas, tolerando un amplio rango de pH (4 - 9). La temperatura media óptima para su desarrollo está dentro del intervalo de 16 °C a 27 °C. Se utilizan principalmente en humedales artificiales de flujo subsuperficial (lecho de grava/arena), ya que su tolerancia a la inundación permanente es poca cuando la capa de agua es profunda. Prospera muy bien en medios acuáticos de profundidad somera como lagunas o zonas de inundación (Delgadillo *et al*; 2010).

El principal uso de los juncos, es la producción de esteras, artesanías (canastos, sillas, etc.), construcción de balsas y chozas, combustible, forraje para ganado en época de sequía, abono y alimento (Sabaj, 2010).

2.4.2.2 Lemna o Lenteja de Agua (*Lemna minor* K.)

Según Yanes (2004) pertenece a la siguiente clasificación:

Familia: *Lemnaceae*

Género: *Lemna*

Especie: *Lemna minor*

Nombre Vulgar: Lenteja de agua.

Es una planta muy pequeña de una estructura muy simple. Aunque es flotante no presenta un tallo separado de las hojas, posee una fusión de ambos llamado fronda (Del Cisne y Campoverde, 2012).

La Lemna puede desarrollarse en un rango amplio de temperaturas, que varía entre 5° y 30° C, con un crecimiento óptimo entre los 15° y 18°C. Se adapta bien a cualquier condición de iluminación. Crece rápidamente en partes calmadas y ricas en nutrientes, con altos niveles de nitrógeno y fósforo. Con frecuencia el hierro es un elemento limitante para su adecuado desarrollo. Pueden además tolerar un rango de pH amplio, siendo el óptimo entre 4,5 y 7,5 (Arroyave, 2004).

El mecanismo de propagación de la flia. *Lemnaceae* es vegetativo, mediante la formación de ‘frondes hijo’ a partir de un ‘fronde madre’. Este mecanismo es muy eficaz llegando algunas especies incluso a duplicarse en número en tan sólo 24 h. Además, un mismo fronde puede producir al menos 10-20 frondes más durante su vida. Por esta razón las *Lemnaceae* tienen una alta productividad potencial en biomasa (Beascochea *et al*, 2003), por lo cual para garantizar la productividad y salud de la colonia es necesario retirar a diario una cierta cantidad de su biomasa (Gijzen, 1998).

La Lenteja de agua alcanza niveles de proteína hasta un 38% de su biomasa. Este contenido proteínico, junto con su alta palatabilidad y su facilidad de suministro, la hace ideal para alimentación de cerdos, ganado y aves. Si las plantas acuáticas son cultivadas en aguas residuales, pueden ser usadas para la alimentación siempre y cuando no contengan sustancias tóxicas, y si éste es el caso, la biomasa obtenida podría utilizarse para producir metano, por medio de la digestión anaeróbica (Arroyave, 2004).

2.4.3 Agua Residual

La hidrología es el factor de diseño más importante en un humedal artificial por que reúne todas las funciones del humedal y porque a menudo es el factor primario en el éxito o fracaso del sistema. Debido al área superficial del agua y su poca profundidad, el sistema actúa recíproca y fuertemente con la atmósfera a través de la lluvia y la evotranspiración (Cardona y Vanegas, 2009).

Las aguas residuales se definen como aguas de composición variada provenientes de las descargas de usos municipales, industriales, comerciales, de servicios, agrícolas, pecuarios, domésticos, incluyendo fraccionamientos y en general, de cualquier otro uso, así como la mezcla de ellas (Romero *et al*, 2009).

Las aguas residuales domésticas son aguas originadas en las viviendas o instalaciones comerciales y/o públicas. Están compuestas por aguas fecales y aguas de lavado y limpieza. Los principales contaminantes que van a contener son gérmenes patógenos, materia orgánica, sólidos, detergentes, nitrógeno y fósforo, además de otros en menor proporción (Zambrano *et al*, 2004). Son estas aguas las que son recogidas y conducidas hacia los humedales, en este caso.

2.4.3.1 Características Químicas del Agua Residual

- **Materia Orgánica**

La mayor parte de la materia orgánica consiste en residuos alimenticios, excretas y materia vegetal (Torres *et al*, 2012). La eliminación de la materia orgánica se realiza

mediante los microorganismos presentes en el humedal, principalmente bacterias, que utilizan esta materia orgánica como sustrato. A lo largo del humedal existen zonas con presencia o ausencia de oxígeno molecular, por lo que la acción de las bacterias tiene lugar tanto a través de procesos biológicos aerobios como anaerobios (Alonso, 2013). Pero una pequeña porción también es removida por procesos físicos como la sedimentación y filtración, cuando la materia orgánica es fijada a los sólidos suspendidos (Delgadillo *et al*; 2010).

La DBO es el indicador de contaminación orgánica más empleado para aguas residuales y refleja solamente la materia orgánica “eliminable”, o mejor dicho digerible, por los microorganismos presentes y en presencia de los inhibidores de éstos que puedan coexistir en la muestra (Fernández, 1999). Esta se expresa en función de la demanda de oxígeno de los microorganismos participantes en la degradación de la materia orgánica presente a 20° C y en un tiempo determinado que usualmente es 5 días, utilizando una prueba denominada DBO₅ (Carranza *et al*, 2014).

Otro indicador utilizable es la DQO, la cual se define como la cantidad de oxígeno que sustancias reductoras, como la materia orgánica, presentes en un agua residual necesitan para descomponerse, sin la intervención de microorganismos. En las pruebas de DQO se acelera artificialmente la biodegradación que realizan los microorganismos, mediante un proceso de oxidación forzada, utilizando oxidantes químicos y métodos debidamente estandarizados, que tienen por objeto garantizar la reproducibilidad y comparabilidad de las mediciones (Romero *et al*, 2009). Además es una prueba que solo toma alrededor de 3 horas, por lo que los resultados se pueden tener en mucho menor tiempo que lo que requiere una prueba de DBO₅. Hay que tener en cuenta que es posible para un agua superficial o residual correlacionar su valor de DBO₅ y DQO, para estimar la DBO₅ con un valor conocido de DQO (Quiroz, 2012).

- **Nutrientes (N y P)**

La importancia de estos nutrientes N y P es que cuando son lanzados en el ambiente acuático, pueden llevar al crecimiento de vida acuática indeseable y cuando son aplicados al suelo en cantidades excesivas, pueden contaminar también el agua subterránea (Delgadillo *et al*, 2010).

Dentro de las formas en que se encuentra el nitrógeno, la de mayor interés en las aguas son el amoniacal y el total. El nitrógeno total está compuesto por nitrógeno amoniacal más nitrógeno orgánico, y éste está constituido por nitrato, nitrito y amonio (Peña y Perez, 2004). Las bacterias rápidamente descomponen el nitrógeno orgánico en nitrógeno amoniacal y, si el medio es aerobio, en nitritos y nitratos (Cardona y Vanegas, 2009). Por lo general los procesos en el interior del humedal son anaeróbicos, ya que no existe suficiente oxígeno para

la nitrificación y posterior desnitrificación (Lahora, 2003). Aunque ocurre la asimilación de nitrógeno por parte de las plantas, solo una pequeña fracción del nitrógeno total puede ser eliminada por esta vía.

El fósforo en aguas residuales se encuentra principalmente como fosfatos y en formas orgánicas. La contaminación de agua por este elemento tiene su fuente principal en el uso de productos de limpieza con compuestos fosforados como principios activos (Romero *et al*, 2009). La cantidad de fósforo del efluente es prácticamente igual que en el influente, en la mayoría de los casos. La cantidad de fósforo asimilada por la vegetación o fijada en el sedimento es pequeña en relación a la aportada con el agua residual. Por tanto los humedales no son un método muy efectivo para la eliminación de fósforo, excepto si se usan grandes áreas con grava rica en hierro y aluminio o tratamientos alternativos de eliminación de fósforo (Lahora, 2003).

- **Potencial Hidrógeno (pH)**

El potencial de Hidrogeno del agua medido en unidades de pH es muy importante debido a que es influenciado por factores bióticos, abióticos, y bioquímicos (Lahora, 2003). El pH expresa el grado de acidez o alcalinidad del agua, en valores de 0 a 14, siendo que valores inferiores a 7 indican aguas acidas y valores superiores a 7 indican aguas alcalinas. El pH del medio (agua) controla las reacciones químicas de muchos poluentes (Quiroz, 2012) y determina la agresividad del agua con respecto al cemento y a los metales (Lahora, 2003). Valores bajos de pH aceleran la descomposición de materiales potencialmente tóxicos (Quiroz, 2012). Se considera normal cuando los valores oscilan entre 6 y 9 (Beasoechea *et al*, 2003)

2.4.3.2 Características Físicas de las Aguas residuales

- **Sólidos Suspendidos Totales (SST)**

Es la fracción de sólidos presentes en el agua como material no disuelto. Pueden contener partículas orgánicas e inorgánicas. Dentro de las partículas orgánicas encontramos fibras de plantas, células de algas, bacterias y sólidos biológicos. Por otro lado partículas de arcilla y sales son consideradas como inorgánicas (Gómez, 2003). Se determinan por filtración de una muestra de agua, empleando un filtro de fibra de vidrio o membrana.

Una elevada cantidad de SST en los cuerpos de agua puede ser perjudicial para los peces y otras formas de vida acuática por obstrucción de los órganos respiratorios, recubrimiento de microorganismos en el fondo del acuífero, reducción de la intensidad de la radiación luminosa y modificación de las cadenas alimentarias.

Estos sólidos comprenden a los sedimentables, flotantes y no sedimentables ó coloidales. Los sólidos sedimentables son aquellos que sedimentan en el fondo de un

recipiente de forma cónica (cono Imhoff) en un tiempo de 60 minutos y se expresan como mililitro de sedimento por litro de agua residual (Olmos *et al*, 2002).

- **Temperatura**

La Temperatura en las aguas residuales suele oscilar entre los 15 °C en invierno y los 20° C en verano (Beascoechea *et al*, 2003).

Las condiciones de temperatura en un humedal afectan tanto las actividades físicas como biológicas en el sistema. Con temperaturas inferiores a 10°C provocan disminución en la remoción de DBO y de N. Mientras que un aumento significativo de la misma va acompañado de un aumento en la evaporación, disminución de la solubilidad de Oxígeno, aceleración de reacciones químicas y biológicas, que consumen el oxígeno produciendo consecuentemente olores desagradables por la producción de metano, ácido sulfhídrico y materia orgánica parcialmente oxidada (Delgadillo *et al*, 2010).

- **Conductividad eléctrica**

Indica el contenido de sales disueltas en el agua y se define como la medida de la capacidad de conducir electricidad. La corriente eléctrica es transportada por iones en solución, por lo tanto el aumento de la concentración de iones provoca un aumento de la conductividad (Delgadillo *et al*, 2010).

El uso doméstico del agua suele elevar su conductividad a valores entre 1000 y 2000 μ Siemens/cm (Beascoechea *et al*, 2003).

2.4.3.3 Características Biológicas de las Aguas residuales

Las aguas, como cualquier otra sustancia, pueden tener grandes cantidades de algas, protozoarios y microorganismos como bacterias, virus y hongos, la mayoría de los cuales son ubicuos e inofensivos para el hombre; sin embargo algunos microorganismos pueden ser potencialmente patogénicos. Estos microorganismos patogénicos presentes en las aguas naturales provienen de las excreciones (heces y orina) de personas infectadas (Quiroz, 2012).

Todos los microorganismos patogénicos son capaces de sobrevivir al menos un corto tiempo en agua natural, más tiempo aún logran sobrevivir con temperaturas altas y con presencia de polución orgánica.

Los organismos más importantes, desde el punto de vista de la salud pública son las bacterias patógenas y los virus (Delgadillo *et al*, 2009).

El riesgo de contaminación tanto a nivel humano como ambiental hace necesario el control de la presencia de microorganismos potencialmente patógenos en el agua. Existe un consenso general sobre la dificultad de determinar la presencia de todos los microorganismos patógenos implicados en los procesos de contaminación ambiental. Frente a estas

dificultades y a la necesidad de hacer una evaluación rápida y fiable de la presencia de patógenos en el agua, se ha planteado la necesidad de trabajar con microorganismos indicadores. Los microorganismos indicadores son aquellos que tienen un comportamiento similar a los patógenos (concentración y reacción frente a factores ambientales y barreras físicas), pero son más rápidos, económicos y fáciles de identificar. Una vez que se ha evidenciado la presencia de grupos indicadores, se puede inferir que los patógenos están presentes en la misma concentración y que su comportamiento frente a diferentes factores como pH, temperatura, presencia de nutrientes, tiempo de retención hidráulico o sistema de desinfección es similar a la del indicador.

El grupo de microorganismos coliformes es adecuado como indicador de contaminación bacteriana (Delgado *et al*, 2003) y la *Escherichia coli* es la bacteria indicadora por excelencia de este grupo (Cardona y Venegas, 2003). Uno de los métodos utilizados para su determinación es la Prueba del Numero más probable (NMP). Está basado en una evaluación indirecta de la densidad microbiana de la muestra de agua, con referencia a los cuadros estadísticos, para determinar el número más probable de microorganismos presentes en la muestra original (Pérez y Rodríguez, 2011).

La remoción de estos microorganismos está basada en una combinación de factores físicos, químicos y biológicos. Los factores físicos incluyen la filtración, sedimentación, agregación y acción de la radiación ultravioleta. Los mecanismos biológicos incluyen, como se mencionó antes, predación y ataque por bacteriófagos y también la muerte (declinación *die-off*). Finalmente, los factores químicos son la oxidación, absorción y la exposición a toxinas fijadas por otros microorganismos y exudadas por las raíces de las plantas, aunque la cantidad de estos antibióticos causa dudas respecto a su efectividad para afectar a los patógenos (Delgadillo *et al*, 2010).

Los humedales pueden reducir los coliformes fecales en uno o dos órdenes logarítmicos como también remover otros patógenos, como protozoos y helmintos (Lahora, 2003).

2.5 Mecanismos de remoción de los Humedales artificiales

En la Tabla 1 se resumen los mecanismos de remoción de contaminantes más importantes mediante los humedales artificiales:

Tabla 1. Mecanismos de remoción de contaminantes en humedales artificiales

PARÁMETRO	MECANISMO DE REMOCIÓN
Sólidos Suspendidos	<ul style="list-style-type: none"> • Sedimentación- Filtración
DBO₅	<ul style="list-style-type: none"> • Degradación microbiana (aeróbica y anaeróbica) • Sedimentación (acumulación de materia orgánica/ lodo en la superficie de sedimento)
Nitrógeno	<ul style="list-style-type: none"> • Amonificación, nitrificación y desnitrificación • Absorción por parte del vegetal • Volatilización del amonio
Fósforo	<ul style="list-style-type: none"> • Suelo (adsorción- precipitación con metales como el aluminio hierro y calcio) • Absorción por parte del vegetal • Producción de fosfinas
Patógenos	<ul style="list-style-type: none"> • Sedimentación / Filtración • Declinación • Radiación ultravioleta • Excreción de antibióticos por las raíces

2.6. Rendimiento de los humedales

Pueden tratar con eficiencia niveles altos de DBO₅, SST y Nt (rendimiento superiores al 80%), así como niveles significativos de metales, trazas orgánicas y patógenos. No ocurre lo mismo con el fósforo (P) (Lara, 1999), en los estudios a largo plazo (entre 5 y 10 años) se produce un deterioro progresivo de la capacidad de retención del P. En un principio, el humedal retiene P pero a partir de un cierto periodo de tiempo (entre 1 y 5 años) la cantidad de P que sale del humedal empieza a superar la entrada de dicho elemento (Olmedilla *et al*; 2000).

En Catalunya se destacan instalaciones de humedales de flujo superficial con siete hectáreas integradas en el Parc Natural de Aiguamolls de l'Empordá y la de Granollers de una hectárea y que forma parte de un parque periurbano. Son instalaciones que producen de forma fiable efluentes de gran calidad, por ejemplo en el caso de Granollers menos de 2 mg

NH₃-N/L -con excepción del invierno- y menos de 100 CF/100 mL de forma bastante sistemática (García *et al*, 2003).

En los sistemas de humedales la remoción de materia orgánica sedimentable es muy rápida, debido a la quietud en los sistemas tipo FWS y a la deposición y filtración en los SFS, donde cerca del 50% de la DBO₅ aplicada es removida en los primeros metros del humedal. Esta materia orgánica sedimentable es descompuesta aeróbica o anaeróbicamente, dependiendo del oxígeno disponible. El resto de la DBO₅ se encuentra en estado disuelto o en forma coloidal y continúa siendo removida del agua residual al entrar en contacto con los microorganismos que crecen en el sistema (Lara, 1999), la remoción de DBO₅ que es alrededor de 97,49 % - 100 %, es mayor que la DQO ya que esta ronda entre un 93,50 % y 97,39 % (Montoya *et al*, 2010).

En México tanto a escala de laboratorio como en planta de tratamiento por humedales con capacidad de 150 m³/día, se observaron porcentajes de disminución del 95 % de DBO, 93 % de DQO, 99 % de SST así como la obtención de un efluente totalmente clarificado y con una cuenta de coliformes ligeramente arriba de 1000 como NMP/100 mL de agua residual (Vásquez *et al*, 2004).

La remoción de SST es muy efectiva en los distintos tipos de humedales artificiales (Lara, 1999), siendo los valores habituales de eliminación de sólidos del 85-95 % (Cardona y Vanegas, 2009), produciendo efluentes con concentraciones inferiores a 20 mg/L que es el valor de referencia (Lara, 1999).

III- Hipótesis y Objetivos

3.1 HIPÓTESIS

1. Los humedales artificiales son tecnologías de alto impacto medioambiental en la depuración de aguas residuales.
2. El efluente crudo luego de pasar por el humedal artificial, podría ser reutilizado para riego.

3.2 OBJETIVOS

3.2.1. Generales:

1. Evaluar la capacidad de remoción de los contaminantes presentes en las aguas residuales mediante el uso de humedales artificiales superficiales.
2. Tomar conciencia de la importancia que tiene la depuración mediante técnicas naturales de bajo costo que permitan la reutilización de aguas residuales.

3.1.2. Específicos:

1. Realizar un relevamiento topográfico del área en donde se instalarán los humedales.
2. Diseñar tecnologías apropiadas de bajo costo y bajo consumo de energía.
3. Clasificar las especies flotantes y emergentes que se utilizan en los humedales.
4. Calcular el tiempo de residencia hidráulico para el caudal de diseño.
5. Determinar a campo y en laboratorio los parámetros físicos, químicos y biológicos en la cabecera y pie de cada humedal.
6. Justificar la importancia que tiene reutilizar el agua tratada en humedales artificiales.

IV- Materiales y Métodos

A efectos de alcanzar el objetivo propuesto en este trabajo de tesis, se realizó una investigación de carácter experimental consistente en evaluar la disminución de las concentraciones de DBO_5 , DQO, SST, Ssed, Nt, Pt, CT y CF.

4.1 Descripción del experimento

El estudio se llevó a cabo en la Planta Piloto de Tratamiento y Reutilización de Efluentes Urbanos de la UNRC. La primera actividad que se realizó fue el 19/9/12 y consistió en seleccionar el sitio donde se iba a ubicar el ensayo experimental (Fig. 1).



Figura 1. Elección del terreno dentro del predio de la Planta Piloto de Tratamiento y Reutilización de Efluentes Urbanos de la UNRC.

Como se observa en la Fig. 2, la fuente de agua residual procede de una población estudiantil universitaria que reside en las Residencias Estudiantiles Universitarias (REU) pertenecientes a la Universidad Nacional de Río Cuarto (UNRC).

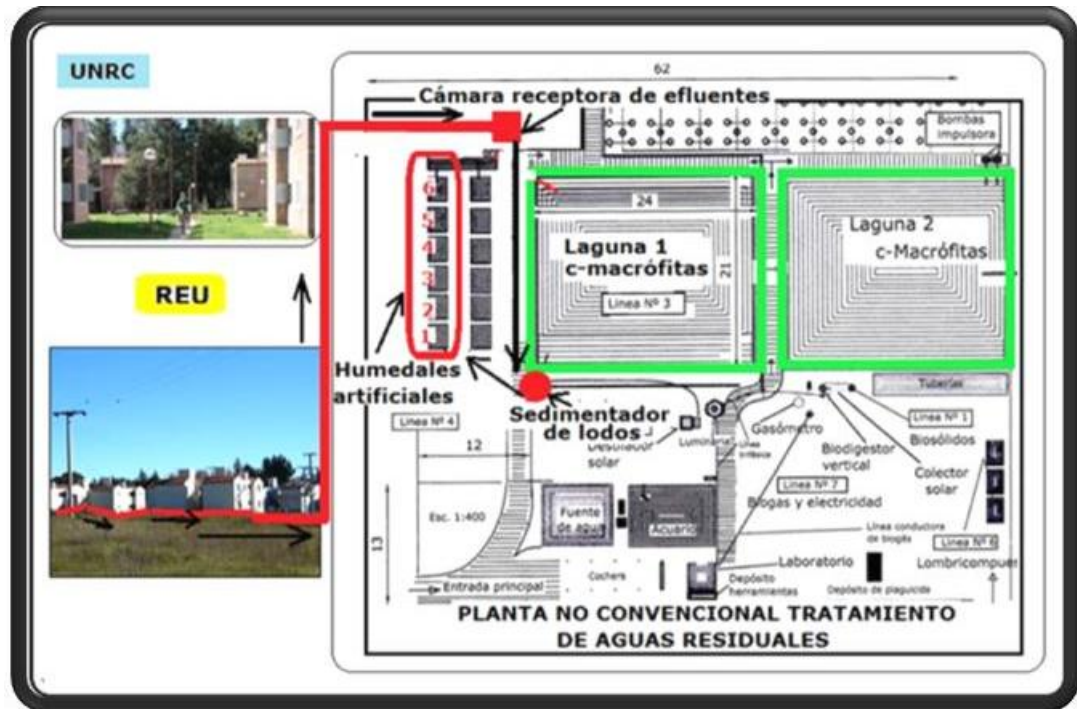


Figura 2. Plano general y ubicación del ensayo. Planta Piloto de Tratamiento y Reutilización de Efluentes Urbanos de la UNRC.

Si bien las REU cuentan con 208 habitantes, para realizar esta experiencia y en función de las variables de diseño, se comprometió un caudal erogado por 28 habitantes, dado que se trata de una superficie experimental muy pequeña y por tanto también lo es el volumen a tratar, pero lo importante es que los resultados son totalmente escalables. Aquí se presenta una visión general del camino que recorre el efluente (indicado por líneas de color rojo); en primer lugar, se realiza la captación del mismo de los 51 departamentos mediante una red de tuberías secundarias de PVC tipo cloacal de una presión nominal de 4 Kgcm^{-2} y de 110 mm de diámetro enterradas a 0.60 m y cuya sumatoria de caudales confluye en una línea principal de 140 mm de diámetro enterrada a 1 m de profundidad y de iguales características técnicas que la anterior, que en definitiva descarga en la cámara concentradora de efluentes, lo que se indica en la Fig. 3 con la leyenda “Llegada del efluente crudo”.



Figura 3. Cámara receptora de efluentes Planta Piloto de Tratamiento y Reutilización de Efluentes Urbanos de la UNRC.

Cuando el efluente entra a la cámara, comienza el proceso de pretratamiento que consiste en el prefiltrado, para lo cual pasa por un disco perforado de acero inoxidable -que actúa como un primer filtro de material grueso- y el excedente descarga en un canasto de acero inoxidable (Fig. 4) de 0.6 m x 0.6 m x 0.4 m -segundo prefiltro- que retiene el grueso que podría haber pasado previamente. Este canasto es retirado semanalmente y su contenido vertido en bolsas especiales de polietileno de 600 micrones y precintadas que se colocan en recipientes como residuos peligrosos que periódicamente son retiradas por el Municipio de Las Higueras (Pcia de Córdoba).



Figura 4. Canasto de prefiltrado y recipiente residuos peligrosos. Planta Piloto de Tratamiento y Reutilización de Efluentes Urbanos de la UNRC.

En el interior de la cámara receptora se encuentran instaladas dos electrobombas centrifugas que elevan periódicamente el agua residual (3 veces por día) a un tanque sedimentador de lodos (Fig. 5), en el cual se realiza la separación de la fracción sólida o fangos (que se destinan al proceso de biodigestión) de la líquida.



Figura 5. Tanque sedimentador de lodos. Planta Piloto de Tratamiento y Reutilización de Efluentes Urbanos de la UNRC.

En los sistemas de humedales de flujo superficial normalmente se aplica agua residual pre-tratada en forma continua (Lara, 1999). Como se observa, desde la parte inferior del tanque sedimentador sale el agua pre-tratada hacia el tratamiento de los seis humedales artificiales que se indicaron posicionalmente en forma relativa al sedimentador de lodos, numerados del 1 al 6 en la Fig. 2.

4.2 Diseño Experimental

Se realizó un experimento con dos factores fijos: tipo de plantas y TRH (Tiempo de Residencia Hidráulica) en flujo laminar continuo.

Se conformaron 2 tipos de tratamiento con 3 repeticiones cada uno. Para ello se utilizaron dos tipos de plantas, una de ellas flotante: Lemna (*Lemna minor* K) y otra de tipo macrófita emergente la cual fue tutorada para que se comporte como flotante: Junco (*Schoenoplectus californicus*). En ambos tratamientos se utilizó un TRH de 1 día con un caudal continuo de 24 Lh⁻¹.

El tratamiento *Lemnas* (L) estuvo conformado por la especie *Lemna minor* K. El tratamiento *Lemnas* + *juncos* (L + J), fue un tratamiento híbrido en el cual se combinaron las dos especies vegetales *Lemna minor* K y *Schoenoplectus californicus*. En este último

tratamiento coexisten dos tipos de humedales (FWS y FMF); pero ambos están sometidos a un flujo superficial.

El Diseño utilizado para este ensayo fue un DCA (Diseño Completamente Aleatorizado ó Simple al Azar), en el cual los tratamientos se distribuyen al azar en las unidades experimentales (humedales). Para lograr esta distribución se realizó un sorteo y los resultados se indican en la Tabla 2.

Tabla 2. Asignación de tratamientos a los humedales

Humedal	Tratamiento Asignado
1	L
2	L + J
3	L
4	L + J
5	L + J
6	L

El modelo estadístico utilizado en el análisis de los datos, por lo tanto, será el que se corresponde con un Diseño Completamente al Azar (DCA):

$$y_{ij} = \mu + \alpha_i + \varepsilon_{ij}$$

Donde cada observación (y_{ij}) está afectada por un efecto medio (μ), un efecto de tratamiento (α_i) y por el efecto de una variable aleatoria (ε_{ij}).

y_{ij} = Observación de la variable (dependiente) obtenida en el humedal j al que se aplicó el tratamiento i. ($i = 2$; $j = 6$)

μ = Media poblacional de la variable

α_i = Efecto debido al tratamiento i (representa el efecto del nivel i del factor cuyo efecto se quiere conocer)

ε_{ij} = Variable aleatoria debida al error entre humedales con el mismo tratamiento. Esta variable tiene $\sim N(0; \sigma^2_e)$ (Efecto no controlado - residuo u error)

μ, α_i = Parámetros del modelo

y_{ij}, ε_{ij} = Variables dependiente y aleatoria respectivamente

4.3 Diseño y Construcción de los humedales

Los 6 humedales se construyeron a escala reducida, su diseño quedó determinado por una caja de sección trapezoidal en los planos tanto longitudinal como frontal.

En la Fig. 6, se puede ver en perspectiva el plano de los humedales con una longitud de 1.50 m, un ancho de 0,90 m y una profundidad de 0,70 m, con una pendiente del 1%.

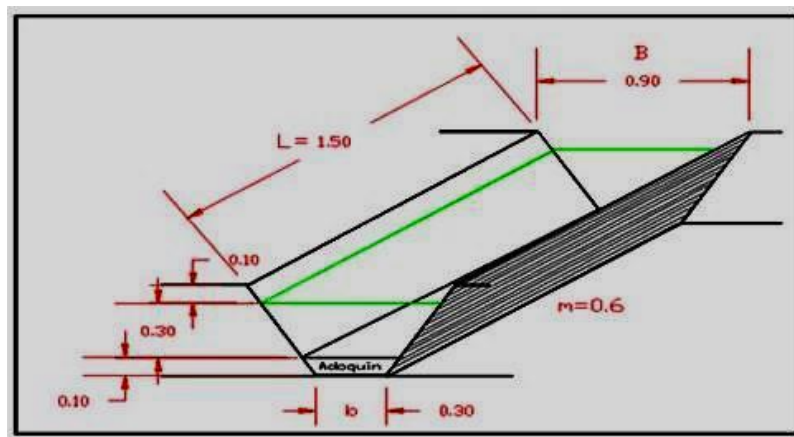


Figura 6. Vista en perspectiva de la unidad experimental.

En la Fig. 7, se puede apreciar las medidas correspondientes a un corte transversal.

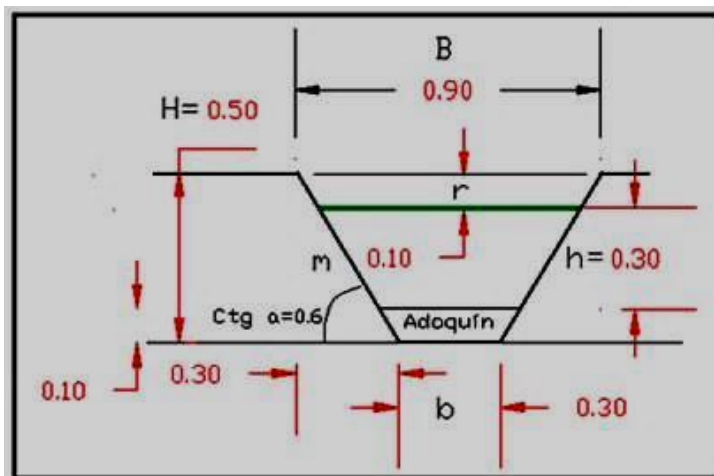


Figura 7. Perfil frontal del humedal.

La construcción de los humedales comenzó con la apertura de un surco que se constituyó en la columna vertebral de la futura obra hidráulica (Fig. 8) pues se utilizó como eje central de la construcción de los humedales.



Figura 8. Apertura de un surco con reja de grandes dimensiones- Planta de Tratamientos y Reutilización de Efluentes Urbanos de la UNRC.

Posteriormente se procedió a realizar una serie de actividades secuenciales (Fig. 9) señaladas como A, B, C y D. Las primeras tres letras indican la apertura de las zanjas destinadas a cada humedal que son pequeñas lagunas que van a contener un volumen determinado de agua residual para su tratamiento y D es una excavación de una laguna de descarga perpendicular a los humedales de 2.00 m de largo x 1.00 m de ancho x 1.00 m de profundidad, cuya función es recolectar el exceso de agua residual después de circular por los humedales. Cuando el nivel del líquido en la laguna receptora llega a 90 cm, se acciona automáticamente una electrobomba sumergible cloacal de $\frac{3}{4}$ HP de potencia, altura manométrica de 8 m y caudal de 4000 Lh^{-1} con flotante automático hacia una laguna facultativa de 489000 L con macrófitas flotantes ubicada en terraplén en la Planta Piloto cuya finalidad es el tratamiento primario de los efluentes urbanos a través del sistema de lagunaje.



Figura 9. Actividades primarias realizadas en el predio experimental.

En la Fig. 10, se puede observar una de las actividades fundamentales en la puesta en marcha de esta tecnología de depuración, como es el relevamiento planialtimétrico para definir el perfil longitudinal de los humedales a los fines de facilitar la circulación del agua y mantener una velocidad tal que permita un régimen laminar. Se tomaron 3 lecturas por humedal (cabecera, centro y pie) y se aprovechó la disponibilidad del instrumental topográfico (mira y nivel) para tomar otra serie de lecturas para dimensionar la red hidráulica.



Figura 10. Relevamiento planialtimétrico de la línea de humedales.

Al pie de cada humedal se realizaron las respectivas calicatas de 0.50 m de largo, 0.30 m de ancho y 0.20 m de profundidad para extracción de muestras a los fines de analizar los parámetros físicos, químicos y microbiológicos para evaluar el comportamiento de este sistema de tratamiento de aguas residuales.

Para prevenir la contaminación de la napa freática, los humedales fueron impermeabilizados con doble lámina de polietileno (PE) de 200 μ de espesor cada una

(Fig.11); cortando previamente las raíces que sobresalían en la zanja y podrían perforar este material de protección.



Figura 11. Impermeabilización con PE de media densidad.

El fondo de los humedales se recubrió con adoquines de 10 cm de espesor (Fig. 12), a efectos de sujeción del PE y para culminar con la etapa de construcción se colocó una delgada capa de arena de 1cm de espesor para rellenar los espacios entre adoquines.



Figura 12. Colocación de adoquines y base de arena.

4.4 Instalación del Sistema Hidráulico

Se utilizó una tubería de alimentación, de 50 mm de diámetro de PVC (Cloruro de Polivinilo), con válvula de cierre y desagote a la laguna de descarga del sistema existente.

Insertos en esta tubería principal se instalaron tuberías de derivación (Fig. 13) de 25 mm de diámetro que terminan en llaves esféricas de ½ pulgada que son las que alimentan en la cabecera a cada uno de los humedales.

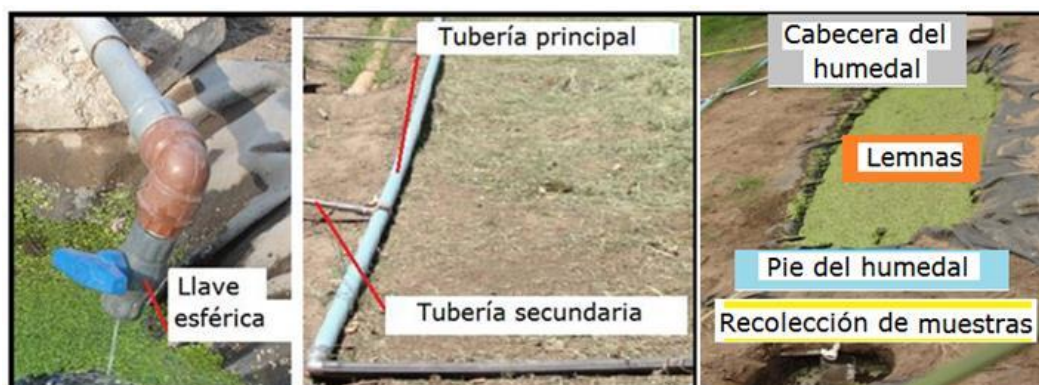


Figura 13. Red de tuberías y llave esférica de entrada de agua al humedal.

Para lograr el equilibrio entre el volumen de entrada y el de salida, se instaló una descarga, pues la carga es constante. A tal fin, se colocó al pie de cada humedal una tubería de PVC de 25 mm de diámetro (Fig. 14) que atravesó el polietileno (PE) y termina en un codo de 90° en el interior para captar el agua excedente y en el extremo exterior de la tubería se colocó una “TE” de PVC en la cual se insertó una llave en cada humedal para la toma de muestra por un lado y por el otro, una tubería de 25 mm de PVC que llevaba el agua drenada hacia otra tubería de 100 mm de diámetro de polipropileno (PP), la cual descargaba en la laguna de la Fig. 8 D.



Figura 14. Red de tuberías de carga y descarga.

4.5. Implantación y Siembra de la Vegetación

Luego del llenado de los humedales se comenzó con la siembra e implantación de la vegetación a utilizar: Juncos (*Schoenoplectus californicus*) y Lentejas (*Lemna minor*).

El sistema de siembra o implantación que se utilizó para cada especie fue diferente debido a sus características de reproducción.

Para el caso de los juncos, en los sistemas de menos de 0,8 ha, la vegetación puede trasplantarse de fuentes cercanas u obtenerse de forma comercial (Delgadillo *et al*, 2010). Además es recomendable que las plantas madres procedan de poblaciones naturales de la zona, a fin de asegurar su adaptación al lugar (Beascochea *et al*, 2003). En nuestro caso se disponía de una población de juncos en una Laguna ubicada al Norte de las REU, por lo tanto las plantas madres fueron extraídas de ese mismo sitio (Fig. 15).



Figura 15. Población de juncos (*Schoenoplectus californicus*) y rizoma respectivo.

La implantación de juncos en los humedales artificiales se efectúa usualmente por división de matas, por lo tanto desarraigamos las plantas del sustrato y las fraccionamos de modo que cada porción lleve en su parte subterránea rizomas. El tamaño de rizoma utilizado fue de 10 cm de largo y los trabajos previos de preparación se muestran en la Fig. 16, donde se emplearon solo aquellos que poseían brotes. Los tallos de las plantas madres debían ser recortados antes del trasplante para no consumir el rizoma y permitir así el crecimiento del nuevo brote, para ello se realizó un corte bisel sobre el tallo dejando solo la porción que no fotosintetizaba.



Figura 16. Acondicionamiento de los juncos para su posterior implantación

El junco es una planta que naturalmente se desarrolla como emergente; para lograr que se comporte como flotante, se colocó un tejido romboidal sobre el humedal y sobre él se dispusieron los rizomas con sus respectivos tutores. Los tutores estaban conformados por tubos PVC (Fig. 17) de 40 cm de largo y 40 mm de diámetro de PVC sobre los cuales se amarraron los rizomas mediante un precinto.



Figura 17. Procedimiento de instalación de los tutores hidráulicos.

La densidad final de siembra a lograr debía ser de 7 pl / m² para llegar a este valor se colocaron 20 rizomas/humedal.

Las *Lemnas*, en cambio, se trasladaron directamente desde la laguna de tratamiento adyacente a los humedales. Para ello se utilizó un balde de 10 L con el cual se cosecho una porción de *Lemnas* y se distribuyó a lo largo de cada humedal (Fig. 18).



Figura 18. Procedimiento de siembra de Lemnas (*Lemna minor K*).

Por último, como se observa en la Fig. 19, ya está listo el sistema de humedales artificiales para su evaluación como alternativa de tratamiento e inclusive se muestra la adaptación y estados de desarrollo



Figura 19. Sistema de humedales establecido para evaluación.

4.6 Seguimiento del Proyecto

El sistema de humedal estuvo en funcionamiento durante un año, su seguimiento nos permitió evaluar muchos puntos interesantes para este proyecto.

Se visualizó el crecimiento de la vegetación sobre todo del junco que realizó un ciclo completo pasando por todas sus etapas tanto vegetativas como reproductivas (Fig. 20),

indicando con A, B y C, los estados fenológicos de brotación de rizomas, periodo vegetativo y reproductivo respectivamente de Junco (*Schoenoplectus californicus*).



Figura 20. Presentación de diferentes estados fenológicos de junco.

En la Fig. 21 se puede observar el esplendor del crecimiento del humedal artificial en plena época estival, contando más de 100 tallos de juncos de los 20 originales con una extraordinaria multiplicación de macrófitas flotantes que obligaba a cosechar dos veces por semana para evitar la superpoblación y muerte de plantas como consecuencia de este efecto.



Figura 21. Época estival. Crecimiento exponencial del humedal.

Además se pudo observar la importante producción de biomasa de las Lemnas, lo cual hizo necesario la realización de cosechas en determinadas épocas del año mediante el uso de una simple rejilla que actuaba a modo de colador (Fig. 22), con lo que se lograba mantener una cobertura de la superficie del humedal del 100 %, pero impidiendo la

acumulación de alta densidad de plantas flotantes que impedía el paso de la luz y modificaba la absorción de nutrientes disminuyendo su actividad depuradora.



Figura 22. Cosecha de *Lemna minor K.* en cada humedal manteniendo la cobertura.

También en esta etapa se llevaron a cabo las reparaciones necesarias en el sistema hidráulico (Manejo de tanques, cambio de llaves, conexión de bombas etc) para que este funcione de manera correcta y permita que se produzca ese flujo continuo y constante que caracteriza al tipo de humedal construido (SFS).

Teniendo en cuenta este último punto fue necesario la instalación de un tanque estabilizador de la presión de 1000 L (Fig. 23) con flotante reforzado de $\frac{3}{4}$ " para mantener una altura de carga constante de 1.2 m y por lo tanto la no variación del flujo hacia los humedales.

Dicho tanque es alimentado a su vez desde el tanque sedimentador de lodos de 10000 L de capacidad. Esta instalación fue necesaria, debido a que las electrobombas centrífugas alojadas en la cámara receptora, en condiciones normales de trabajo envían cada 8 h aproximadamente, 3000 L de efluentes al tanque sedimentador de lodos. Cuando dicho tanque completa el 80 % de su capacidad, comienza a verter por un sistema de vasos comunicantes el agua residual hacia una laguna facultativa con plantas flotantes, para su tratamiento; en consecuencia con la descarga varía su tirante y, por lo tanto, si se hiciera una derivación para alimentar a los humedales directamente desde el tanque sedimentador, el caudal de ingreso sería variable, por esta razón se instaló el tanque estabilizador de presión.



Figura 23. Instalación de tanque estabilizador de presión.

4.7 - Muestreo

Se realizaron mediciones de control como Conductividad eléctrica, pH y Temperatura, durante el periodo que transcurrió desde el 15 de Noviembre hasta el 19 de noviembre del 2013, al mismo tiempo se realizaron tareas de aforo para conocer y fijar un caudal constante de entrada de agua residual a los humedales.

Una vez aforados los humedales, el 20 de Octubre de 2013 se comenzó con la toma de muestras puntuales de conformidad al Decreto 415/99 -Normas para la protección de los recursos hídricos superficiales. Anexo II-, en frascos limpios, tomándose una muestra de 0.5 L en cada humedal para determinación de DBO₅ y DQO, y muestras de 1 L para determinaciones de Ssed, SST, Nt y Pt, en recipientes esterilizados de 100 cm³ para hacer CT y CF (Fig.24). Cada recipiente fue identificado indicándose fecha, N° de humedal, lugar y hora de la toma.



Figura 24. Presentación de recipientes de toma de muestras.

Las muestras correspondientes a coliformes, Nt y Pt fueron analizadas en el Laboratorio de Microbiología de la UNRC y el resto de los parámetros en el Laboratorio de la Planta Piloto de Tratamiento y Reutilización de Efluentes de la UNRC.

SSed: se utilizó un cono Imhoff (Fig. 25) donde se tomaron dos lecturas de sólidos en mLL^{-1} , una a los 10 min y otra a los 60 min. Se tomó una sola muestra de entrada que representa a cada una de las entradas de los 6 humedales y se tomaron 6 muestras del pie de cada humedal correspondiéndose con los datos de salida.



Figura 25. Dispositivo para determinación de sólidos sedimentables.

DQO: la digestión de la materia orgánica se realizó en un termorreactor a 150 durante 180 min, luego se pasó a un fotómetro multiparamétrico (Fig. 26) y con el rango de reactivo para la DQO esperada más 2 ml de la muestra fue calentada durante 2 h a 150 °C. Por último a temperatura ambiente se midió la DQO.



Figura 26. Termorreactor y multiparamétrico para determinación DQO, Nt y Pt.

SST: los sólidos suspendidos fueron determinados a través del filtrado en papel especial y secado a estufa a 105°C hasta peso constante (Fig. 26), con el auxilio fundamental de una bomba de vacío, una estufa de secado, desecador y balanza de precisión de cuatro decimales.



Figura 27. Equipo de laboratorio para determinar sólidos suspendidos.

Las variables temperatura ($T^{\circ}\text{C}$), pH, conductividad eléctrica (CE), se midieron utilizando equipos portátiles (APHA-AWWA-WPCF. 1998). Para estas variables se realizó una medición general por humedal por día durante 4 días y la muestra de obtuvo del centro de cada humedal.

Se recopiló la información y los datos se analizaron según Infostat (2013).

V- RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1. Evaluación de parámetros físico-químicos y biológicos

A los fines de evaluar el comportamiento de éste trabajo se midieron las concentraciones de: DBO_5 , DQO, SST, SSed, CT, CF, Nt y Pt. Al mismo tiempo se midieron parámetros como pH, $T^{\circ}\text{C}$ y CE. Estos datos se analizaron en primera instancia a través de una estadística descriptiva utilizando el paquete estadístico llamado medidas resumen del Infostat (Anexo 1).

Observando los resultados de este primer análisis, para SST (Tabla 3) se obtuvo una media de 49 mgL^{-1} , que si bien es más alta que la obtenida por Lara (1999), el cual encontró efluentes con concentraciones inferiores a 20 mgL^{-1} , y que otros estudios recopilados por

EPA (2000) que reportan un rango entre 3 mgL⁻¹ y 23 mgL⁻¹; concuerda con el encontrado por Ávalos (2005) quien en promedio obtuvo efluentes con 40 mgL⁻¹. La eficiencia en la remoción de SST fue del 66%, valor que se encuentra por debajo de los obtenidos por Morel y Diener (2006), y por Ridderstolpe (2004) los cuales obtuvieron valores que se encuentran dentro de un rango que abarca desde 80 % hasta 90 %.

Tabla 3 . Evaluación, resumen de medidas y remoción de SST.

LECTURA	SST (mg/L)	Remoción (%)
ENTRADA		
UNICA	148	
SALIDAS		
H 1	65	56
H 2	30	80
H 3	60	59
H 4	50	66
H 5	38	74
H 6	54	64
Promedio	49	66
Máximo	65	80
Mínimo	30	56

En la Tabla 4, se presentan los valores de SS_{sed} para los 6 humedales. El promedio cuando solo se consideró un tiempo de sedimentación de 60 min fue de 0,05 mL⁻¹. Se observa en la Fig. 28 la sedimentación a la entrada (1) y a la salida (2) de una muestra tomada del humedal 1, donde se representa la alta eficiencia de remoción obtenida; la cual se promedia para esta experiencia en un 95 %. Los valores de remoción fueron fluctuando entre un 93 % y 98 %, por lo tanto tuvieron un mejor comportamiento si se los compara con los valores obtenidos por Gorga *et al* (2005) y Cornejo (2011) quienes registran eficiencias de remoción cercanas al 70 %.



Figura 28. SSed recogido en cono Imhoff en la Planta de Tratamiento y Reutilización de Efluentes de la UNRC.

Tabla 4. Evaluación, resumen de medidas y remoción de SSed.

Lecturas	Sólidos sedimentables		
	Tiempo (min)	Sól. Sed.(mL)	
Entrada			
Única	10	0,5	
	60	1	
Salida			Remoción (%)
H1	10	0,05	90
	60	0,05	95
H2	10	0,05	90
	60	0,07	93
H3	10	0,02	96
	60	0,02	98
H4	10	0,05	90
	60	0,05	95
H5	10	0,02	96
	60	0,05	95
H6	10	0,02	96
	60	0,05	95
Medidas resumen	Promedio	0,05	95
	Máximo	0,07	98
	Mínimo	0,02	93

Para hacer referencia a los microorganismos patógenos (Tabla 5) se presentan los valores de coliformes a la entrada de los humedales (Afluente) y a la salida de los mismos (Efluente). Se observa que los valores obtenidos de coliformes totales no sobrepasaron nunca los 460000 NMP/100 mL y en promedio los humedales redujeron la cantidad de coliformes totales a 433000 NMP/100 mL. En Córdoba, Nadal *et al* (2010) encontraron a la salida del tratamiento, valores que variaron entre 1000000 NMP/100 mL y 300000 (NMP/100 mL).

La eficiencia de remoción de CT obtenida en este estudio fue de 82%, superando la encontrada por Chaparro y Ospina (2005) en Colombia, quienes registraron valores de 48% , al igual que la encontrada por Flores *et al* (2010) donde para CT no se sobrepasó los 55 % de remoción; pero coincidente con la encontrada en México por Martínez *et al* (2006) en humedales artificiales con juncos como vegetación principal.

Tabla 5. Presencia, resumen de medidas y remoción de coliformes totales y fecales.

ENTRADA HUMEDALES	Coliformes (NMP/100 mL)		Remoción (%)	
	Totales	Fecales		
	2,40E+06	2,30E+05		
Coliformes (NMP/100 mL)			Remoción (%)	
SALIDA HUMEDALES	Totales	Fecales		
			Col. Totales	Col. Fecales
H1	4,60E+05	9,50E+04	81	59
H2	4,10E+05	9,00E+04	83	61
H3	4,60E+05	9,20E+04	81	60
H4	4,30E+05	9,30E+04	82	60
H5	4,00E+05	9,10E+04	83	60
H6	4,40E+05	9,20E+04	82	60
Promedio	4,33E+05	9,22E+04	82	60
Máximo	4,60E+05	9,50E+04	83	61
Mínimo	4,00E+05	9,00E+04	81	59

La presencia de coliformes da evidencia de contaminación fecal e indica que hay presencia de organismos potencialmente patógenos, pero incluye a todas las bacterias, las que corresponden a heces, suelo y otras fuentes. Es por eso que para determinar aquellas bacterias que provienen solo de las heces humanas y de animales de sangre caliente (Báez, 2008), se analizaron los coliformes fecales. Para esta variable se encontraron valores que están dentro de un rango que va desde 90000 NMP/100mL a 95000 NMP/100mL,

promediándose en 92200 NMP/100mL. Si bien los humedales artificiales son en general capaces de reducir los valores de CF entre uno a dos logaritmos con TRH de 3 a 7 días (Lara, 1999), en esta experiencia se pudo lograr esta reducción utilizando solo un día de TRH. Salazar *et al* (2013) y Espinosa *et al* (2007) han encontrado valores mucho más pequeños como 1600 NMP/100mL y 140 NMP/100mL respectivamente, pero el TRH utilizado por ellos fue mucho más grande alcanzando en algunos casos los 15 días. En definitiva, se pudo comprobar que la capacidad de remoción de coliformes fecales fue en promedio 60 % coincidiendo con la eficiencia que obtuvieron en México, Flores *et al* (2010).

Para evaluar la carga orgánica (Tabla 6) se utilizaron las dos variables más importantes DQO y DBO₅. Según Lahora (1999) en los humedales artificiales se consiguen valores de DQO de salida próximos a 125 mgL⁻¹, excepto en los meses invernales donde puede ser mayor. Esto no coincide con los resultados obtenidos en el presente estudio en que los humedales mostraron respecto a esta variable un mejor comportamiento, donde los valores correspondientes a la salida fueron variando entre 44 mgL⁻¹ y 70 mgL⁻¹, lograndosé por lo tanto un efluente con concentraciones promedio de 58 mgL⁻¹.

Tabla 6. Evaluación de la carga orgánica, eficiencia de remoción y resumen de medidas.

LECTURA	DQO (mg/L)	Remoción (%)	DBO ₅ (mg/L)	Remoción (%)
Entrada				
UNICA	210		113	
Salida				
H 1	61	73	44	61
H 2	57	72	32	72
H 3	70	67	51	55
H 4	44	79	24	79
H 5	50	76	31	73
H 6	67	68	45	60
Promedio	58	72	38	67
Máximo	70	79	51	79
Mínimo	44	67	24	55

La eficiencia de remoción que tienen los humedales con respecto a la DQO depende muchas veces del sustrato utilizado, en este caso se obtuvo una eficiencia promedio del 72 %, coincidiendo con los valores encontrados por Narváez *et al* (2009) quienes remarcan además que el depurador más importante fue el sustrato conformado por arena. En este estudio también se utilizó arena no como sustrato, si no como base de los humedales y sostén del polietileno cobertor, pero puede atribuirse a ese material como agente contribuyente a este efecto de remoción encontrado.

Respecto a la DBO₅ los valores encontrados a la salida fueron un mínimo de 24 mgL⁻¹ y un máximo de 51 mgL⁻¹. Se obtuvo un efluente con un valor promedio de 38 mgL⁻¹ el cual se encuentra aproximadamente 18 mgL⁻¹ por encima del valor encontrado por la EPA (2000), como resultado del funcionamiento de 25 humedales de flujo superficial; pero es inferior al reportado por Nadal *et al.* (2010) quienes registraron valores de salida de 60 mgL⁻¹ de DBO₅. Si se hace referencia a la eficiencia de remoción de DBO₅, Montoya y Ramírez (2010) concuerdan en que ésta aumenta con el tiempo de retención y la temperatura, pudiendo variar su valor de un 60% a un 80%, rango dentro del cual se encuentran los valores hallados en esta experiencia, ya que en promedio se obtuvo una eficiencia del 67%.

Entre los nutrientes más importantes en la contaminación del agua se puede comenzar mencionando el comportamiento del Pt. En esta experiencia los valores de Pt que se obtuvieron (Tabla 7) se encontraron dentro un intervalo que va desde 2,5 a 3 mgL⁻¹. Los registros obtenidos en este estudio superan a los reportados por Romero *et al.* (2009) quienes lograron efluentes con concentraciones que varían entre 0,7 mgL⁻¹ y 0,87 mgL⁻¹, pero son muy similares a los obtenidos por Morante y Morales (2010) cuando promediaron el funcionamiento de 14 humedales.

Tabla 7. Evaluación del contenido de fósforo total, su remoción y resumen de medidas.

Humedal	Entrada	Salida	Remoción (%)
	(mg/L) de Pt		
1	3,2	3	6
2	2,8	2,5	11
3	2,9	2,7	7
4	2,9	2,5	14
5	3	2,7	10
6	2,7	2,6	4
Medidas Resumen	Promedio	2,7	9
	Máximo	3	14
	Mínimo	2,5	4

La remoción de fósforo en la mayoría de los sistemas de humedales artificiales no es muy eficaz debido a las pocas oportunidades de contacto entre el agua residual y el terreno (Lara,

1999). Según una compilación de datos que generaron Pabello y Carrillo (2004), actualmente los humedales en distintas zonas del mundo suelen remover el Pt en un 50%. En cambio, en esta experiencia como eficiencia de remoción se han encontrado valores menores, que se promedian en 9 %, coincidiendo con los obtenidos por Romero *et al.* (2009) y por Miglio (2007) quienes encontraron en sus experiencias eficiencias entre 3 y 40%.

Si hacemos referencia a otro nutriente importante se puede mencionar al Nt. Como se observa en la Tabla 8 se puede decir que para este nutriente la concentración en el efluente varió de 59 a 69 mgL⁻¹, obteniéndose por lo tanto un agua tratada con un promedio de 63 mgL⁻¹ de Nt, valor que está por encima de la concentración encontrada por distintos autores (Pabello y Castañeda, 2014; EPA, 2000) quienes citan valores entre 9 y 30 mgL⁻¹ de Nt, pero es similar y/o relativamente menor a registros obtenidos en un sistema de humedales por García y Correa (2006), quienes obtuvieron en promedio un valor de efluente de 77 mgL⁻¹ de Nt.

En los sistemas de humedales el potencial de remoción del nitrógeno puede tomar varios años en desarrollarse; por lo menos se requiere dos o tres etapas de crecimiento de las plantas, sistemas de raíces y capa de residuos para alcanzar el equilibrio (Cardona y Vanegas, 2009). En esta experiencia con un solo ciclo de crecimiento, se obtuvo una eficiencia promedio del 21 %, la cual resulta muy baja en comparación con el valor citado por Lara (1999), como rendimiento esperado de un humedal el cual puede alcanzar un 80% de remoción, pero se encuentra dentro del rango citado por Morel y Diener (2006) quienes registran en sus experiencias entre un 15 % - 40 % de remoción de Nt.

Tabla 8. Evaluación del contenido de Nt, su remoción y medidas resumen.

Humedal	Entrada	Salida	Remoción (%)
	(mg/L) de Nt		
1	75	62	17
2	90	69	23
3	72	62	14
4	84	61	27
5	85	59	30
6	75	63	16
Medidas resumen	Promedio	63	21
	Máximo	69	30
	Mínimo	59	14

Considerando los parámetros físicos y químicos (Tabla 9) se puede decir que los valores de pH encontrados (pH 7- 8,6) están dentro de lo esperado en estos sistemas, puesto que las plantas por actividad fotosintética generan un equilibrio buffer y no permiten que el pH normalmente baje, y por lo tanto que la actividad de los microorganismos se vea afectada

(Montoya *et al*; 2010). La CE resultó en un promedio de 853 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y no sobrepasó nunca los 920 $\mu\text{S}/\text{cm}$, este parámetro resultó normal para este estudio de humedales, más aun considerando que las especies utilizadas en el sistema soportan alto contenido de sales; por ejemplo las *Lemnas* puede crecer en condiciones donde la CE alcance los 4000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Montúa, 2012). Por último la $T^{\circ}\text{C}$ en promedio fue de 19°C coincidiendo también con la temperatura normal de los humedales en la época del año de muestreo.

Tabla 9. Medición de $T^{\circ}\text{C}$, pH y CE durante 4 días y sus medidas resumen.

Identificación de Humedales	Temperatura t	pH	Cond. Eléctrica CE
	($^{\circ}\text{C}$)		($\mu\text{S}/\text{cm}$)
Viernes 15			
1	20	7,6	790
2	17	7,5	790
3	19	7,6	890
4	17	7,5	920
5	18	7,3	890
6	21	7,2	890
Sábado 16			
1	20	7,7	820
2	18	8	910
3	19	7,8	850
4	17	7,9	880
5	17	8,2	880
6	20	8,1	870
Domingo 17			
1	20	8,3	880
2	19	8,5	820
3	20	8,6	830
4	18	8,6	820
5	19	8,5	810
6	19	8,5	820
Lunes 18			
1	19	8,6	860
2	17	8,4	900
3	19	8,4	840
4	17	8,3	850
5	17	8,4	820
6	19	8,3	830
Promedio	19	8	853
Máximo	21	8,6	920
Mínimo	17	7,2	790

5.2 Análisis estadístico

Con el objetivo de determinar la capacidad depuradora que poseen ambos tratamientos, se hizo un análisis estadístico univariado, analizando las siete variables que representan los contaminantes más importantes de las aguas residuales utilizando el modelo estadístico correspondiente al Diseño Completamente al Azar (DCA).

A cada una de las siete variables se les realizó un análisis de la varianza paramétrico (ANOVA) y a los fines de comprobar su validez, se realizó la comprobación de los supuestos de Independencia, Normalidad de residuos (Shapiro-Wilk) y Homocedasticidad (Test de Levene) (Anexo 2).

5.2.1 SST

Al analizar los valores que se obtuvieron del ANOVA se pudo establecer que existen diferencias estadísticamente significativas, con un $p = 0,0432$ (Anexo 11), para comprobar que los tratamientos se comportan de diferente manera a la hora de remover los SST.

Para determinar cuál de los dos tratamientos tiene un mejor comportamiento se realizó un gráfico de barras (Fig.29), en el cual se expresa el valor de entrada (afluente) y los valores correspondientes a la salida de cada humedal (efluente). Si se observa el gráfico se puede ver con facilidad que el tratamiento que logró reducir con mayor eficiencia este contaminante fue el tratamiento Lemnas + Juncos (L+J). Este tratamiento consiguió una reducción promedio del 73 % y logró un efluente con concentraciones en todos los muestreos con menos de 50 mgL^{-1} . Por el contrario, el tratamiento de Lemnas (L) logró una eficiencia promedio del 60 % obteniéndose de su efluente agua con concentraciones mayores a 50 mgL^{-1} llegando a valores máximos de 65 mgL^{-1} . Esta mayor remoción obtenida en el tratamiento L+J se debe a que el mayor sistema radical que proporcionan los juncos, no solo sirve como trampa de sedimentos si no que genera una mayor área para la concentración de microorganismos, y son éstos quienes crean paredes biológicas que facilitan la sedimentación de las partículas jugando un papel importante en la remoción de SST (Cardona y Vanegas, 2009).

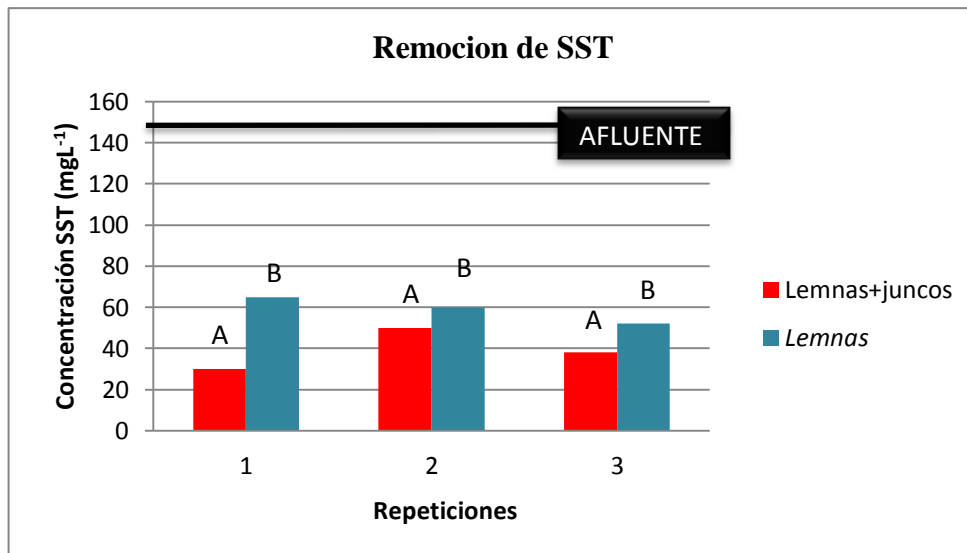


Figura 29. Remoción de SST en humedales artificiales.

Nota: Letras iguales determina que no hay diferencias entre tratamientos.

5.2.2 Materia orgánica

A través del ANOVA se puede decir que los tratamientos no difieren a la hora de remover DQO, ya que no se encontraron diferencias estadísticamente significativas, con un $p = 0,0826$ (Anexo 12); pero a la hora de remover DBO_5 los tratamientos lo realizan de distinta manera, es por eso que el análisis arrojó diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos para esta variable, con un $p = 0,0051$ (Anexo 13).

Se realizó un gráfico de barra en el cual se representan los valores de DQO y DBO_5 para cada tratamiento y repetición, donde se comparan el valor de entrada (afluente) con los valores de salida (efluentes).

Si se analizan las 3 repeticiones de cada tratamiento correspondientes a la variable DQO (Fig.30) se puede observar que el afluente, que contenía una DQO de 210 mgL^{-1} , fue reducido en el tratamiento *Lemnas* + juncos (L+J) a un valor promedio de 50 mgL^{-1} , lográndose por lo tanto una eficiencia de remoción promedio del 76 %. El tratamiento conformado por *Lemnas* (L) logró reducir la contaminación del afluente a 66 mgL^{-1} y lo hizo con una eficiencia menor que se promedio en 69 %. Esta diferencia encontrada entre tratamientos no es suficiente para decir que ambos se comportan diferentes. Pero cabe destacar que los valores de contaminación más bajos se encontraron en el tratamiento L + J.

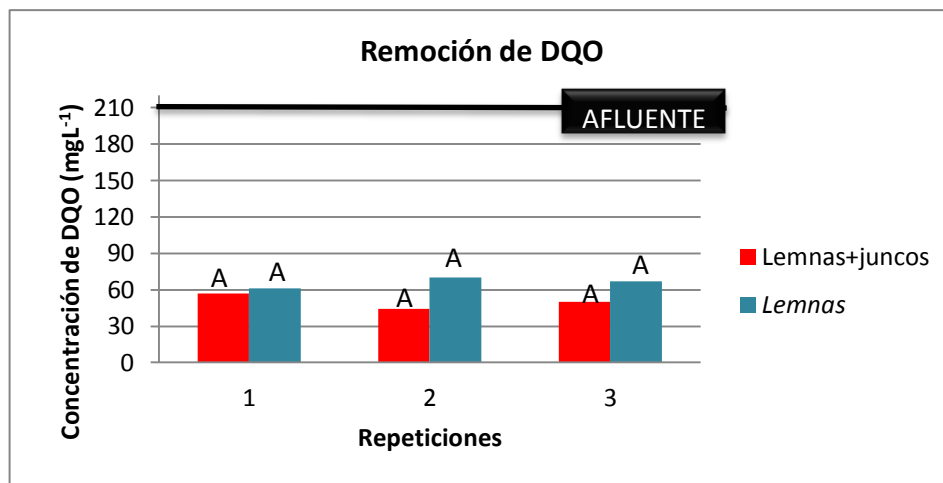


Figura 30. Remoción de DQO por medio de humedales artificiales.

Nota: Letras iguales determina que no hay diferencias entre tratamientos.

Si se hace referencia al gráfico correspondiente a DBO₅ (Fig.31) se puede observar un mejor comportamiento del tratamiento *Lemnas* + Juncos (L+J). Los valores más bajos de DBO₅ fueron logrados por el tratamiento L + J donde el efluente registró un promedio de 29 mgL⁻¹. Diferente fue el comportamiento que logró el tratamiento con *Lemnas* (L) donde todos los valores sobrepasaron los 40 mgL⁻¹ y llegó en una muestra a un valor de 51 mgL⁻¹. Teniendo en cuenta el valor del afluente, el cual contenía 113 mgL⁻¹ de DBO₅, y la capacidad de cada tratamiento para reducir dicho valor se puede destacar la alta eficiencia del tratamiento L+J, el cual logro en promedio un 75% de remoción, valor que se encuentra muy por encima del obtenido por el tratamiento con *Lemnas*, el cual solo registró una eficiencia de 59%.

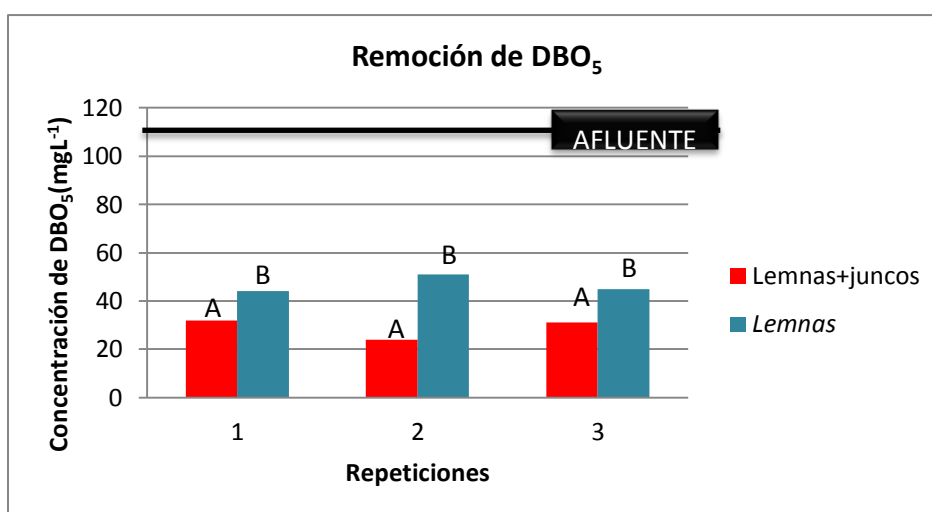


Figura 31. Remoción de DBO₅ en mgL⁻¹ por medio de humedales artificiales

Nota: Letras iguales determina que no hay diferencias entre tratamientos.

La capacidad de remoción de materia orgánica se debe a los efectos combinados entre el TRH, la acción filtrante del sustrato para retener sólidos suspendidos del agua y la actividad biológica del sistema (Romero *et al*, 2009). Si se tiene en cuenta que el TRH y el sustrato utilizado en ambos tratamientos fue el mismo, la mayor remoción obtenida por el tratamiento *Lemnas* + juncos (L + J), para ambas variables, se debe a la mayor actividad biológica. Esta mayor actividad biológica está dada por la capacidad que tienen las macrófitas (juncos) de transmitir el oxígeno desde la superficie hasta las raíces, originando zonas aeróbicas donde se instalan las colonias de microorganismos encargadas de degradar esta materia orgánica.

5.2.3 Microorganismos patógenos

Si se analizan los valores arrojados por el ANOVA se puede asegurar- según el Anexo 14 - que los tratamientos se comportan de diferente manera a la hora de remover CT ($p = 0,047$). En cuanto a remoción de CF (Anexo 15) no se obtuvieron diferencias estadísticamente significativas ($p = 0,2302$) entre tratamientos, por lo tanto se comportarían de la misma manera.

Si se observa el gráfico correspondientes a CT (Fig.32) se puede analizar en primera instancia, que ambos tratamientos lograron valores por debajo de 500.000 NMP/100ml. Si se añade a este análisis el de los datos correspondientes a cada muestreo, se puede decir que el tratamiento *Lemnas* + juncos (L + J) pudo remover esos 2.400.000 NMP/100mL de CT que se encontraban en el afluente, hasta lograr un promedio de 413.000 NMP/100mL, en cambio el tratamiento *Lemnas* (L) logro reducirlo a un valor mayor, 453.000 NMP/100mL. La eficiencia de remoción que alcanzo el tratamiento L + J fue de 83% y el tratamiento correspondiente a L logró un 81% de remoción. Diferencia que es suficiente para recomendar el tratamiento L + J.

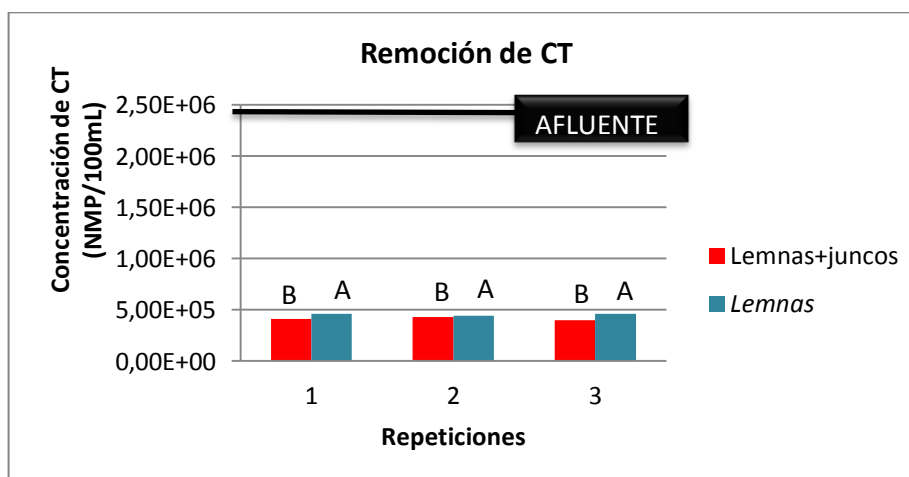


Figura 32. Remoción de coliformes totales por medio de humedales artificiales.

Nota: Letras iguales determina que no hay diferencias entre tratamientos.

Si se analiza el gráfico correspondiente a CF (Fig.33) se puede observar que no existen grandes diferencias entre tratamientos, si bien se observan valores con una tendencia a ser más pequeños en el tratamiento L + J, ambos se comportan de manera muy similar en la remoción de CF. Si se tiene en cuenta que el afluente contenía 230.000 NMP/100ml de CF los humedales lograron reducirlo a un valor promedio de 94.000 NMP/100ml en el tratamiento L y a 91.500 NMP/100ml de CF en el tratamiento L + J. Las eficiencias de remoción de CF oscilaron entre 59 % y 61 % en ambos tratamientos.

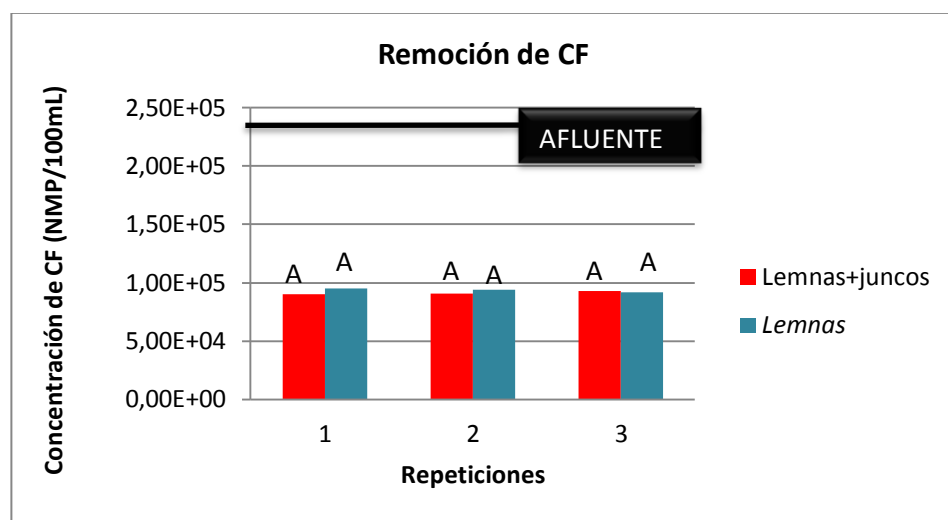


Figura 33. Remoción de coliformes fecales por medio de humedales artificiales.

Nota: Letras iguales determina que no hay diferencias entre tratamientos.

5.2.4 Nutrientes

Al analizar los resultados que entrega el ANOVA de los dos nutrientes más importantes como contaminantes del agua (N y P), se puede decir que se encontraron diferencias altamente significativas entre tratamientos (Anexo 16) cuando remueven Nt ($p=0,0076$) y diferencias significativas (Anexo 17) para la remoción de Pt ($p=0,0158$).

Para determinar cuál de los dos tratamientos se comporta de mejor manera se analizan los gráficos de barras que se ven a continuación. En los gráficos se puede observar que tanto para Nt (Fig.34) como para Pt (Fig.35) existe para cada humedal un valor de entrada y su respectivo valor de salida.

Si se observan las barras correspondientes a Nt se puede deducir que la eficiencia es mucho mayor en el tratamiento *Lemnas + juncos* (L + J), por que se percibe fácilmente mayor

diferencia entre el afluente y el efluente. Si se demuestra con números, el tratamiento L + J como valor promedio de remoción logró un 27 %, por el contrario el tratamiento *Lemnas* (L) solo alcanzó un 16 %. También se puede observar que en el tratamiento L + J el agua entraba con mayor contenido de Nt y así mismo logró remover esos 80 - 90 mgL⁻¹ a valores como 59 mgL⁻¹ y 61 mgL⁻¹ excepto en una repetición donde llegó a 69 mgL⁻¹. El afluente del tratamiento L tuvo concentraciones ligeramente menores que se promediaron alrededor de 74 mgL⁻¹ de Nt y logró reducirlo a valores muy similares al tratamiento L + J promediándose en 62 mgL⁻¹ de Nt.

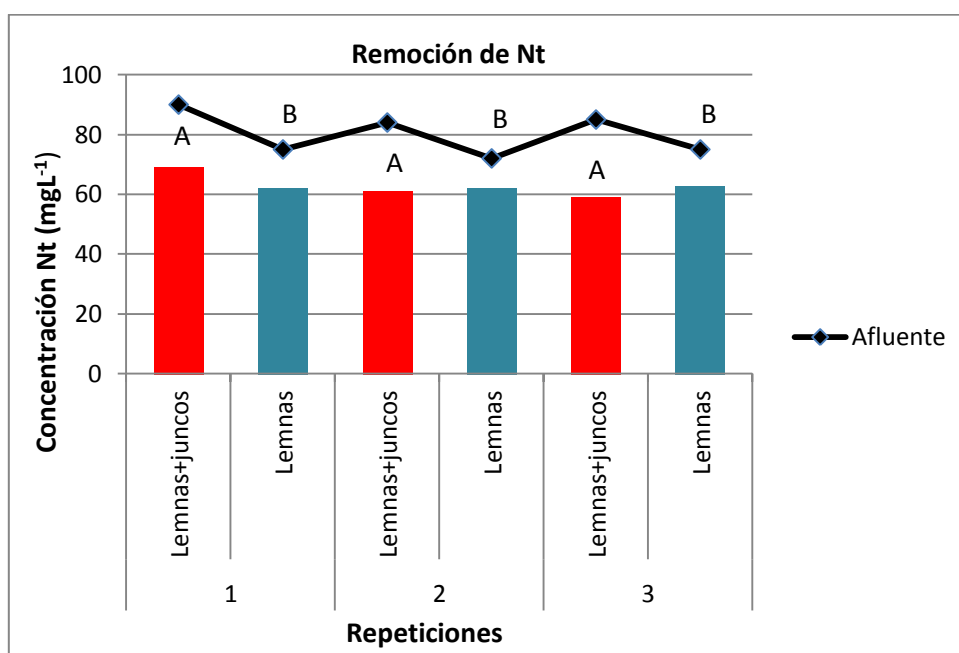


Figura 34. Remoción de Nt por medio de humedales artificiales.

Nota: Letras iguales determina que no hay diferencias entre tratamientos.

Con respecto al Pt se puede observar que si bien existen diferencias en los gráficos estas no son tan notables, pero si se observa detalladamente se puede deducir que al igual que para Nt la mayor diferencia entre la concentración de Pt del afluente y el efluente se encuentra en el tratamiento *Lemnas* + Juncos (L + J). Si se corrobora con los datos podemos encontrar que la eficiencia de remoción de Pt es de 12 % en el tratamiento L + J y solo un 6 % en el tratamiento *Lemnas* (L). Si analizamos la concentración de Pt en la salida podemos observar mediante el gráfico que es muy similar en ambos tratamientos pero hay una tendencia a ser menor en el tratamiento L + J, analizando los datos vemos que en promedio el tratamiento L logro reducir el Pt a 2,8 mgL⁻¹ y el tratamiento L+J a 2,6 mgL⁻¹

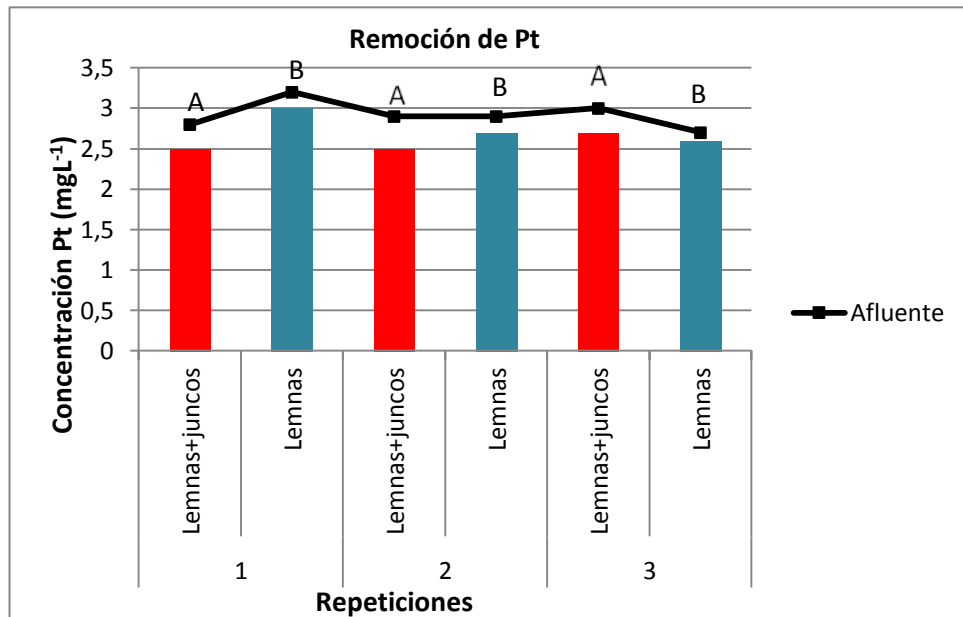


Figura 35. Remoción de Pt por medio de humedales artificiales.

Nota: Letras iguales determina que no hay diferencias entre tratamientos.

VI- Conclusiones

- El tratamiento híbrido conformado por *Lemnas* + Juncos (L + J), tuvo un mejor comportamiento en la remoción de la mayoría de los contaminantes, respecto al tratamiento conformado solo por *Lemnas* (L).
- La remoción de coliformes fecales fue adecuada para reutilizar el agua para riego en cultivos extensivos y en silvicultura, aunque no suficiente para ser reutilizada en cultivos para consumo directo o espacios públicos. A tal fin, sería aconsejable - tal cual se hace en este proyecto - derivar el agua luego de pasar por los humedales, a un par de lagunas facultativas en las que permanece con un TRH de 13 días cada una, removiendo el 100 % de coliformes fecales.
- El empleo de tecnologías de tratamiento no convencionales de bajo costo como son los humedales artificiales, resultó ser una herramienta eficiente al momento de resolver los problemas de contaminación de las aguas residuales.

VII- Bibliografía

1. ALONSO, J. 2013. **Humedales artificiales como sistemas naturales de depuración de aguas residuales. Concepto e Historia.** En: <http://www.madrimasd.org/blogs/remtavares/2013/05/16/131891>. Consultado: 13/10/2013.
2. APHA-AWWA-WPCF. 1998. **Standar methods for the Examination of Water and Wastewater**, 16 Ed. Washington , E.U.A.
3. ARIAS, C Y H, BRIX. 2003. **Humedales para el tratamiento de aguas residuales.** Revista Ciencia e Ingeniería Neogranadina. N° 13. p17-24. Universidad Militar. Nueva Granada. Colombia.
4. ARROYAVE, Ma. 2004. **La Lenteja de Agua (*Lemna minor L*): una planta acuática promisoría.** Revista EIA (Escuela de Ingeniería de Antioquia). N°1. p 33-38. Medellín. Colombia.
5. AVALOS, C. 2005. **Tratamiento terciario del efluente de La Planta de Tratamiento de Aguas Residuales El Cortijo para uso agrícola con humedales construidos de flujo superficial.** Trabajo presentado AL XXI Congreso Interamericano de Ingeniería química.
6. BAEZ, M.2008. **Calidad microbiológica del Agua.** Salud Pública y Saneamiento ambiental. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá.
7. BEASCOECHEA, E Y J, FERNANDEZ GOMEZ. 2005. Reportaje: **La depuración del agua mediante filtros verdes en el medio rural: El problema de las Aguas Residuales.** De JFGC Producción. En: http://www.magrama.gob.es/ministerio/pags/Biblioteca/Revistas/pdf_AM%2FAM_2005_42_55_57.pdf. Consultado: 22/11/2013.
8. BEASCOECHEA, E; J, MUÑOZ Y Ma, CURT FERNANDEZ. 2003. **Filtros de macrófitas en Flotación.** Manual de fitodepuración. Universidad Politécnica de Madrid. España.
9. BERNAL, D; D, CARDONA; A, GALVIS; M, PEÑA. 2003. Guía de Selección de Tecnología para el Tratamiento de Aguas Residuales Domesticas por Métodos Naturales. **Seminario Internacional sobre Métodos Naturales para el Tratamiento de Aguas Residuales.**19-20 Universidad del Valle. Cali. Colombia.
10. CAMPOS, R 2005. **Evaluación de la operación, mantenimiento y mejoramiento de 12 plantas de Tratamientos de Aguas Residuales en Guatemala, El Salvador y Honduras.** Copyright. Turrialba. Costa Rica.
11. CARDONA, L Y C, VANEGAS.2009. **Evaluación de la eficiencia de remoción de materia orgánica en humedales de flujo horizontal subsuperficial alimentados con agua residual sintética.** Tesis para optar al título de Tecnólogo químico. Universidad Tecnológica de Pereira.
12. CARRANZA, M; R, PEREZ; K, RIBERA; N, SANCHEZ; D, VALDEZ Y G, ZAMBRANO. 2014. **Calidad del Agua.** Uso del Agua y Normativa de Calidad. Universidad técnica estatal de Quevedo. Facultad de Ciencias Ambientales. Carrera: Gestión Ambiental. Ecuador.
13. CHAFLOQUE, W y E, GOMEZ 2006.**Diseño de Humedales Artificiales Para el Tratamiento de Aguas Residuales en la UNMSM.** Revista del Instituto de Investigación de Lima. Perú.
14. CHAPARRO, T e I, OSPINA. 2005. **Humedales artificiales de flujo vertical para mejorar la calidad del agua del Rio Bogotá.** Revista Ciencia e Ingeniería Neogranadina. N° 15. p 78-84. Universidad militar Nueva Granada. Bogotá. Colombia.
15. CORNEJO, G. 2011. **Tratamiento de Efluentes de la granja porcina del Instituto Redentores Mater y Juan Pablo II de Ventanilla a través de**

- humedales artificiales para su reutilización como agua de clase III.** Facultad de Ingeniería Ambiental y de Recursos Naturales. Universidad Nacional del Callao.
16. CRESPI, R., C. RODRÍGUEZ, O. PLEVICH, L. GROSSO, M. BOSSOLASCO, C. FRIGERIO, A. THUAR, J. BOEHLER, J. PUIATTI, O. BAROTTO, M. DEMAESTRIS, A. RICOTTO, D. RAMOS Y D. PICCA. 2005. **Tratamiento y reutilización de aguas residuales domiciliarias.** XX CONAGUA. 14 pág. en CD. Calidad N° 22. Mendoza. Argentina.
 17. DE MATOS, A.; W. FREITAS Y A. BORGES. 2011. **Estudio Cinético de Remocao de Materia Orgánica de Aguas Residuarias da Suinocultura em Sistemas Alagados Construidos Cultivados com Diferentes Especies Vegetais.** Eng. Agric. Jaboticabal V.31. N°6. p 1179-1188. Brasil.
 18. DEL CISNE, M Y E, CAMPOVERDE. 2012. **Fitorremediación mediante el uso de dos especies vegetales *Lemna minor* (Lenteja de Agua) y *Eichorina crassipes* (Jacinto de agua) en aguas residuales producto de la actividad minera.** Tesis previa a la obtención del título de Ingeniero ambiental. Universidad Politécnica Salesiana. Cuenca.
 19. DELGADILLO, O., A. CAMACHO, L. PÉREZ Y M. ANDRADE. 2010. **Depuración de aguas residuales por medio de humedales artificiales.** S. Téc. Centro Agua. p 107. Cochabamba. Bolivia.
 20. DELGADO, C; C, FALL; Ma, MOLEÓN; Ma, ALBERICH; S, HOYOS; C, VASQUEZ Y D, PULIDO. 2003. **Agua Potable para comunidades rurales, reuso y tratamientos avanzados de Aguas Residuales Domésticas.** Capítulo 20. Toluca, México.
 21. DOTRO, G; O, TUJCHNEIDER; M, PARIS; A, FAGGI Y N, PIOVANO. 2010. **Tratamiento de efluentes de curtiembre con humedales construidos.** Revista Calidad de vida. Universidad de Flores. Año1. N°4 .p 77-92.
 22. EPA. 2000. **Humedales de Flujo libre superficial.** Folleto Informativo de Aguas residuales. Estados Unidos Protección ambiental. Washington. p 1y2.
 23. ESPINOSA, M; L, SANCHEZ Y P, CRUZ. 2007. **Uso de Macrófitas acuáticas en el tratamiento de aguas para el cultivo de maíz y sorgo.** Suplemento hidrobiológico. N° 17. p 7-15.
 24. ESTEVES, L y M, FALESCHINI. 2011. La generación de efluentes cloacales y el reuso del agua. .Programa nacional de radares meteorológicos. **Hydria**(36):23-25
 25. ESTRADA, I. 2010. **Monografía sobre Humedales Artificiales de flujo subsuperficial (HAFSS) para remoción de metales pesados en Aguas residuales.** Universidad Tecnológica de Pereira. Facultad de Tecnologías. Pereira. Colombia. 50.
 26. FERNANDEZ, Ma. 1999. **Desarrollo de procedimientos para el Tratamiento de efluentes de quesería.** Universidad Complutense de Madrid. Facultad de Veterinaria. Madrid. España.
 27. FLORES, E; E, VALDERRAMA; P, LEMUS; P, GRACÍA; A, SARABIA; Ma E, PEREZ Y R, ORTEGA. 2010. **Aplicación de humedales artificiales para el tratamiento del agua residual de casa- habitación en áreas Rurales.** Proyecto de Conservación y Mejoramiento del Ambiente, ENEP Iztacala UNAM. México.
 28. FRERS, C. 2008. **El uso de plantas acuáticas para el tratamiento de aguas residuales.** En: <http://www.produccion-animal.com.ar/sustentabilidad/71-humedales.pdf>. Consultado: 24/10/2013.

29. GARCÍA J., J. MORATÓ Y J. BAYONA. 2003. **Depuración con sistemas naturales: humedales construidos**. Universidad Politécnica de Catalunya, En: http://area.us.es/ciberico/archivos_word/99b.doc. Consultado: 12/05/2012
30. GARCIA, D Y D, CORREA.2006. **Desarrollo de un humedal artificial piloto con especies no convencionales para mitigar la contaminación generada por el vertimiento de aguas residuales provenientes del centro de visitantes del Parque Nacional Natural Amacayacú**. Amazonas. Universidad de la Salle. Facultad de Ingeniería Ambiental y Sanitaria. Bogotá.
31. GIACOMAN, G., F. TAPIA y M. CABALLERO. 2010. **Alternativa para controlar la contaminación por las aguas residuales urbanas en el municipio de Campeche**. Desarrollo urbano y Rural. Revista Fomix. México.
32. GIJZEN, H. 1998. **Lenteja de agua: Planta para aguas residuales**. Agencia AUPEC. Ciencia al día. En: <http://aupec.univalle.edu.co/informes/julio98/lenteja.html> Consultado: 13/01/20014.
33. GOMEZ, I. 2003. **Saneamiento Ambiental**. Universidad Estatal a Distancia de Costa Rica. EULAC. p 49.
34. GORGA, M; M, GELPI; M, CHEVALIER; F, ROJAS; G, PICCINI; N, BATOLUCCI; F, HALGARTEN; N, CAYOLO; N, SIRICZMAN; C, VILLASECO; A, LUCIFORA; A, ACOSTA Y J, GONZALES. 2005. **Biorremediación aplicable: humedales artificiales**. 2º Premio Argentino junior del Agua 2005.AIDIS Argentina. Comisión WEF.
35. KADLEC, R Y KNIGHT, R cit. en **Depuración de las Aguas Residuales de una Población mediante humedales artificiales**. En: upcommons. Upc.edu / pcf/bitstream/ 2099.1/10034 /2/ anexos % 20 A_B_C pdf. Consultado el 04/ 01/ 12.
36. LAHORA, A. 2003. **Depuración de Aguas Residuales mediante Humedales artificiales: La EDAR de los Gallardos (Almería)**. UNLAR. Argentina.
37. LARA, J. 1999. **Depuración de Aguas Residuales Municipales con humedales Artificiales**. Tesis para optar a Máster en Ingeniería y Gestión Ambiental. Universidad Politécnica de Cataluña. Barcelona.
38. LEÓN, C Y D, CHAVEZ.2010.**Tratamiento del agua residual vacuno utilizando microalgas, la lenteja de agua *lemna aequinoctiales* y un humedal superficial en Costa Rica**. Revista Latinoamericana Biotecnológica Ambiental y Algal. Universidad Nacional Heredia. Costa Rica.
39. MARTINEZ, P; M, RAMOS Y L, RODRIGUEZ. 2006. **Humedales artificiales como alternativa para mejorar la calidad del agua**. III Encuentro Participación de la Mujer en la Ciencia. En: congresos.cio.mx/3_enc_mujer/files/extensos/.../S3-FMCT03.doc Consultado: 13/02/2014.
40. MERINO,L ; M, FERNANDEZ ; J,CAMPOS ; J,CHORDI ; J, GETA; J,TORROBA ; G,MARTINEZ Y J, LOPEZ.2003.**La Depuración de Aguas Residuales Urbanas de pequeñas Poblaciones mediante Infiltración Directa en el terreno**. Publicación del Instituto Geológico y Minero de España. Serie Hidrogeología y aguas subterráneas nº 4. Madrid .9
41. MONTOYA, J Y J, RAMIREZ. 2010. **Evaluación de la remoción de contaminantes en aguas residuales en humedales Artificiales utilizando la *Guadua angustifolia* Kunth**. Tesis. Fac.de Tecnología, Univ. Tecnológica de Pereira. Pereira
42. MONTOYA, J; L, CEBALLOS, J, CASAS Y J, MORATÓ. 2010. **Estudio comparativo de la remoción de materia orgánica en humedales construidos de**

- flujo subsuperficial horizontal usando 3 especies de macrófitas.** Revista EIA N° 14 p 75-84. Medellín. Colombia.
43. MONTÚA, C.2012. **Lenteja de agua para el tratamiento de aguas residuales: factores ambientales y físico químico que afectan su crecimiento.** En: <http://es.slideshare.net/carlosorozco68/lenteja-de-agua-para-el-tratamiento-de-aguas>. Consultado: 08/01/2014.
 44. MORANTE, C; R, MORALES.2010. **Metodología para el dimensionamiento de campos de humedales de flujo subsuperficial contruidos para el tratamiento de aguas residuales.** Universidad de Oriente. Núcleo de Anzoátegui. Escuela de Ingeniería y ciencias aplicadas. Barcelona.
 45. MOREL Y DIENER. 2006. **Humedales artificiales para el tratamiento de aguas grises y aguas residuales domésticas en países en desarrollo.** Publicado por HOFFMANN, H Y C, PLATZER en el programa “Saneamiento Sostenible-Ecosan” de GTZ. 2009.
 46. MOSHIRI 1993 cit. en **Diseño Hidráulico de Humedal Artificial a nivel Laboratorio.** Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez por PEREZ, G; SAENZ, S; DEL PRADO, M y CASTAÑON, J. Chiapas, México. 1.
 47. NADAL, F; N, LARROSA; N, ALASINO; C, GUTIERREZ; H, SEVERINI Y G, HILLMAN. 2010.**Propuestas de sistemas de remediación sanitarios para Potrero de Garay.** Córdoba. Argentina.
 48. NARVAEZ, L; J, MIRANDA Y L, NARVAEZ. 2009. **Remoción de contaminantes de aguas residuales mediante el uso de humedales artificiales en viviendas sustentables del estado de Querétaro.** San Luis del Potosí. En: <file:///C:/Users/Juli/Downloads/biofiltros%20jardinera%20tratamiento%20aguas%20grises.pdf>. Consultado: 08/01/2014.
 49. NAVARRO, A Y A, VASQUEZ. 2004. **Tecnología para la Agricultura sustentable: humedales artificiales para el tratamiento de Descargas Domésticas.** 2° Encuentro de Investigación y Transferencia de Tecnología Agropecuaria y Agroindustrial en el Estado de Puebla. México.
 50. OLMEDILLA, M; CARILLO, S Y ROJO, C. 2000. **Función Depuradora de los Humedales II: Una Revisión Bibliográfica sobre el papel del sedimento.** Instituto Cavanilles de biodiversitat; Biología Evolutiva .Universidad de Valencia.p129.
 51. OLMOS, R; R, MARQUES Y F, MORETO. 2002. **El Agua en el medio ambiente: muestreo y análisis.** Universidad Autónoma de baja California. PyV. p87.
 52. OROZCO, M. 2010. **Efectividad en la remoción de organismos patógenos de aguas residuales domésticas utilizando humedales artificiales contruidos con diferente tipo de flujo.** Universidad Tecnológica de Pereira. Pereira.
 53. PABELLO, V Y H, CARRILLO. 2004. **Medios de soporte alternativos para la remoción de fósforo en humedales artificiales.** Revista Internacional de Contaminación Ambiental. Vol. 20. N° 1.p 31-38. Universidad Autónoma de México.
 54. PABELLO, V Y S, CASTAÑEDA.2014. **Sistema de humedales artificiales para el control de la eutrofización del lago del bosque de San Juan Aragón.** Revista especializada en Ciencias Químicas- Biológicas. N° 17.

55. PEÑA, O Y A, PEREZ. 2004. **Determinación de nitrógeno amoniacal y total en aguas de consumo y residuales por el método del fenato.** Revista Cubana de Higiene y Epidemiología.v.42.Nº2. Habana.
56. PEREZ, C Y M, RODRIGUEZ. 2011. **Presencia de coliformes totales y fecales en el agua del Rio Matlacobalt, Xico, Veracruz , México.** Trabajo de experiencia recepcional. México.
57. POZO, G. 2012. **Fitorremediación de las aguas del canal de Riego Latacunga-Salcedo- Ambato- mediante humedales vegetales a nivel de prototipo de campo salcedo- Cotopaxi.** Trabajo de Investigación previa a la obtención del grado de magister en producción más limpia. Universidad Técnica de Ambato. Ecuador.
58. PROYECTO 21-4. 2003. **Plantación de la Totora en las Comunidades.** Informe final del Proyecto 21.4 realizado entre 2001-2003. En: http://www.alt-perubolivia.org/Web_Bio/PROYECTO/Docum_bolivia/21.04.pdf Consultado: 05/01/2014.
59. QUIROZ, H. 2012. **DBO y Microflora de aguas residuales.** Microbiología acuática. Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo. Lambayeque. Perú.
60. RIDDERSTOLPE, R. 2004. **Introduction to greywater management.** Stockholm Enviroment Institute. Swenden. p11. En: <http://www2.gtz.de/Dokumente/oe44/ecosan/en-greywater-management-2004.pdf> Consultado: 12/02/2014.
61. ROMERO, M; A,COLIN-CRUZ; E, SANCHEZ; M, ORTIZ. 2009. **Tratamiento de águas residuales por un sistema piloto de humedales artificiales: Evaluación de la remoción de la carga orgánica.** Revista Internacional de contaminación ambiental .v 25.Nº3. México.
62. SABAJ, V. 2010. **Extracción de juncos *Schoenoplectus californicus* en el Área protegida Humedales Santa Lucia (Uruguay): contexto ecológico, socioespacial y perspectiva de manejo sustentable.** Tesis de Maestría en Ciencias Ambientales. Universidad de la República. Uruguay.
63. SALAS RODRIGUEZ, J.J. 2010. **Nuevas tendencias y retos tecnológicos en la depuración de aguas residuales.** 36 pág. CENTA. España.
64. SCHNACK, J; F, DE FRANCESCOS; U, COLADO; M, NOVOA Y E, SCHNACK.2000. **Humedales antrópicos: su contribución para la conservación de la biodiversidad en los dominios subtropical y panpásico de la Argentina.** Revista Ecología Austral. Nº10.p 63-80.
65. SERRANO, J Y A, HERNANDEZ. 2008. **Depuración con humedales construidos.** Guía práctica de Diseño, Construcción y Explotación de Sistemas de humedales de flujo superficial. Universidad Politécnica de Catalunya. España.
66. SILVA, A Y H, ZAMORA. 2005. **Humedales Artificiales.** Trabajo de grado modalidad monografía. Universidad Nacional de Colombia. Sede Manizales. Facultad de Ingeniería y Arquitectura.
67. TORRES, P; E, FORESTI Y R, VAZOLLER. 2012. **Composición y Uso de Agua Residual Doméstica en reactores a escala de laboratorio.** En: <http://es.scribd.com/doc/77354885/Aguas-Residual-Domestica> . Consultado: 20/9/2013.
68. VÁZQUES, G; F, NAVARRO; R, ROSSARIZ, R, TORÍZ Y A, MEJIA. 2004. **El Sistema de humedales para tratar las aguas residuales sanitarias en las microcuencas del Río de Nexapa y del Dren Tehuacan.** Memorias del IX

Congreso Nacional y III Congreso Internacional de Ciencias Ambientales.
Huatulco. Oaxaca. México.

69. YANES, A. 2004. **La Lenteja de Agua Lemna en el Lago Maracaibo.** PlaniGestión. C. A. (Consultores Ambientales, Planificación regional y urbana e Inspección y obras). p 1.
70. ZAMBRANO, X; X, SALTOS Y F, VILLAMAR.2004.**Diseño del Sistema de Tratamiento para la depuración de las Aguas Residuales Domésticas de la Población San Eloy en la Provincia de Manabí por medio de un Sistema de Tratamiento Natural.** Escuela Superior Politécnica del Litoral. Guayaquil. Ecuador.

VIII - ANEXO

Anexo 1. Tabla de Medidas resumen de los parámetros evaluados (InfoStat).

Variable	n	Media	D.E.	Mín	Máx
SS	6	0,05	0,02	0,02	0,07
Ef.SS	6	95,17	1,60	93,00	98,00
SST	6	49,50	13,29	30,00	65,00
Ef.SST	6	66,50	9,07	56,00	80,00
CT	6	433333,33	25033,31	400000,00	460000,00
Ef.CT	6	82,00	0,89	81,00	83,00
CF	6	92166,67	1722,40	90000,00	95000,00
Ef.CF	6	60,00	0,63	59,00	61,00
DQO	6	58,17	9,95	44,00	70,00
Ef.DQO	6	72,50	4,59	67,00	79,00
DBO5	6	37,83	10,34	24,00	51,00
Ef.DBO5	6	66,67	9,31	55,00	79,00
Nt	6	62,67	3,39	59,00	69,00
Ef.Nt	6	21,17	6,49	14,00	30,00
Pt	6	2,67	0,19	2,50	3,00
Ef.Pt	6	8,67	3,67	4,00	14,00
pH	24	8,08	0,45	7,20	8,60
CE	24	852,50	37,91	790,00	920,00
T°C	24	18,83	1,13	17,00	21,00

Análisis estadístico

Anexo 2. Hipótesis utilizadas para la comprobación de Supuestos del ANOVA.

- Supuesto de Normalidad (Shapiro-Wilk):

Hipótesis ($\alpha = 0,01$)

H_0 = Los residuos de la variable “y” son normales.

H_a = Los residuos de la variable “y” no son normales.

- Supuesto de Homocedasticidad (Test de Levene):

Hipótesis ($\alpha = 0,01$)

$H_0 = \sigma_1: \sigma_2: \sigma_3: \dots \sigma_n$

H_a = Al menos una varianza difiere.

Anexo 3. Tabla resumen de resultados de la prueba Shapiro- wilk.

Prueba shapiro- wilk					
Variable	n	Media	D.E.	W*	p (Unilateral D)
RDUO_Ef.SST	6	0,00	5,13	0,97	0,9141
RDUO_Ef.CT	6	0,00	0,52	0,90	0,4249
RDUO_Ef.DQO	6	0,00	3,01	0,89	0,3970
RDUO_Ef.DBO5	6	0,00	3,14	0,92	0,5772
RDUO_Ef.Nt	6	0,00	2,42	0,98	0,9250
RDUO_Ef.Pt	6	0,00	1,63	0,90	0,4098
RDUO_Ef.CF	6	0,00	0,52	0,90	0,4249

Nota: Como todos los p son mayores a 0,01 se comprueba que todos los residuos son normales.

Anexo 4. Tabla de resultados del test de Levene para SST.

Test de Levene					
Variable	N	R ²	R ² Aj	CV	
RABS Ef.SST	6	0,15	0,00	75,62	

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)					
F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	6,00	1	6,00	0,69	0,4517
Tratamiento	6,00	1	6,00	0,69	0,4517
Error	34,59	4	8,65		
Total	40,59	5			

Anexo 5. Tabla de resultados del test de Levene para CT.

Test de Levene					
Variable	N	R ²	R ² Aj	CV	
RABS Ef.CT	6	0,00	0,00	43,30	

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)					
F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	0,00	1	0,00	0,00	>0,9999
Tratamiento	0,00	1	0,00	0,00	>0,9999
Error	0,15	4	0,04		
Total	0,15	5			

Anexo 6. Tabla de resultados del test de Levene para CF.

Test de Levene					
Variable	N	R ²	R ² Aj	CV	
RABS Ef.CF	6	0,00	0,00	43,30	

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)					
F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	0,00	1	0,00	0,00	>0,9999
Tratamiento	0,00	1	0,00	0,00	>0,9999
Error	0,15	4	0,04		
Total	0,15	5			

Anexo 7. Tabla de resultado del test de Levene para DQO.

Test de Levene					
Variable	N	R ²	R ² Aj	CV	
RABS Ef.DQO	6	0,00	0,00	62,98	

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)					
F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	0,00	1	0,00	0,00	>0,9999
Tratamiento	0,00	1	0,00	0,00	>0,9999
Error	9,48	4	2,37		
Total	9,48	5			

Anexo 8. Tabla de resultados del test de Levene para DBO5.

Test de Levene					
Variable	N	R ²	R ² Aj	CV	
RABS Ef.DBO5	6	0,04	0,00	47,32	

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)					
F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	0,30	1	0,30	0,19	0,6885
Tratamiento	0,30	1	0,30	0,19	0,6885
Error	6,37	4	1,59		
Total	6,67	5			

Anexo 9. Tabla de resultados del test de Levene para Pt.

Test de Levene					
Variable	N	R ²	R ² Aj	CV	
RABS Ef.Pt	6	0,11	0,00	57,74	

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)					
F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	0,30	1	0,30	0,50	0,5185
Tratamiento	0,30	1	0,30	0,50	0,5185
Error	2,37	4	0,59		
Total	2,67	5			

Anexo 10. Tabla resultados del test de Levene para Nt.

Test de Levene					
Variable	N	R ²	R ² Aj	CV	
RABS Ef.Nt	6	0,26	0,07	78,06	

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)					
F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	2,67	1	2,67	1,38	0,3046
Tratamiento	2,67	1	2,67	1,38	0,3046
Error	7,70	4	1,93		
Total	10,37	5			

Anexo 11. Resultado de Análisis estadístico univariado (ANOVA) de SST.

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
Efi.SST	6	0,68	0,60	8,62

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	280,17	1	280,17	8,53	0,0432
Tratamiento	280,17	1	280,17	8,53	0,0432
Error	131,33	4	32,83		
Total	411,50	5			

Anexo 12. Resultado de Análisis estadístico univariado (ANOVA) de DQO.

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
Efi.DQO	6	0,57	0,46	4,64

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	60,17	1	60,17	5,31	0,0826
Tratamiento	60,17	1	60,17	5,31	0,0826
Error	45,33	4	11,33		
Total	105,50	5			

Anexo 13. Resultado Análisis estadístico univariado (ANOVA) de DBO5.

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
Ef.DBO5	6	0,89	0,86	5,27

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	384,00	1	384,00	31,14	0,0051
Tratamiento	384,00	1	384,00	31,14	0,0051
Error	49,33	4	12,33		
Total	433,33	5			

Anexo 14. Resultado de Análisis estadístico univariado (ANOVA) de CT.

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
Ef.CT	6	0,67	0,58	0,70

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	2,67	1	2,67	8,00	0,0474
Tratamiento	2,67	1	2,67	8,00	0,0474
Error	1,33	4	0,33		
Total	4,00	5			

Anexo 15. Resultado de Análisis estadístico univariado (ANOVA) de CF.

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
Ef.CF	6	0,33	0,17	0,96

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)					
F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	0,67	1	0,67	2,00	0,2302
Tratamiento	0,67	1	0,67	2,00	0,2302
Error	1,33	4	0,33		
Total	2,00	5			

Anexo 16. Resultado de Análisis estadístico univariado (ANOVA) de Nt.

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
Ef.Nt	6	0,86	0,83	12,79

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)					
F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	181,50	1	181,50	24,75	0,0076
Tratamiento	181,50	1	181,50	24,75	0,0076
Error	29,33	4	7,33		
Total	210,83	5			

Anexo 17. Resultado de Análisis estadístico univariado (ANOVA) de Pt.

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
Ef.Pt	6	0,80	0,75	21,07

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)					
F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	54,00	1	54,00	16,20	0,0158
Tratamiento	54,00	1	54,00	16,20	0,0158
Error	13,33	4	3,33		
Total	67,33	5			