

Diseño de Humedal Construido para tratar los lixiviados del Proyecto de Relleno Sanitario de Pococí



Abstract

In order to find an economical solution that functions as conventional water treatment plant, a proposal of an eco-technological treatment that offers an adequate management to the leachates generated by the Los Laureles Landfill in Pococí is presented.

To create this design, written and oral sources were consulted to obtain information about the use of this technology, where the use of specific kinds of vegetation, whose roots are in contact with the wastewater, are able to remove polluting components of the water, being the Manual of Technology Assessment for sub surface flow constructed wetlands for wastewater treatment made by the Environmental Protection Agency of the United States, the most consulted source. The measurements of the constructed wetland were made through an Excel 2007 worksheet.

Regarding the construction details, hydraulic and soil mechanical principals were applied for a proper performance of the constructed wetland.. Besides, some comparisons with similar wetlands were made, so that the constructed wetland works effectively. Moreover, on the construction plans, it is indicated which materials are needed to make this construction.

Key words: Landfill, Wastewater Treatment Plant, Constructed wetland, leachates.

Resumen

Para buscar una solución económica que cumpla con las funciones de una planta de tratamiento de aguas convencional, se presenta la propuesta de una planta de tratamiento eco tecnológica para dar un tratamiento adecuado a los lixiviados generados por el Relleno Sanitario Los Laureles en el cantón de Pococí.

Para realizar este diseño se recurrió a fuentes escritas y orales para obtener información acerca del uso de esta tecnología, la cual hace uso de vegetación capaz de llevar oxígeno a la zona de sus raíces para descomponer y remover compuestos contaminantes de los lixiviados. El Manual de evaluación de la tecnología de humedales construidos de flujo superficial para el tratamiento de aguas residuales, elaborado por el Environmental Protection Agency de los Estados Unidos ha sido la fuente más consultada El dimensionamiento del humedal construido se logró por medio de una hoja de cálculo del programa Microsoft Excel 2007.

En el caso de los detalles constructivos se analizaron las características mecánicas de los materiales y su comportamiento, asimismo se hicieron comparaciones con otros proyectos similares, para que de esta manera, el humedal construido cuente con un funcionamiento adecuado. Además se indica en los planos constructivos cuales son los materiales necesarios para llevar a cabo la construcción.

Palabras claves: Relleno Sanitario, Planta de Tratamiento, Humedal Construido, Lixiviados.

Diseño de Humedal Construido para el tratar los lixiviados del Proyecto de Relleno Sanitario de Pococí

Diseño de Humedal Construido para el tratar los lixiviados del Proyecto de Relleno Sanitario de Pococí

CARLOS MANUEL FONSECA CASTRO

Proyecto final de graduación para optar por el grado de
Licenciatura en Ingeniería en Construcción

Diciembre del 2010

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA
ESCUELA DE INGENIERÍA EN CONSTRUCCIÓN

Contenido

PREFACIO.....	1
RESUMEN EJECUTIVO.....	2
INTRODUCCIÓN.....	4
METODOLOGÍA.....	6
ALCANCES Y LIMITACIONES.....	8
MARCO TEORICO.....	9
RESULTADOS Y ANÁLISIS.....	28
RECOMENDACIONES.....	37
CONCLUSIONES.....	38
APÉNDICES.....	39
ANEXOS.....	47
REFERENCIAS.....	56

Prefacio

Este proyecto presenta una alternativa para llevar a cabo una planta de tratamiento no convencional de lixiviados de un relleno sanitario. Este consiste en un Humedal Construido.

La importancia de este proyecto radica mayormente en demostrar que existe la posibilidad de hacer uso de plantas de tratamiento no convencionales, capaces de realizar una buena remoción de los principales componentes contaminantes presentes en lixiviados.

Es por eso que en este documento se cumple con el objetivo de presentar la propuesta para el diseño de un humedal construido que funcionará como planta de tratamiento para los lixiviados generados por el Relleno Sanitario Los Laureles, en el cantón de Pococí.

En esta propuesta son incluidos datos importantes tales como el área requerida por éstos para lograr la remoción de contaminantes esperada, seleccionar la vegetación que llevará a cabo el trabajo de la limpieza del agua y la selección de la ubicación más óptima para su colocación.

Para la realización de este trabajo se agradece la colaboración dada por la empresa Corporación Tecnológica Magallanes Sociedad Anónima, la cual en todo momento brindó una gran ayuda en la recopilación de todo tipo de información, recursos y obtención de precios requeridos por el proyecto.

Igualmente al ingeniero Jorge Calvo Gutiérrez de las Escuelas de Ingeniería en Construcción y de Ingeniería Ambiental del Instituto Tecnológico de Costa Rica, quien siempre colaboró con valiosas recomendaciones y observaciones.

Y por último a todas las personas que -en sus diferentes campos de conocimiento- ayudaron a tomar decisiones y llegar a

conclusiones que se aplicaron en el documento final.

Resumen Ejecutivo

Para la elaboración de este trabajo fue desarrollada la propuesta de una planta natural de tratamiento de lixiviados; mediante un sistema de humedales construidos de flujo sub superficial. En este sistema las plantas son las encargadas de remover los contaminantes presentes en los lixiviados, lo que significa un ahorro en la operación.

Este trabajo es de gran relevancia para la empresa Corporación Tecnológica Magallanes, la cual tiene la obligación de tratar los lixiviados generados por el Relleno Sanitario de Pococí.

Actualmente la empresa se encuentra realizando un proyecto de mitigación ambiental en el relleno sanitario, de modo que necesita administrar el capital con el que cuenta, con el objeto de que pueda cumplir con los objetivos del proyecto sin excederse en el presupuesto. Asimismo la construcción de una planta de tratamiento de este tipo es una solución completamente aplicable a las circunstancias existentes.

Los objetivos del proyecto consistieron en proponer el diseño de un sistema de humedales construidos, en el que se incluyeron tanto los planos constructivos como el presupuesto, además de la selección de las plantas por utilizar y la mejor ubicación del humedal.

Para la realización de este proyecto fue necesario recopilar bibliografía concerniente a temas afines como: tipos de tratamientos de aguas residuales, recolección de aguas residuales y uso de humedales construidos para el tratamiento de estos, en donde se incluye cómo funcionan y cómo se construyen.

Se confeccionó una hoja electrónica en Microsoft Excel para facilitar el cálculo del dimensionamiento del humedal y poder realizar otro diseño con rapidez, en caso de que así se requiera.

Además fueron llevadas a cabo frecuentes visitas al relleno sanitario con el fin de conocer las características de este y las

condiciones actuales que presenta. Sin embargo no fue posible contar con un estudio de lixiviados.

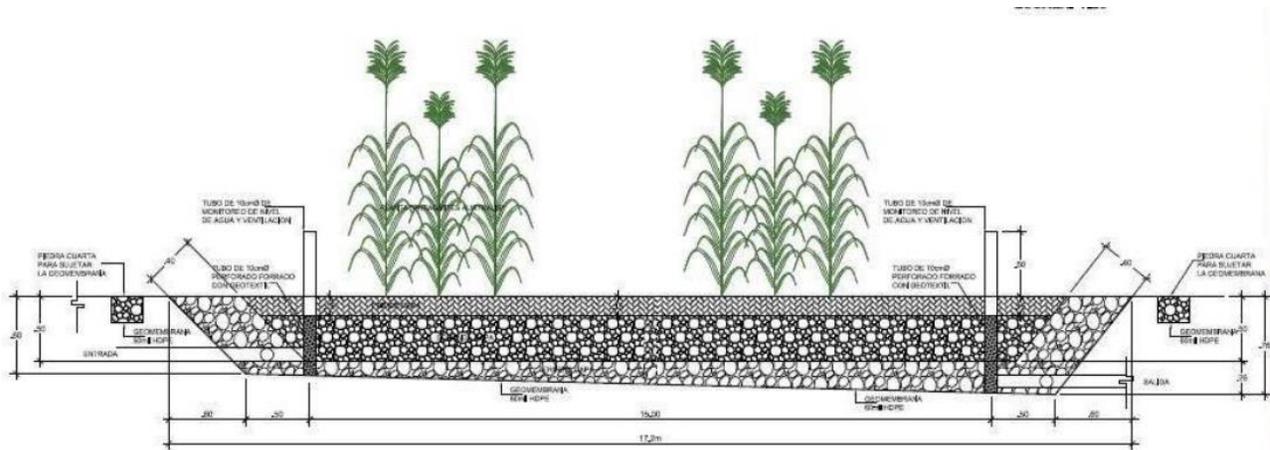
También se contactó a profesionales involucrados en proyectos de esta clase y que cuentan con experiencia en el diseño de dichos sistemas, los cuales aportaron recomendaciones y justificaron la implementación de esta tecnología.

Igualmente se contó con el apoyo -en calidad de profesor guía- del Ingeniero Jorge Calvo Gutiérrez de las Escuelas de Ingeniería en Construcción y de Ingeniería Ambiental del Instituto Tecnológico de Costa Rica, quien goza de experiencia en trabajos con rellenos sanitarios, y proporcionó recomendaciones atinentes al diseño y la ejecución.

El principal resultado obtenido fue el área y dimensiones con las que debía contar el humedal, el cual comprende dos celdas de 23 X 16 metros cada una. Para seleccionar los mecanismos y detalles con los que contará el humedal se analizaron principios de la hidráulica y de la mecánica de suelos.

Las principales conclusiones a que condujo la elaboración de este proyecto son las de entrar en conocimiento de la existencia de esta tecnología; que, aunque es relativamente nueva, ya está en aplicación en distintas zonas del mundo y puede destinarse a una gran variedad de aguas residuales.

ILUSTRACIÓN DE ALGUNAS CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DE UN HUMEDAL CONSTRUIDO



Introducción

La cantidad de sólidos producidos globalmente crece a una tasa exponencial. Es por este motivo que se busca mejorar la reducción e incrementar la reutilización y el reciclaje de los desechos sólidos para proteger tanto el medio ambiente como la salud humana. Según la autora Rachel Kopka en su tesis de maestría, el 80% de la basura producida en Estados Unidos se deposita en rellenos sanitarios.

En todo el mundo opera una gran cantidad de rellenos sanitarios que no dan un tratamiento adecuado a los lixiviados producidos, por lo que estos entran en contacto directo con el medio ambiente. Y en muchos otros casos, en los que sí se les da el debido tratamiento, el procedimiento resulta ser de un alto costo económico.

Los humedales construidos, al tener características similares a los humedales naturales, son considerados como una eco tecnología para el tratamiento de varias clases de aguas residuales. Estas características reúnen la combinación de factores tales como: una alta producción de plantas, grandes superficies de adsorción de sedimentos y plantas, una interface aeróbica-anaeróbica y una población microbiana activa, según señala Urbanic-Bercic.

Estas propiedades resultan en una tasa de alta actividad biológica, por lo que se produce la oportunidad de transformar a estos contaminantes producidos en -por ejemplo- aguas residuales municipales convencionales, aguas producto de minería y granja como lo mencionan Kadlec y Knight. Como consecuencia de ello, en los últimos años se han utilizado cada vez más los humedales construidos para imitar a los humedales naturales en el tratamiento de gran variedad de aguas residuales.

Entre las aguas residuales que están siendo tratadas por humedales construidos pueden ser mencionados: drenajes de ácidos de minas, aguas pluviales urbanas, aguas producidas por ganado y de rellenos sanitarios entre otros (Kadlec y Knight, 1996). De acuerdo

con estos autores, tanto los humedales de flujo superficial, como los de flujo sub superficial, son ecotecnologías con la capacidad de tratar los lixiviados de los rellenos sanitarios.

Al momento de realizar el diseño de un humedal construido se deben tomar en cuenta factores tales como condiciones climatológicas, así como de las especies vegetales que posean la capacidad de absorber los contaminantes presentes.

Experimentos efectuados comprobaron una alta cantidad de contaminantes en las raíces de las plantas, mientras que en los tallos y rizomas no se encontró ninguna, según lo expuesto por el investigador Peverly. También se ha comprobado que un aumento en la temperatura del ambiente produce un efecto beneficioso en las plantas, lo que mejora el rendimiento del tratamiento.

El objetivo general de este proyecto es el de proponer el diseño de un humedal construido para el tratamiento de los lixiviados del Relleno Sanitario Los Laureles ubicado en Roxana de Pococí, donde se logren efluentes que no superen los límites de concentración de contaminantes permitidos por la ley de Costa Rica.

El resultado final de este diseño ha de cumplirse con los objetivos planteados y que a continuación se presentan: Selección una vegetación a colocar que sea eficiente en la remoción de contaminantes y pueda prosperar en el clima de la zona, cálculo del área de los humedales, la mejor ubicación de los humedales y el tiempo de retención de los lixiviados dentro del humedal.

Para la realización de este estudio se contó con algunos trabajos similares utilizados como referencia, entre los que cabe mencionar: el del autor Lara en España, donde se esboza el dimensionamiento de dos humedales: uno de flujo superficial y otro de flujo sub superficial. También se analizó el diseño llevado a cabo por el autor López Guancha en Colombia, a quien se

contactó por medio del correo electrónico para conocer su proyecto; el cual es un diseño de un humedal de flujo sub superficial de tres celdas donde los lixiviados atraviesan las celdas una después de otra. Entre otras diferencias destacables con el presente proyecto realizado es que en este los lixiviados ingresan a las dos celdas del humedal al mismo tiempo; no tienen que salir de la primera para ingresar a las posteriores.

Metodología

Para la elaboración de este proyecto se condujeron los siguientes pasos:

1. Se localizaron y consiguieron fuentes de información escrita pertinentes al tema.
2. Se contactaron y se realizaron por Internet entrevistas a profesionales extranjeros cuyos trabajos de graduación o de posgrado tuvieran relación directa con el tema de este proyecto, para de esta forma conocer los alcances que posee dicha tecnología.
3. Se consiguió una copia del manual acerca de la evaluación tecnológica de los humedales de flujo sub_superficial para el tratamiento de aguas residuales. Este manual cuenta con las ecuaciones para calcular el dimensionamiento de los humedales de este tipo.
4. Fue adquirido bibliografía recopilatoria de una gran variedad de casos internacionales, donde se utilizan humedales artificiales para tratar los lixiviados producidos por rellenos sanitarios, así como detalles que explican el funcionamiento de esta tecnología.
5. Fueron consultadas las regulaciones presentes en el Decreto 33601 del Reglamento de Vertido y Reuso de Aguas Residuales en Costa Rica, para conocer cuáles son los principales parámetros que deben tomarse en cuenta para llevar a cabo su remoción.
5. De la información recopilada se seleccionó aquella que fuera de mayor pertinencia con miras a cumplir con los objetivos propuestos en el proyecto. Entre aquella cabe mencionar las diversas caracterizaciones de lixiviados provenientes de múltiples rellenos sanitarios en Latinoamérica, recopilados con el fin de someterlos a comparación.
6. Se consiguió un estudio climatológico del distrito de Roxana en el cantón de Pococí con el fin de considerar en los cálculos factores como la precipitación anual y la temperatura.
7. Hubo de calcularse el caudal de lixiviados generados por el relleno sanitario.
8. Se elaboró una hoja de cálculo de Microsoft Excel 2007, en la que se programaron las

fórmulas obtenidas de las diferentes fuentes bibliográficas estudiadas, para facilitar la visualización de los resultados que respaldan el dimensionamiento alcanzado.

9. Se analizaron fotografías de otros humedales artificiales de flujo sub superficial, en donde están incluidas conclusiones tocantes a cuestiones como el sentido en que debe desplazarse el líquido, cómo entra al humedal, cómo sale de éste y hacia dónde se dirige posteriormente.

10. Se realizaron visitas al relleno sanitario, gracias a las cuales se analizaron diferentes opciones para ubicar el humedal, tomando en cuenta ventajas y desventajas de cada una de ellas.

11. Para determinar cómo debe ser la recepción, el medio por el que se desplace, y la expulsión de los líquidos por parte del humedal, se tomaron en cuenta principios de la hidráulica y de la mecánica de suelos.

12. Basándose en el comportamiento que se espera del humedal, se hizo la escogencia de los materiales requeridos para la obra y de la vegetación con la que habrá de contar. Este comportamiento se refiere a aspectos tales como el de tener la certeza de que las raíces de las plantas se encontrarán en contacto con los lixiviados, que el agua pueda movilizarse dentro del humedal, y que el agua se mantenga el tiempo necesario dentro del humedal.

13. Se entablaron conversaciones con el Ingeniero Jorge Calvo Gutiérrez -del Instituto Tecnológico de Costa Rica-, con el objeto de no omitir aquellas consideraciones, tanto de carácter teórico como práctico, necesarias al proceso de determinar el procedimiento de edificación del humedal construido.

14. Se conversó con proveedores de material ubicados cerca del sitio, y así poder verificar la factibilidad de llevar a cabo la construcción.

15. Se elaboraron los planos constructivos del humedal.

16. Con base en estos planos se propuso un presupuesto, el cual -junto con aquellos-

representa la propuesta sugerida a la empresa encargada llevar el proyecto a su finalización.

Este trabajo se realizó como necesidad y con la colaboración de la empresa Corporación Tecnológica Magallanes CTM, la cual es la encargada de ejecutar diversos trabajos de reparación y de construcción en este relleno sanitario, pues actualmente este las requiere.

ALCANCES Y LIMITACIONES

Alcances:

1. Se dispone de un presupuesto de 20 000 000 de colones por parte de la empresa.
2. Se dispone de un área de 2000 metros cuadrados para llevar a cabo la obra.
3. Se puede contar con la maquinaria que vaya a ser requerida.

Limitaciones:

1. No se cuenta con un estudio propio de lixiviados.
2. La mayoría de las ecuaciones que se utilizan, consideran condiciones ideales de comportamiento.
3. El proceso de tratamiento para los sólidos requiere de perfeccionamiento.
4. Puede llegar a ser difícil que se produzca la precipitación química.
5. El clima del cantón de Pococí puede llegar a entorpecer la construcción del humedal.

MARCO TEORICO

Humedales

Los humedales son zonas de transición entre la tierra y el agua. El término "humedales" incluye una amplia gama de ambientes húmedos, incluidas las marismas, ciénagas, pantanos, prados húmedos, llanuras de inundación, entre otros, a lo largo de los canales de flujo.

Todos los humedales; naturales o construidos, de agua dulce o salada tienen una característica en común: el agua se encuentra cercana a su superficie, al menos de forma periódica. En la mayoría de los humedales las condiciones hidrológicas son tales que el sustrato se satura el tiempo suficiente durante la temporada de crecimiento para crear unas condiciones pobres en oxígeno dentro del sustrato.

La falta de oxígeno lleva a condiciones reductoras de este en el sustrato y en los límites de la vegetación de aquellas especies que están adaptadas a los ambientes de poco oxígeno.

La hidrología de los humedales es a menudo de flujo lento, en las aguas superficiales o en sustratos saturados. Los flujos lentos y las aguas poco profundas permiten que los sedimentos se depositen mientras el agua atraviesa el humedal. Los flujos lentos también proporcionan un contacto prolongado entre el agua y las superficies dentro de los humedales.

La compleja masa de materiales orgánicos e inorgánicos y las diversas ocasiones de intercambio entre gas y agua fomentan una comunidad diversa de microorganismos que degradan o transforman una considerable variedad de sustancias. La mayoría de los humedales presenta un crecimiento denso de las plantas emergentes adaptadas a condiciones de saturación.

Esta vegetación disminuye el agua, crea microambientes dentro de la columna de agua y proporciona los sitios de fijación para la comunidad microbiana. Los desechos que se

acumulan, como plantas muertas, crea un nuevo material y sitios de intercambio, proporcionando así una fuente de carbono, nitrógeno y fósforo que alimenta los procesos microbianos.¹

Como los Humedales Mejoran la Calidad del Agua¹

Un humedal es un conjunto complejo de agua, sustrato, plantas (emergentes y algas), restos de vegetación, invertebrados (larvas de insectos y gusanos en su mayoría) y una matriz de microorganismos (principalmente bacterias). Los mecanismos disponibles para mejorar la calidad del agua son muy numerosos y están relacionados entre sí a menudo. Estos mecanismos incluyen:

- a) Sedimentación de partículas en suspensión
- b) Filtración y precipitación química a través del contacto del agua con el sustrato y con restos de vegetación.
- c) Transformación química.
- d) Adsorción e intercambio iónico en la superficie de las plantas, sustrato, sedimento y restos de vegetación.
- e) Distribución y transformación de contaminantes por parte de los microorganismos y plantas.
- f) Captación y transformación de nutrientes por parte de los microorganismos y plantas.
- g) Depredación natural y mortalidad de los patógenos.

¹ Davis. A handbook of constructed wetlands. 1994

Ventajas de los humedales construidos¹

Los humedales construidos son un método rentable y técnicamente viable para el tratamiento de aguas residuales por varias razones:

- a) Los humedales pueden ser menos costosos de construir que otras opciones de tratamiento.
- b) Los gastos de operación y mantenimiento (energía y suministros) son bajos.
- c) La operación y mantenimiento sobre el terreno que se requiere pueden ser periódicos, en lugar de continuos.
- d) Los humedales son capaces de tolerar las fluctuaciones en el flujo.
- e) Facilitan la reutilización y reciclaje del agua.

Además:

- a) Constituyen el hábitat de muchos organismos de humedales.
- b) Se pueden construir para caber perfectamente en el paisaje.
- c) Proporcionan numerosos beneficios, además de mejorar la calidad del agua, como ser hábitat de la fauna y mejorar la estética de los espacios abiertos.
- d) Son vistos como un enfoque sensible al medio ambiente.

Limitaciones de los humedales construidos

Existen limitaciones asociadas con el uso de humedales construidos:

Por lo general requieren áreas de tierra mucho más grandes que los sistemas convencionales de tratamiento de aguas residuales. El tratamiento de los humedales puede ser barato en relación con otras opciones, sólo cuando la tierra está disponible y asequible.

El rendimiento puede ser menos consistente que en el tratamiento convencional. La eficiencia de los humedales de tratamiento puede variar según la estación climatológica, en respuesta a las cambiantes condiciones

¹ Davis. A handbook of constructed wetlands. 1994

ambientales tales como las precipitaciones y las sequías. Mientras que el rendimiento promedio durante el año puede ser aceptable, el tratamiento de los humedales no se evaluará así, la calidad del efluente debe ser el óptimo en todo momento.¹

Tipos de Humedales Construidos

Existen varios tipos de humedales construidos: los humedales de flujo libre, los humedales de flujo sub superficial, y sistemas híbridos que incorporan los humedales superficiales y sub superficiales de flujo. Los sistemas de humedales construidos también se pueden combinar con las tecnologías de tratamiento convencionales.

Humedales Construidos de Flujo Libre

Son los humedales de flujo libre superficial en donde el agua se encuentra expuesta a la atmósfera. El desarrollo de humedales construidos nace a partir de la observación de la mejora de la calidad del agua en humedales naturales, por lo que se intentó reproducir artificialmente estos ecosistemas. Los humedales de este tipo son comúnmente praderas inundadas o zonas pantanosas, en las que el agua fluye sobre la superficie del suelo con vegetación desde un espacio de entrada hasta un punto de descarga. En estos sistemas el agua puede llevar a perderse producto de evapotranspiración y percolación.¹

Los objetivos de los humedales construidos son las de funciones de tratamiento básicas y avanzadas de aguas residuales, en combinación con mejoras del hábitat de la vida silvestre.

Los humedales de flujo libre tienen un tamaño que puede ir desde pequeñas unidades de tratamiento para efluentes de tanques sépticos hasta unidades de muchas hectáreas. Y pueden llegar a tener una capacidad para tratar caudales de un galón por día hasta veinte millones de galones por día.

Estos humedales están conformados por uno o más canales de poca profundidad con un

recubrimiento en el fondo para evitar la percolación del agua, y una capa sumergida de suelo para las raíces de la vegetación. Estos sistemas presentan estructuras de entrada y descarga que garantizan que se produzca una distribución uniforme del agua residual. La vegetación que llevan estos sistemas es por lo general de solo una o dos especies. La capa vegetal de la vegetación emergente proporciona sobra a la superficie del agua y evita el crecimiento de algas.¹

En cuanto a las plantas sumergidas, y demás restos sumergidos, pues estos proporcionan el sustrato físico para la formación de los organismos responsables del tratamiento biológico del sistema. Las zonas que presentan vegetación pueden presentar profundidades que van desde pocos centímetros hasta más de 60 centímetros.

El afluente a los humedales es distribuido en un área de agua superficial y vegetación emergente. El flujo laminar del sistema proporciona una buena remoción del material a ser tratado, el cual está constituido por lo general por sólidos suspendidos totales, componentes con demanda biológica de oxígeno (DBO), nitrógeno y fósforo entre otros.

La oxidación de estas partículas libera formas solubles de DBO, nitrógeno y fósforo al medio ambiente del humedal, donde son absorbidas por el suelo y removidas por las poblaciones microbianas a lo largo del humedal. El oxígeno se encuentra disponible en la superficie del agua, sobre la superficie de plantas vivas y en la superficie de raíces, lo que da pie a que se produzca actividad aerobia en el humedal. Como la mayoría del humedal es anaerobio, la mayoría de remoción biológica por remoción del amoníaco se ve limitada, sin embargo eso no ocurre para el caso de la remoción de DBO, de los sólidos suspendidos y demás contaminantes orgánicos, pues su remoción si puede darse bajo condiciones anaerobias.

Los humedales de este tipo inician y terminan con zonas de vegetación emergente liviana, para que se asegure el tratamiento y la remoción de los materiales a ser tratados, y para reducir la toxicidad a las zonas de agua cercanas. Comúnmente los humedales de flujo libre utilizan algún tratamiento preliminar antes de entrar en de

empezar sus funciones. Este tratamiento puede llevarse a cabo por medio de: tanques sépticos, tanques Imhoff para sistemas pequeños o lagunas profundas con un tiempo corto de retención. También se da el caso de que son los humedales los que se utilizan como continuación para este tipo de tratamientos.¹

Cuando se requiere hacer remoción de nitrógeno o fósforo, el diseño del humedal puede resultar con un área superficial muy grande, sin embargo el tratamiento es efectivo y no requiere equipos mecánicos, electricidad, u operarios, resultando muy favorables desde el punto de vista económico.

Los humedales construidos de flujo libre son utilizados para: aguas residuales domésticas, escorrentía pluvial urbana, escorrentía agrícola, lixiviados de rellenos sanitarios y para efectos de mitigación entre otros.

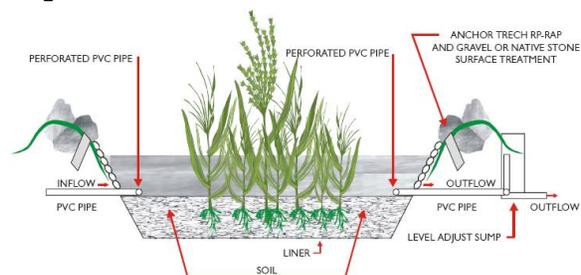


Figura 1. Sistema de Flujo Superficial.²

Humedales Construidos de Flujo Sub Superficial

Estos humedales se diseñan para el tratamiento de aguas residuales en su fase final de tratamiento, y está constituido por un canal con un medio apropiado. El nivel del agua pasa por debajo del medio, el cual se planta con los mismos tipos de vegetación emergente presentes en las praderas inundadas.¹

Los humedales de flujo sub superficial tienen las ventajas de: prevención de insectos, de olores, y no hay riesgo de contacto de personas con el agua pre tratada.

Estos humedales son construidos únicamente para tratamiento, pues no es muy

¹ Davis. A handbook of constructed wetlands. 1994

² Llagas. Diseño de humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales en la UNMSM. 2006

difícil que proporcionen un hábitat de vida silvestre.

Presentan un tamaño que va desde unidades para tratar efluentes de tanques sépticos pequeños con un caudal de cientos de galones diarios, hasta sistemas con capacidad de millones de galones diarios, estos sistemas son precedidos por lagunas de tratamiento aireadas.

Los humedales de flujo sub superficial son más caros que los de flujo libre, pues los costos de la grava son más altos.

Estos sistemas están conformados por uno o más canales de poca profundidad de fondo recubierto para evitar la percolación a la capa freática la cual se puede contaminar. Puede ser necesario tener que compactar el suelo local, y en otros casos traer arcilla o utilizar recubrimiento de membranas plásticas.¹

Las estructuras de entrada y de descarga son las encargadas de asegurar la correcta distribución y recolección uniforme del agua residual. Por lo general se utiliza una tubería perforada para los sistemas de menor tamaño. La profundidad más común en este tipo de humedales es de 60 centímetros, pero tienen un rango de los 30 a 90 centímetros.³

Estos humedales tienen un buen rendimiento para la remoción de DBO, sólidos suspendidos totales y -con tiempos de retención largos- también pueden deshacerse del nitrógeno y el fósforo.¹

Las dimensiones de los humedales de flujo sub superficial se determinan con base en el contaminante que demanda la mayor área para su remoción. Esta será la superficie del fondo de las celdas del humedal, y la distribución del flujo debe ser uniforme sobre ella para que sea efectiva. Esto se alcanza con la correcta selección de estructuras de entrada y descarga, así como de un gradiente de fondo bien calculado. El área total de tratamiento se divide en al menos dos celdas, excepto en los sistemas pequeños.

La temperatura del agua de los humedales de flujo sub superficial es un dato que se debe conocer para los cálculos de remoción de DBO y nitrógeno. Cuando el tiempo de retención es mayor a 10 días se puede suponer que la temperatura del agua será muy similar a la temperatura promedio del aire.

¹ Davis. A handbook of constructed wetlands. 1994

³ García. Depuración con humedales construidos. 2008.

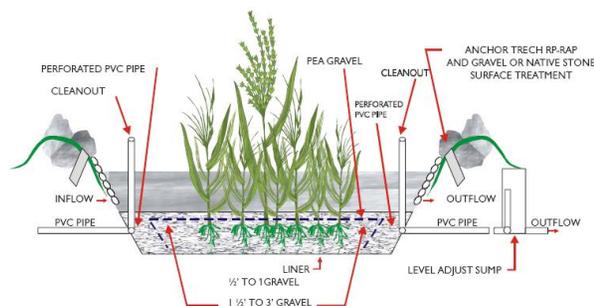


Figura 2. Sistema de flujo bajo la superficie.²

Componentes de los humedales

Un humedal construido consiste en una cuenca bien diseñada que contiene agua, un sustrato y, por lo general, las plantas salientes. Estos componentes pueden ser manipulados en la construcción de un humedal. Otros componentes importantes de los humedales, como las comunidades de microbios e invertebrados acuáticos, se desarrollan de forma natural.¹

El Agua

Los humedales son propensos a formarse donde el agua se acumula sobre la superficie de un terreno cuya capa de subsuelo es relativamente impermeable, de modo que impida que el agua de la superficie se filtre hacia el subsuelo. Estas condiciones pueden ser creadas artificialmente para la construcción de un humedal. Estos pueden construirse casi en cualquier lugar, configurando la superficie de la tierra para recoger el agua de la superficie y sellando el fondo de la cuenca para retener el agua.

La hidrología es el factor de diseño más importante de los humedales construidos, ya que vincula todas las funciones de un humedal y porque a menudo es el factor principal en el éxito o el fracaso de un humedal construido.³ Si bien la

² Llagas. Diseño de humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales en la UNMSM. 2006.

hidrología de los humedales construidos no es muy diferente a la de otras aguas superficiales y cercanas a la superficie, difiere en varios aspectos importantes:¹

- a) Pequeños cambios en la hidrología pueden tener efectos muy significativos en un humedal y su eficacia del tratamiento
- b) Debido a la gran superficie del agua y su poca profundidad, un sistema de humedales interactúa fuertemente con la atmósfera a través de las precipitaciones y la evapotranspiración (la pérdida combinada de agua por evaporación en la superficie del agua y la pérdida por la transpiración de las plantas).
- c) La densidad de la vegetación en un humedal afecta fuertemente su hidrología, en primer lugar, al obstruir las líneas de flujo, ya que sigue un camino sinuoso a través de la red de tallos, hojas, raíces y rizomas, y, en segundo lugar, mediante el bloqueo de la exposición al viento y el sol.

Substratos, sedimentos, y desechos

Los substratos utilizados para la construcción de los humedales incluyen tierra, arena, grava, roca y materiales orgánicos como el *compost*. Los sedimentos y desechos se acumulan en el humedal debido a la baja velocidad del agua y a la alta productividad típica de los humedales. Substratos, sedimentos y desechos son importantes por varias razones:

- a) Brindan sostén a muchos de los organismos que viven en los humedales.
- b) La permeabilidad del substrato afecta el movimiento del agua a través del humedal.
- c) Muchas transformaciones químicas y biológicas (especialmente microbianas) tienen lugar dentro de los substratos.
- d) Los substratos proporcionan almacenamiento para muchos contaminantes.
- e) La acumulación de desechos aumenta la cantidad de materia orgánica en el humedal.

La materia orgánica proporciona sitios para el intercambio de materiales y es una fuente de carbono, del que se origina la energía que impulsa algunas de las reacciones biológicas más importantes en los humedales.

Las características físicas y químicas de los suelos y otros sustratos se alteran cuando se inundan. En un substrato saturado, el agua reemplaza los gases de la atmósfera en los espacios porosos y el metabolismo microbiano consume el oxígeno disponible; aunque presenta dilución de oxígeno, puede darse la formación de un substrato anaerobio. Este entorno es importante en la eliminación de contaminantes como el nitrógeno y los metales.¹

Vegetación

Tanto las plantas emergentes (las plantas superiores) como las plantas sumergidas (algas) son importantes en los humedales construidos. La fotosíntesis de las algas aumenta el contenido de oxígeno disuelto en el agua que a su vez se vincula a los nutrientes y a las reacciones metálicas. Las plantas emergentes contribuyen al tratamiento de aguas residuales y a la escorrentía de distintas maneras:

- a) Estabilizan sustratos y limitan el flujo canalizado.
- b) Reducen la velocidad del agua, lo que permite que materiales suspendidos se depositen.
- c) Toman el carbono, los nutrientes y los oligoelementos para incorporarlos a los tejidos de la planta.
- d) Transfieren gases entre la atmósfera y los sedimentos
- e) Las fugas de oxígeno de las estructuras sub superficiales de las plantas crea espacios oxigenados en el substrato.
- f) Su tallo y raíces proporcionan sitios para la fijación microbiana
- g) Se vuelven basura cuando mueren y se descomponen.

En los humedales construidos comúnmente se siembra con vegetación no leñosa, que crece con sus raíces en el substrato, mientras sus tallos y hojas salen de la superficie del agua. Plantas comúnmente utilizadas en los humedales construidos son juncos, espadañas y una serie de especies de hoja ancha.¹

¹ Davis. A handbook of constructed wetlands. 1994

Tipos de Vegetación más utilizados

Typha¹

La espadaña (typha) es una planta firme, apta para crecer en diversas condiciones medioambientales, es de fácil propagación, lo que la hace idónea para ser parte de un humedal construido. Produce cantidades importantes de biomasa y tiene capacidad para remover Nitrógeno y Fósforo por medio de la cosecha y la poda. Los rizomas de esta planta plantados a aproximadamente 60 centímetros producen una cubierta densa en menos de un año, sin embargo no penetra bien en grava, por lo que no se recomienda para sistemas de flujo sub superficial.⁴



Figura 3. Typha Latifolia (typha)⁵



Figura 4. Typha Latifolia (typha)⁵

Spircus

Los juncos (spircus) pertenecen a la familia de las ciperáceas, son impercederos y crecen en grupos. Crecen en un rango diverso de pantanos, aguas costeras y humedales, y son capaces de crecer en aguas en un rango de profundidad de 5 centímetros hasta 3 metros. Se espera que se encuentren en una temperatura de 16°C a 27°C.

La mayoría de las especies crecen moderadamente, y logran un buen cubrimiento en alrededor de un año, con separaciones de aproximadamente 30 centímetros.

Penetra en bien en grava en profundidades de 60 centímetros, por lo que son muy usadas para humedales de flujo sub superficial.⁴



Figura 5. Scirpus holoschoenus.

¹ Davis. A handbook of constructed wetlands. 1994

⁴ Lara. Depuración de aguas residuales municipales con humedales artificiales. 1999.

⁵ <http://fichas.infojardin.com/acuaticas/typha-latifolia-totora-enea-anea-junco-bayon-bayunco.htm>

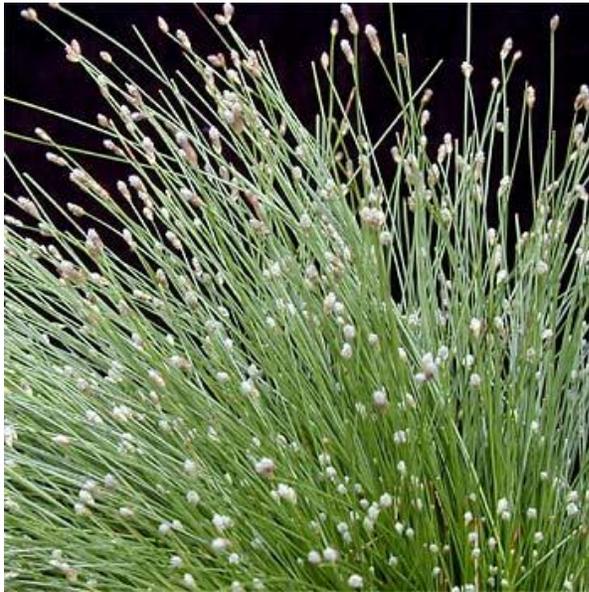


Figura 6. Scirpus cernuus.⁶

Phragmites

Son plantas anuales y altas con un rizoma impercedero extenso, en un año puede lograr un buen recubrimiento con separación de 60 centímetros. En los sistemas que utilizan carrizos se da una buena transferencia de oxígeno, pues los rizomas penetran verticalmente y más profundo que los de espadañas, aunque menos que los juncos, que lo hacen alrededor de 40 centímetros.

Estas plantas son muy usadas en humedales construidos, pues tienen la ventaja de tener un bajo valor alimenticio, por lo que no son atacadas por plagas u otros animales.⁴



Figura 7. Phragmites.⁷



Figura 8. Phragmites Australis.⁸

6

<http://www.westcarlston.com/Aquatics%20data/Plants/Marginals/Scirpus-cernuus.jpg>

⁴ Lara. Depuración de aguas residuales municipales con humedales artificiales. 1999.

7

http://www.mdinvasivesp.org/archived_invaders/archived_invaders_2005_07.html

⁸ <http://www.ecohusky.uconn.edu/phragmites.htm>

Microorganismos

Una característica fundamental de los humedales es que sus funciones se encuentran reguladas por microorganismos y su metabolismo. Los microorganismos son bacterias, levaduras, hongos, protozoarios, y algas. La biomasa microbiana consume la mayor parte del carbono orgánico y muchos nutrientes.

La actividad microbiana:

- a) Transforma un gran número de sustancias orgánicas e inorgánicas en inocuas o sustancias insolubles.
- b) Altera las condiciones de reducción-oxidación (redox) del sustrato, con lo que afecta la capacidad de procesos de los humedales
- c) Está involucrada en el reciclaje de nutrientes.

Algunas transformaciones microbianas son aerobias (es decir, requieren oxígeno libre), mientras que otras son anaerobias (se producen en ausencia de oxígeno libre). Muchas especies de bacterias son anaerobias facultativas, es decir, son capaces de funcionar en condiciones tanto aerobias como anaerobias, en respuesta a condiciones ambientales cambiantes.

Las poblaciones microbianas se ajustan a los cambios en el agua que les llega, y pueden propagarse rápidamente cuando tienen suficiente energía. Cuando las condiciones ambientales ya no son adecuadas, muchos microorganismos se inactivan y pueden permanecer así durante años. La comunidad microbiana de un humedal construido puede ser afectada por sustancias tóxicas, tales como pesticidas y metales pesados, por lo que se recomienda tener el cuidado de prevenir que esos productos químicos se introduzcan en concentraciones perjudiciales.¹

Animales

Los humedales construidos son el hábitat de una rica diversidad de invertebrados y vertebrados.

Los animales invertebrados, como insectos y gusanos contribuyen al proceso de tratamiento fragmentando los detritos al consumir la materia orgánica.

Las larvas de muchos insectos acuáticos consumen cantidades significativas de material

durante su etapa larval, que puede durar varios años. Los invertebrados también desempeñan una serie de funciones ecológicas; por ejemplo, ninfas de libélulas son depredadores importantes de larvas de mosquitos.¹

Aunque los invertebrados son los animales más importantes en cuanto a mejora de la calidad del agua se refiere, los humedales construidos también atraen a una gran variedad de anfibios, tortugas, aves y mamíferos.

Estética y paisaje

Aunque los humedales son principalmente sistemas de tratamiento, proporcionan beneficios intangibles por el aumento de la estética del sitio y mejorando el paisaje. Visualmente, los humedales son ambientes excepcionalmente ricos. Al introducir el elemento agua en el paisaje, los humedales construidos y humedales naturales. agregan diversidad al paisaje.

La complejidad de forma, color, tamaño y entremezclado de las plantas, junto a la variedad en el barrido y la curva de los bordes de las formas terrestres, contribuyen a incrementar la calidad estética de los humedales.

Los humedales construidos pueden incluir formas curvas que sigan el contorno natural del sitio, y –en algunos casos– los humedales para el tratamiento del agua no se pueden distinguir, a primera vista, de los humedales naturales.¹

Lixiviados de rellenos sanitarios

El principal inconveniente de los rellenos sanitarios es la contaminación producida por sus lixiviados. Este es un problema a largo plazo, ya que se siguen formando lixiviados incluso mucho tiempo después de cerrar el sitio. Desde el principio hasta el final debe haber un control estricto y efectivo de la producción de lixiviados.

¹ Davis. A handbook of constructed wetlands. 1994

Definición de lixiviados

Los lixiviados son filtraciones de líquido a través de los residuos depositados y emitidos por un relleno sanitario. El lixiviado consiste en diferentes compuestos orgánicos e inorgánicos que pueden estar disueltos o suspendidos. Estos pueden contaminar las aguas subterráneas y superficiales que se encuentran en estado natural. En la actualidad, la mayor parte de los lixiviados de los rellenos sanitarios son tratados por las aguas residuales municipales en las plantas de tratamiento de aguas residuales de cada municipalidad.

El color de los lixiviados se anaranjado oscuro o café. El lixiviado presenta un olor maloliente, debido principalmente a la presencia de ácidos orgánicos, que proceden de la alta concentración de materia orgánica descompuesta. Tanto el color oscuro como el mal olor desaparecen poco a poco o bajan su intensidad, con el aumento en la edad del relleno sanitario.¹²

La generación de lixiviados en el relleno sanitario

La mayoría de los lixiviados se genera por el agua de lluvia que entra en contacto con los residuos. Estos líquidos pasan muchos años infiltrándose a través del relleno sanitario, durante este tiempo, se ponen en contacto con diversas sustancias, tales como pinturas, plásticos, aceites, etc. presentes en el interior del relleno sanitario. El agua se filtra y disuelve diversos componentes, llega a contener una carga de metales pesados, compuestos orgánicos clorados y otras sustancias.

Este caudal se calcula por medio de la fórmula:

$$Q = P * A * K \text{ (Ecuación 1)}^{13}$$

Donde:

Q; Caudal de lixiviados generados [m³/d]

P: Precipitación diaria [m]

K: Coeficiente de compactación de basura. Tiene un valor de 0,15 a 0,25 para rellenos sanitarios

¹² Rong. Management of Landfill Leachate. 2009

¹³ Cepis. Diseño, Construcción y Operación de rellenos sanitarios manuales. 2007

fuertemente compactados y de 0.25 a 0.50 para rellenos sanitarios débilmente compactados.

Diseño de humedales

Diseño hidráulico y dimensionamiento

Se considera que los humedales construidos actúan como reactores biológicos, por lo que su rendimiento puede estimarse por medio de una cinética de primer orden para la remoción de DBO y nitrógeno.⁹

La ecuación básica de los reactores de flujo a pistón es

$$\frac{C_e}{C_o} = e^{-K_T t} \text{ (Ecuación 2)}^{10}$$

Asumiendo que para este caso el flujo es en pistón.

Dónde:

C_e es la concentración del contaminante en el efluente [mg/l].

C_o es la concentración del contaminante en el afluente [mg/l].

K_T es la constante de reacción de primer orden dependiente de la temperatura [s⁻¹]. Depende del contaminante que se quiera eliminar y según de la temperatura.

La variable *t* es el tiempo de retención hidráulica [d].

Este tiempo de retención hidráulica en el humedal se puede calcular por medio de la fórmula:

$$t = \frac{L * W * y * n}{Q} \text{ (Ecuación 3)}$$

Dónde:

L es el largo de la celda del humedal [m].

W es el ancho de la celda del humedal [m].

La *y* representa la profundidad de la celda del humedal [m].

⁹ Reed. Natural systems for waste management and treatment. 1995

¹⁰ Crites. Small and decentralized wastewater management systems. 1998

La n es la porosidad o espacio disponible para el flujo del agua a través del humedal. Se expresa como decimal.

Q es el caudal medio a través del humedal [m^3/d].

$$Q = \frac{Q_e + Q_o}{2} \quad (\text{Ecuación 4})$$

Dónde:

Q_e es el caudal de salida [m^3/s].

Q_o es el caudal de entrada [m^3/s].

Aunque usualmente se supone que los caudales de entrada y salida son iguales, se pueden asumir estimaciones razonables de pérdidas por evapotranspiración y ganancias por lluvia. Para hacer estas suposiciones se debe conocer un aproximado del área superficial del humedal.

Combinando las ecuaciones (2) y (3) se determina el área superficial del humedal:

$$A_s = L * W = \frac{Q * \ln\left(\frac{C_o}{C_e}\right)}{K_T * \gamma * n} \quad (\text{Ecuación 5})$$

Dónde:

As es el área superficial del humedal [m^2].

La importancia del diseño hidráulico es fundamental para la obtención de los resultados esperados. Existen casos en los que no se consideraron los requerimientos suficientes, lo que trajo como consecuencia condiciones no esperadas de flujo.

Los diseños requieren que se tomen en cuenta las consideraciones hidráulicas y térmicas, además de la cinética de remoción. El procedimiento suele requerir de varias iteraciones, donde se asumen la profundidad del agua y la temperatura para efectuar las ecuaciones cinéticas. Por medio de estas ecuaciones se puede calcular el área que se requiere para que se dé la remoción del contaminante en el humedal.

El contaminante que demande la mayor área para su remoción, será el que controle el tamaño del humedal. Por último, se busca determinar la relación largo:ancho y la velocidad de flujo en el humedal por medio de cálculos hidráulicos. De la misma manera, si estos datos son muy diferentes a los asumidos originalmente

para las ecuaciones de temperatura, se necesitará realizar más iteraciones.⁴

Un correcto diseño hidráulico es determinante para obtener el rendimiento esperado. Los modelos utilizados asumen que hay condiciones de flujo a pistón presentes, y que no hay restricciones en el contacto entre los constituyentes del agua residual y los organismos responsables del tratamiento.

Este concepto es fundamental en el caso de los humedales de flujo sub superficial, para asegurar que el flujo se mantenga en ambientes normales mientras el sistema se encuentre en funcionamiento. Para lograr esto, se requiere de un correcto diseño hidráulico y de métodos constructivos convenientes.

Es necesario que el flujo que atraviesa l supere la resistencia por fricción del sistema. Esta es provocada por la vegetación y la capa de sedimentos en los humedales de flujo libre; y las raíces de las plantas, sólidos acumulados y el medio en los humedales de flujo sub superficial. Esta resistencia se supera por medio de la energía producida por la pérdida de carga entre la entrada y la salida del sistema. Al momento de empezar la construcción es necesario asegurarse de que se cuenta con una pendiente en el fondo que permita un buen drenaje y una salida de altura variable con el nivel del agua.

Los humedales de flujo sub superficial describen un régimen en un medio poroso, por lo que se utiliza la Ley de Darcy por medio de la siguiente ecuación¹¹:

$$Q = k_s * A_s * s \quad (\text{Ecuación 6})$$

Dónde:

Q es el caudal promedio a través del humedal [m^3/d].

K_s es la conductividad hidráulica del medio en una unidad de sección perpendicular a la dirección del flujo [$m^3/m^2/d$].

As es la sección del humedal perpendicular a la dirección del flujo [m^2].

La s representa el gradiente hidráulico o pendiente [m].

⁴ Lara. Depuración de aguas residuales municipales con humedales artificiales. 1999.

¹¹ Subsurface flow constructed wetlands for wastewater treatment. 1993. United States Environmental Protection Agency.

Es recomendable que es este caudal sea el máximo diario y que de esta manera el sistema absorba bien sus puntas. A la vez no se recomienda utilizar los caudales puntas, pues originan sistemas demasiado anchos y poco largos.

La conductividad hidráulica depende de la cantidad y del tamaño de los poros del medio granular que se utiliza. Esta conductividad se va reduciendo con el paso del tiempo por la retención de sólidos y la formación de una biopelícula, en especial en la zona de entrada. Es aconsejable, por lo tanto, usar un factor de seguridad de al menos 7 para ella.⁴

Tipo de sustrato	Tamaño efectivo D10(mm)	Porosidad (%)	Conductividad Hidráulica Ks (m3/m2-d)
Arenas graduadas	2	28-32	100-1000
Arenas gravosas	8	30-35	500-5000
Gravas finas	16	35-38	1000-10000
Gravas medianas	32	36-40	10000-50000
Rocas pequeñas	128	38-45	50000-250000

Tabla 1. Ordenes de magnitud de la conductividad hidráulica (ks) en función del tipo de material granular utilizado como sustrato en un humedal construido de flujo sub superficial.¹¹

Los valores de la pendiente se encuentran en un rango de 0.01 a 0.02 m/m. En caso que la pendiente sea mayor a ese rango, pueden aumentar los costos de la excavación, a menos de que se trate de algún proyecto en que se cuenta con una longitud grande.³

Esto se logra por medio de las siguientes ecuaciones:

$$s = \frac{(m)(y)}{L} \text{ (Ecuación 7)}$$

$$L = \frac{A_s}{W} \text{ (Ecuación 8)}$$

$$A_s = (W)(y) \text{ (Ecuación 9)}$$

Dónde:

⁴ Lara. Depuración de aguas residuales municipales con humedales artificiales. 1999.

³ García. Depuración con humedales construidos. 2008.

W es el ancho de celda del humedal [m].

As es el área superficial del humedal [m²].

L es la longitud de celda del humedal [m].

La m representa la pendiente en el fondo del lecho, expresado en decimal.

La y es la profundidad del agua en el humedal [m].

Se desarrolla una ecuación que determina el ancho mínimo requerido para un humedal construido de flujo sub subterráneo:

$$W = \frac{1}{y} \left[\frac{(Q)(A_s)}{L(m)(k_s)} \right]^{0.5} \text{ (Ecuación 10)}$$

Después de calculada el área superficial del humedal, por medio de la ecuación anterior se determina el ancho mínimo aceptable para su celda.

Una vez calculadas todas las dimensiones, se debe verificar que la relación largo: ancho sea por lo menos de 1:1. Si esto no llegara a cumplirse, se deberá dividir la superficie total en distintas celdas que funcionen en paralelo, de modo que este criterio sea cumplido.

Diseño para remoción de la Demanda Biológica de Oxígeno DBO

Estos sistemas son considerados reactores biológicos. Se puede estimar su rendimiento como el descrito por la cinética de primer orden de un reactor de flujo a pistón. El mecanismo de remoción de la DBO en un humedal es igual tanto para los humedales de flujo libre como de flujo sub superficial. No obstante, el rendimiento resulta mejor en los últimos, pues presentan un área sumergida mayor la cual aumenta el eventual crecimiento de biomasa fija.¹¹

$$\frac{C_e}{C_o} = e^{-K_T t} \text{ (Ecuación 11)}$$

$$K_T = K_{20}(1.06)^{(T-20)} \text{ (Ecuación 12)}$$

$$A_s = \frac{Q(\ln C_o - \ln C_e)}{K_T(y)(n)} \text{ (Ecuación 13)}$$

¹¹ Subsurface flow constructed wetlands for wastewater treatment. 1993. United States Environmental Protection Agency.

Dónde:

K_T es la constante de temperatura [d^{-1}].

K_{20} es $1.104d^{-1}$

Y es la profundidad de diseño del sistema [m]-

n es la porosidad del humedal por donde fluiría el líquido

Se utiliza la porosidad más adecuada de acuerdo con la Tabla 1.

El lecho de los humedales de flujo sub superficial presenta una profundidad aproximada de 0.6 metros. Sobre este se encuentra una capa de grava fina con un espesor de 76 a 150 milímetros, la cual se usa en el enraizamiento de la vegetación. Esta se conserva seca en condiciones habituales de operación. En caso de utilizar una grava menor a 20 milímetros de diámetro para la capa principal, no será necesaria la capa fina superior. Sin embargo se deberá aumentar la profundidad para asegurar una zona seca en la zona superior del lecho.

Condiciones del lecho	Penetración de las raíces (cm)	Calidad del efluente (mg/l)		
		DBO	SST	NH ₃
Scirpus	80	5	4	2
Phragmites	60	22	8	5
Typha	30	30	6	18
Sin vegetación	0	36	6	22

Tabla 2. Rendimientos de humedales según su vegetación. Con condiciones iniciales de: DBO: 118 mg/l, SST: 57 mg/l, NH₃: 25 mg/l.¹³

De acuerdo con la tabla 2, donde se exponen los resultados de un prueba realizada en Estados Unidos con distintos tipos de plantas, se demuestra que la remoción de DBO y nitrógeno, está estrechamente relacionada con la profundidad de penetración de las raíces presentes. Se considera a esta profundidad de penetración de las raíces como el límite potencial de máximo crecimiento. Esto significa que la profundidad de diseño del humedal debe ser mayor a la profundidad potencial de crecimiento de las raíces.

Tratamiento preliminar

Es necesario utilizar un tratamiento preliminar, en el cual se pueden emplear tanques sépticos, tanque Imhoff o lagunas, o sistemas

similares. El objetivo es disminuir la concentración de sólidos orgánicos que se degradan cómodamente y que se acumularían en la zona de entrada del humedal, con la subsecuente producción de atascamientos, malos olores, y efectos negativos en las plantas cercanas.

Se puede utilizar un reactor anaerobio preliminar que reduzca la carga orgánica y el contenido de sólidos. En muchos sistemas de flujo sub superficial se utiliza agua residual colada y desarenada en el lecho del humedal, lo que provoca la aparición de malos olores y acumulación de lodos. Esto aceptable si no hay poblaciones cercanas. Lo que se acostumbra hacer en estos casos es usar la zanja de entrada para la disposición de lodos, y esta se limpia habitualmente.³

Diseño remoción de sólidos suspendidos totales

La remoción de sólidos suspendidos totales en los sistemas de humedales construidos no es un parámetro que limite su diseño y dimensionamiento, pues esta remoción es muy rápida comparada con la de DBO o la de nitrógeno.

La mayoría de los sólidos presentes en aguas residuales son de naturaleza orgánica, y se descomponen con el tiempo sin dejar residuos.¹¹ Para impedir que se produzca un atascamiento en la entrada del humedal, producto de la descomposición de los sólidos, se requiere realizar un tratamiento primario similar al utilizado para la DBO, la cual le dará un nivel aceptable al agua.

En caso que las aguas residuales tengan concentraciones de sólidos inorgánicos muy altas, pueden llegar a requerir un tanque o laguna de sedimentación como antesala en lugar de un tratamiento primario, con el fin de impedir que en se dé una acumulación de sólidos inorgánicos.

Es posible estimar la concentración de los sólidos suspendidos a la salida. Sin embargo, la ecuación que se utiliza para conocer la magnitud

³ García. Depuración con humedales construidos. 2008.

¹¹ Subsurface flow constructed wetlands for wastewater treatment. 1993. United States Environmental Protection Agency.

de la descarga no es factor de diseño, pues los sólidos suspendidos no lo limitan.

$$C_e = C_o(0.1058 + 0.0014(CH)) \quad (\text{Ecuación 14})$$

Dónde:

Ce son los sólidos suspendidos totales en el efluente [mg/l].

Co son los sólidos suspendidos totales en el afluente [mg/l].

CH es la carga hidráulica [cm/d].

Esta ecuación fue deducida con cargas hidráulicas ubicadas en un rango de entre 0.4 y 0.75 cm/día, por lo que solo aplica para el mismo rango. ⁴

Diseño remoción de nitrógeno

Este es un procedimiento que puede llegar a ser muy complicado, pues el nitrógeno se puede presentar de muchas formas, y requiere de gran variedad de condiciones químicas y ambientales para su remoción.

La remoción de nitrógeno es por lo general el parámetro de diseño limitante en los casos en los que hay límites muy estrictos de vertido, tanto de nitrógeno amoniacal (en que el amoniacal no ha ionizado) como de total.

Para los casos en que el diseño de un sistema de humedal requiera de la remoción de nitrógeno, se recomienda asumir que todo el nitrógeno Kjeldahl que entra al sistema se convierte en amoniacal. Cuando el sistema inicia operaciones, la remoción de nitrógeno resulta óptima, pues la adsorción del suelo y la asimilación de las plantas producen un vertiginoso desarrollo de la cubierta vegetal.

Producto de que el nivel de agua se encuentra por debajo de la superficie del medio en los humedales de flujo sub superficial, se producirá una leve reaeración atmosférica. No obstante es posible que a través de este medio anaerobio se encuentren micro sitios aerobios en las superficies y por lo que fluye el agua residual, estos son proporcionados por las raíces de la vegetación. Esto hace que se cuenten con las

condiciones para llevar a cabo la nitrificación y la desnitrificación, las cuales dependen de la temperatura y de la velocidad de transferencia de oxígeno a las raíces de estas plantas.

El carbono que facilita la desnitrificación se obtiene mayoritariamente de la muerte y descomposición las raíces y rizomas y la DBO del agua residual. Después de varios años de haber empezado a operar el sistema, la capa de desechos aumenta y empieza a descomponerse, de modo que el humedal cuenta con fuentes de carbono para llevar a cabo la desnitrificación.¹⁰

Es de vital importancia asegurar que el sistema de raíces, al ser estas la principal fuente de oxígeno en el humedal, penetre toda la profundidad del lecho. El agua que fluye por debajo de las raíces se encuentra en un ambiente anaerobio, y la nitrificación solo ocurrirá por difusión en los niveles superiores.

Según la tabla 2, se puede relacionar la remoción de amoniacal con la profundidad de penetración de las raíces, ya que cuando esta es de aproximadamente 40%, se obtiene un 32% de remoción de amoniacal, en comparación con los que tienen una penetración completa de las raíces y que alcanzan un 94% de remoción.

Es importante tener presentes métodos operativos que afiancen que se dé una adecuada penetración de las raíces, pues las plantas se pueden topar con la mezcla necesaria y los nutrientes en una parte poco profunda. En algunos casos se acostumbra disminuir el nivel de agua progresivamente al final de cada año, con el fin de inducir la penetración de las raíces.

Nitrificación

No se sabe exactamente cuánto oxígeno se transfiere a la zona de raíces según el tipo de las plantas. Por esta razón no es posible determinar cuánto oxígeno se encuentra disponible en la superficie de las raíces para la actividad biológica. La demanda de oxígeno de la DBO de las aguas residuales, puede usar este oxígeno disponible, pero según la tabla 2 en las

⁴ Lara. Depuración de aguas residuales municipales con humedales artificiales. 1999.

¹⁰ Crites. Small and decentralized wastewater management systems. 1998

raíces se encuentra oxígeno suficiente para confirmar lanitrificación.¹¹

Tipo de planta	Penetración de las raíces (cm)	Oxígeno disponible	
		g/m ³ *d ^a	g/m ² *d ^b
Scirpus	76	7,5	5,7
Phragmites	60	8,0	4,8
Typha	30	7,0	2,1
Promedio		7,5	

Tabla 3. Oxígeno disponible por vegetación emergente de un humedal. a: por unidad de volumen en zona de las raíces, b: por unidad de área con una profundidad de 76 cm.¹¹

En la tabla 3 se muestra un rango de 2.1 a 5.7 g/m²*d de oxígeno, disponible para la nitrificación por unidad de superficie de área. Esto porque hay una variación en la profundidad de penetración de las raíces según el tipo de planta. Ahora, el oxígeno disponible en función del volumen en la zona de las raíces es muy similar para los diferentes tipos de plantas. Esto se debe a que el volumen disponible para nitrificación es muy similar, por lo que la esta depende en mayor medida de la profundidad de penetración de las raíces del lecho del humedal. Esta relación se muestra en la siguiente ecuación:

$$K_{NH} = 0.01854 + 0.3922(rz)^{2.6077} \quad (\text{Ecuación 15})$$

Dónde:

K_{NH} es la constante de nitrificación a 20°C [d⁻¹]
Rz representa el porcentaje de profundidad del lecho del humedal ocupado por la zona de raíces, como decimal.

El valor de K_{NH} es de 0.4007 cuando se tiene una zona de raíces totalmente desarrollada; y 0.01854 cuando el lecho no tiene vegetación. Después de calculado este valor, se puede calcular la remoción de amoníaco por medio de la nitrificación con estas ecuaciones:

$$\frac{c_e}{c_o} = \exp(-K_T t) \quad (\text{Ecuación 16})$$

¹¹ Subsurface flow constructed wetlands for wastewater treatment. 1993. United States Environmental Protection Agency.

$$A_s = \frac{Q \ln\left(\frac{c_o}{c_e}\right)}{K_T y n} \quad (\text{Ecuación 17})^{10}$$

Dónde:

As es el área superficial del humedal [m²].
Ce es la concentración de amoníaco en el efluente [mg/l].

Co es la concentración de amoníaco en el afluente [mg/l].

K_T es la constante dependiente de temperatura [d⁻¹].

N es la porosidad del humedal (tabla 1).

T es el tiempo de residencia hidráulico [d].

Y es la profundidad del agua en el humedal [m].

Q es el caudal promedio del humedal [m³/d].

K_T depende de la temperatura:

Para 0°C: $K_o = 0$ [d⁻¹]

Para 1-10°C: $K_T = K_{10}(1.15)^{(T-10)}$ [d⁻¹]

Para más de 10°C: $K_T = K_{NH}(1.048)^{(T-20)}$ [d⁻¹]

No se puede asumir que la zona de raíces irrumpirá en todo el lecho, a menos que este sea muy poco profundo o que la grava utilizada sea muy pequeña. Si la profundidad es de aproximadamente 60 centímetros, se utilizan las ecuaciones anteriores para promover una penetración total. Además, estas requieren de un tiempo de residencia hidráulico de alrededor de una semana para lograr los límites estrictos en la remoción de amoníaco en condiciones atmosféricas normales.⁴

Desnitrificación

Las ecuaciones que se emplean en la nitrificación solo toman en cuenta la conversión de amoníaco a nitrato, y proporcionan el área que se requiere para obtener la conversión que se quiere. Si se requiere eliminar nitrógeno, se deben tomar en cuenta las exigencias para la desnitrificación, y hacer el dimensionamiento sin

¹⁰ Crites. Small and decentralized wastewater management systems. 1998

⁴ Lara. Depuración de aguas residuales municipales con humedales artificiales. 1999.

olvidarlas. Por lo general no es necesario proporcionar nuevas fuentes de carbono para remover la producción de nitrato del humedal, pues esta se desnitrifica dentro del área utilizada para la nitrificación.

Los humedales de flujo sub superficial tienen un área grande para la actividad biológica y la limitación en la disponibilidad de carbono puede afectar la desnitrificación. Para remover nitratos por medio de esta se utilizan las siguientes fórmulas, las cuales únicamente aplican para el nitrato presente:

$$\frac{C_e}{C_o} = \exp(-K_T t) \text{ (Ecuación 18)}$$

$$A_s = \frac{Q \ln\left(\frac{C_o}{C_e}\right)}{K_T y m} \text{ (Ecuación 19)}$$

Dónde:

As es el área superficial del humedal [m²].

Ce es la concentración de nitratos en el efluente [mg/l].

Co es la concentración de nitratos en el afluente [mg/l].

K_T es la constante dependiente de temperatura [d⁻¹].

n es Porosidad del humedal (tabla 1)

t es el tiempo de residencia hidráulico [d].

y es la profundidad del agua en el humedal [m].

Q es el caudal promedio del humedal [m³/d].

K_T depende de la temperatura:

Para 0°C: K₀ = 0 [d⁻¹]

Para más de 1°C: K_T = 1.15^(T-20) [d⁻¹]

La concentración de nitratos en el afluente (Co) que se utilizó en las ecuaciones anteriores es la diferencia entre las concentraciones de entrada y salida utilizadas en la ecuación 15. Esta calcula el amoníaco que quedó en el sistema tras la nitrificación. Se puede asumir que la cantidad restante es de nitrato.¹²

Al ser los humedales de flujo sub superficial en su mayoría anaerobios pero también tener parte aerobia en la superficie de las raíces, es posible obtener la nitrificación y la desnitrificación en el mismo volumen de reactor. Por medio de la ecuación 19 se calcula el área requerida para la desnitrificación. Esta no necesita ser sumada a la calculada para la nitrificación, a la que puede ser menor o igual.

Nitrógeno total

El nitrógeno total en el efluente es la suma de los resultados de las ecuaciones 16 y 18. El cálculo del área requerida se lleva a cabo por medio de iteraciones con las ecuaciones 17 y 19:

Primero se asume un valor para el Ce, con el que se efectúa la ecuación 17 y se determina el área requerida para nitrificar. Con esto se obtiene el tiempo de residencia hidráulico. Luego se toma la diferencia de Co y Ce como el nitrato producto de la nitrificación, cantidad que se usa como concentración de nitratos en el efluente de la ecuación 17. También se calcula la concentración de nitratos en el efluente con esta ecuación. La concentración de nitrógeno total en el efluente es la suma de los valores de Ce provenientes de las ecuaciones 18 y 19. En caso de no cumplir con el nitrógeno total requerido, se realiza otra iteración.⁹

Diseño para remoción de fósforo

La remoción de fósforo se da a largo plazo, y ocurre solo a través de la acumulación de sedimentos. La separación de estos ocurre en su mayoría por la precipitación química y por la sedimentación particulada. Estos se acumulan encima del lecho de los humedales de flujo sub superficial. El fósforo se retiene en sedimentos tales como precipitados de hierro, aluminio o calcio.

Cuando se tienen límites de descarga muy estrictos en cuanto a la remoción de fósforo, se puede considerar hacerla en una laguna anterior o posterior. En caso contrario el humedal podría resultar demasiado grande. La deposición de sedimentos es la principal manera de eliminar el fósforo y la masa que se remueve es proporcional al área superficial y a la concentración de fósforo en el agua residual. Se puede estimar la remoción de fósforo de los humedales por medio de las siguientes ecuaciones:¹¹

⁹ Reed. Natural systems for waste management and treatment. 1995

¹¹ Subsurface flow constructed wetlands for wastewater treatment. 1993. United States Environmental Protection Agency.

$$\frac{C_e}{C_o} = \exp\left(\frac{-K_p}{CH}\right) \text{ (Ecuación 20)}$$

Dónde:

Ce es la concentración de fósforo en el efluente [mg/l].

Co es la concentración de fósforo en el afluente [mg/l].

K_p es 2.74 cm/d.

CH es la carga hidráulica promedio anual [cm/d].

$$A_s = \frac{(b)(Q)\ln\left(\frac{C_o}{C_e}\right)}{K_p} \text{ (Ecuación 21)}$$

Dónde:

As es el área superficial del humedal [m²].

B es el factor de conversión (100cm/m).

Q es el caudal promedio del humedal [m³/d].

Este modelo fue desarrollado con datos de humedales de flujo libre. Sin embargo puede aplicar para humedales de flujo sub superficial, pues depende del área superficial y no de las reacciones biológicas que se producen en esta o en residuos de plantas en el humedal.

Un inconveniente para realizar la remoción de fósforo del efluente final con este método es que se requiere de un área muy grande, con la cual muchas veces no se puede contar. Por esto puede resultar necesario integrar un tratamiento alternativo para realizar la eliminación de fósforo.

Construcción del humedal construido

Limpieza del terreno

El objetivo es retirar toda la vegetación, construcciones existentes y aproximadamente 20 centímetros de capa vegetal superficial que se encuentra en el sitio de la construcción. Esta etapa también incluye el transporte del material recogido. Deben eliminarse todos los troncos y raíces de diámetro mayor a 10 centímetros con medios manuales o mecánicos, y que quede

como mínimo una profundidad de 30 centímetros con respecto a la superficie del terreno.³



Figura 9. Operaciones de limpieza durante la construcción de un humedal construido.

Excavación y movimiento de tierras

Generalmente la excavación se realiza con medios mecánicos convencionales. En caso de encontrarse el terreno en una cuesta, pueden resultar necesarios taludes de excavación, los cuales pueden ser temporales o permanentes.

Cuando se cuenta con aguas freáticas, es necesario disponer de equipos de evacuación de las mismas para realizar el movimiento de tierras en seco. También se puede proyectar un sistema de drenaje del nivel freático debajo de las celdas del humedal, para impedir se que produzcan hundimientos de las celdas cuando estas se rellenen con el material granular, o cuando la obra haya entrado en funcionamiento.

Después de realizado el movimiento de tierras, se realiza un levantamiento topográfico para comprobar las dimensiones de las celdas que constituirán el sistema.³

³ García. Depuración con humedales construidos. 2008.

³ García. Depuración con humedales construidos. 2008.



Figura 10. Excavación de zanja para la colocación de una tubería.



Figura 11. Movimiento de tierras para un humedal construido.

Nivelación y compactación de las celdas.

Esta etapa es de enorme importancia, pues una nivelación incorrecta va a provocar que el agua no circule de la manera deseada.

La compactación se realiza extendiendo una o dos capas de material sin gravas de espesor menor a 25 centímetros. Se compactan una a una y se debe tomar en cuenta el grado de compactación según el tipo de suelo.

Después de realizada la compactación, es recomendable dar un tratamiento herbicida sobre la superficie de los lechos, e impedir la formación de vegetales.

Sistemas de distribución y recogida.

Los elementos más importantes en estos sistemas son las arquetas, las tuberías y los canales.

Las arquetas pueden ser prefabricadas, y para colocarlas se hace una excavación de mayor tamaño que las mismas. Se construye una losa de mortero de 6 centímetros de grosor, luego se introduce la arqueta con las conexiones a las tuberías ya preparadas y se rellena el espacio entre la excavación y la arqueta con material filtrante.

Las tuberías son las que permiten que el agua circule por los diferentes procesos del humedal. Se debe tener precaución de no golpear las tuberías cuando se están instalando.

Los canales de entrada al sistema, se colocan en la cabecera de la celda y en todo su ancho, para que así el agua residual se reparta uniformemente. El método constructivo es el mismo que en cualquier canal de una obra hidráulica.



Figura 12. Colocación de la tubería de salida en un humedal construido de flujo sub superficial.

Impermeabilización.

El primer paso es la colocación de la geomembrana sobre toda la superficie de las celdas, lo cual requiere de gran cuidado en el anclaje, cuando se deben evitar las arrugas en la lámina. En los puntos en los que las tuberías penetran las celdas se recortan las láminas.

Después de instalada la geomembrana se puede llegar a necesitar instalar el geotextil, a menos que las celdas sean no presenten irregularidades y estén constituidas por materiales finos. La instalación del geotextil es similar a la de la geomembrana: ambas sencillamente se sobreponen.³



Figura 13. Colocación de la geomembrana.

Material granular

Este relleno inicia con la colocación de la franja de material de mayor tamaño en el inicio y el final de las celdas. Se debe comprobar que el material granular que se coloca se encuentre limpio y libre de finos.

La colocación del material se debe realizar, en la medida de lo posible, desde afuera de las celdas. Esto para que la maquinaria que realice este trabajo no dañe la impermeabilización ni hunda el fondo de las mismas.



Figura 14. Arriba: Colocación de material granular desde exterior de la celda. Abajo: colocación de material granular con maquinaria liviana desde interior de la celda.

³ García. Depuración con humedales construidos. 2008.

Vegetación

Esta es la última etapa en la construcción del humedal, y se realiza una vez que el material granular ha sido colocado y nivelado, y que se han conectado las conducciones y arquetas. Cuando se realiza la plantación, las celdas ya deben contener agua.

Se pueden sembrar plántulas que han sido cultivadas previamente en viveros, además de plantar rizomas de otros sistemas de humedales construidos.

Las plántulas se introducen en huecos pequeños hechos manualmente. Una parte de la biomasa subterránea de las plantas debe estar sumergida en el agua. La plantación puede realizarse a razón de tres plantas por metro cuadrado.³



Figura 15. Operaciones de sembrado de plántulas de carrizo en un sistema sub superficial.

Después de realizada la plantación es recomendable que el agua esté a unos dos centímetros por encima del nivel del medio granular, para impedir la formación de hierbas malas.

Una vez que los vegetales han alcanzado un buen desarrollo, el nivel del agua se sitúa a cinco centímetros por debajo de la superficie del medio granular, como es habitual.³

³ García. Depuración con humedales construidos. 2008.

Resultados y Análisis

TABLA 4. DATOS INICIALES UTILIZADOS			
Datos	Variable	Cantidad	Unidades
Concentración DBO afluente	DBO_a	12878	mg/l
Concentración DBO efluente	DBO_e	40	mg/l
SST afluente	SST_a	2043	mg/l
Profundidad	Prof	0,68	m
Porosidad	Poros	0,36	
Coefficiente de Conductividad Hidráulica	Ks	8000	
Temperatura media agua	Temp	20	°C
Caudal	Q	25	m ³ /d
Concentración Fósforo Afluente	Fosf_a	24	mg/l
Concentración Amoniaco afluente	NH3_a	809,25	mg/l
Concentración Amoniaco efluente	NH3_e	45	mg/l
Numero celdas del humedal	Nceldas	2	

Word Xp

Se elaboró una hoja de cálculo con el programa Microsoft Excel 2007, para calcular el dimensionamiento de los humedales construidos de flujo sub superficial. Esta resulta ser una herramienta útil en la tarea de cálculo y produce un ahorro importante de tiempo. Además, está respaldada por las fórmulas de la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos, EPA según sus siglas en inglés.

Por medio de esta hoja electrónica, y con la introducción de valores como el caudal de diseño, la profundidad media que se quiere del humedal, la porosidad del medio por el que transcurrirá el líquido, los parámetros fisicoquímicos de los lixiviados en su entrada al humedal y los parámetros que se pretenden en su salida.

Las concentraciones de los lixiviados que se introducen en la hoja de cálculo son con los que se cuenta para la respectiva fórmula del cálculo del área requerida para lograr la remoción que se requiere.

Para determinar cuáles eran los parámetros que se debían tomar en cuenta en la hoja de cálculo se hizo una comparación entre la caracterización de los lixiviados de un relleno sanitario y el Decreto No. 33601 de Vertido y Reuso de Aguas Residuales de Costa Rica.

Al momento de hacer el cálculo del dimensionamiento la empresa encargada del proyecto no contaba con la autorización para comenzar con el mismo, por lo que no se contó con un estudio de lixiviados. En consecuencia, se realizó una comparación de la caracterización de los lixiviados de tres rellenos sanitarios ubicados en zonas no urbanas de Latinoamérica, pues los datos para Costa Rica no se encontraban disponibles públicamente. Esta comparación se encuentra en los anexos. A raíz de esto, se decidió utilizar como referencia el Relleno Sanitario El Guayaban en Colombia, pues la mayoría de sus concentraciones resultaron ser las mayores de los tres rellenos. Además, el que presenta la menor cantidad de lluvia anual. Esto refleja una gran ventaja si se lo compara con la

precipitación anual del distrito de Roxana en Pococí, donde habrá un mayor volumen de agua para que los lixiviados se disuelvan.

En la hoja de cálculo se estima el área con que debe contar el humedal para que se logre la remoción de cada uno de los lixiviados que se consideran “críticos”, los cuales son en su mayoría los mencionados en el Decreto como “de análisis obligatorio”. Como resultado, el área que resulte mayor será la que rija el dimensionamiento del humedal.

TABLA 5. DETERMINACIÓN DEL CAUDAL DE LIXIVIADOS GENERADOS POR EL RELLENO SANITARIO			
Precipitación promedio diaria (m)	Área ocupada por basura (m ²)	Coefficiente de compactación de basura	Caudal de lixiviados generados diariamente (m ³ /d)
0.0136	12000	0,15	24,53

Word Xp

El primer cálculo realizado fue el de la cantidad de lixiviados generados por día. Este estimado se obtuvo por medio de la Ecuación 1.

TABLA 6. DATOS OBTENIDOS REQUERIDOS PARA OBTENER EL ÁREA NECESARIA PARA LA REMOCION DE DBO					
Factor por temperatura	Área superficial (m ²)	Tiempo de retención hidráulica (días)	Ancho de celda mínimo (m)	Largo de celda (m)	Relación largo: ancho
1.104	534,2	5.2	6.01	44.51	7.41

Word Xp

Una vez adquirido este básico dato, se inició por calcular el área requerida para llevar a cabo la remoción de la demanda biológica de oxígeno DBO, por medio de la Ecuación 13 de este documento. Para esto fue necesario también estimar la constante de la temperatura presente por medio de la Ecuación 12, para la cual se tomó la menor temperatura anual de la zona como factor de seguridad, pues un aumento en la temperatura reduciría el cálculo del área requerida. A este resultado se le debe tomar en cuenta, además, el tiempo de retención hidráulica que tendría el líquido fluyendo a través del humedal. Este se calcula por medio de la Ecuación 3.

Por último, por medio de la ecuación 10 se calcula el ancho mínimo aceptable con el que debe contar el humedal. De ser necesario, los datos de caudal, área calculada y conductividad hidráulica se dividen entre el número de celdas con que se quiere que cuente el humedal. Esto resulta en el ancho mínimo, que sería el ancho de cada celda. Una vez calculado este y con conocimiento del área necesaria, se estima el largo con el que deberá contar cada celda del humedal. Después de calculados tanto el largo como el ancho, se debe verificar que la relación largo: ancho, sea de al menos de 1:1, y nunca mayor que 10:1.

TABLA 7. RENDIMIENTO EN LA REMOCIÓN DE LOS SÓLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES		
Carga hidráulica (cm/d)	Concentración de sólidos suspendidos totales en el efluente (mg/l)	Rendimiento de la remoción de sólidos suspendidos totales (%)
3.5	226,1	89

Word Xp

Si bien la remoción de los sólidos no cumple con los requerimientos del Decreto, esto es permisible pues los lixiviados, antes de ingresar al humedal, pasan por un tanque de sedimentación y luego entran a un segundo tanque que los lleva al humedal, en el cual también es posible que

queden aún mas sedimentos que lograron colarse. Por esto se puede permitir que en el cálculo teórico haya una concentración que supere la permitida, pues la mayor parte de los sólidos no van a lograr ingresar al humedal, y quedarán sedimentados en los distintos tanques.

TABLA 8. DATOS OBTENIDOS REQUERIDOS PARA OBTENER EL NITRÓGENO TOTAL EN EL EFLUENTE					
Porcentaje de profundidad ocupado por raíces (%)	Constante de nitrificación	Área requerida para nitrificación (m ²)	Tiempo de retención hidráulica (días)	Concentración de nitratos en el efluente (mg/l)	Concentración de nitrógeno total en el efluente (mg/l)
100	0,411	718,4	7,0	6,73 E-01	45,7
50	0,083	3560,2	34,9	5,33 E-13	45,0

Word Xp

Después se realizó el cálculo del área requerida para la nitrificación del humedal. Se realiza este cálculo para los casos en que las raíces ocupan el 100% y el 50% de la profundidad. Cada caso cuenta con una constante de nitrificación distinta, calculada por medio de la Ecuación 14. Seguidamente se ingresan los valores de amoníaco presentes en el afluente y los esperados en el efluente en la ecuación 16 con la que se estima la cantidad requerida para cada una de estas situaciones. Además se utiliza nuevamente la Ecuación 3 para obtener el tiempo de retención hidráulica del líquido dentro del humedal.

Por medio de la ecuación 18 se calcula la cantidad de nitratos en el efluente. En este caso la diferencia de la cantidad de nitrógeno amoniacal entre el afluente y el efluente, será la concentración de nitratos en el primero.

La cantidad de nitrógeno total en el efluente producido será la suma del nitrógeno amoniacal en el efluente sumado a la cantidad de nitratos en el mismo medio. Como la situación a la que se va a llegar es que las plantas ocupen el 100% de la profundidad, se utilizan los cálculos obtenidos para esta situación.

TABLA 9. DATOS OBTENIDOS REQUERIDOS PARA OBTENER EL ÁREA NECESARIA PARA LA REMOCION DE FÓSFORO		
Carga hidráulica (cm/d)	Concentración de fósforo en el efluente (mg/l)	Área requerida para remover un 87,5 % del fósforo producido (m ²)
3.5	10,9,1	1493,9

Word Xp

Para el caso de la remoción de fósforo, se hizo un ejemplo demostrativo de la gran área que se necesita para llevar a cabo esta tarea. Se supuso que en el afluente hay una concentración de fosfatos menor que la que se exige en el efluente. Para obtener una remoción del 85% se

necesitaría de un área total de más del doble de la requerida para la de nitrógeno, y no se están superando los límites exigidos. Este dimensionamiento no toma en cuenta al momento del diseño final. Estos datos se obtuvieron por medio de las Ecuaciones 20 y 21.

TABLA 10. DIMENSIONAMIENTO FINAL A UTILIZAR			
	Ancho (m)	Largo (m)	Relación largo: ancho
Teórico	15,58	23.05	1,5:1
Práctico	16,00	23	1,4:1

Word Xp

Después de calculadas las diferentes áreas para cada uno de los contaminantes, medio de la Ecuación 10 se determina el ancho mínimo requerido por el humedal, así como su largo. Se verifica que la relación largo: ancho sea mayor a

1:1 y menor a 10:1. Esta se puede manipular para que se ajuste de la mejor manera al sitio.

En el caso de este humedal, ya que la mayor área resultó ser la necesaria para llevar a cabo la nitrificación, se utiliza esta zona para los respectivos cálculos de ancho mínimo y largo.



Figura 16. Vista de la futura ubicación del humedal construido.

Características del humedal

El humedal propuesto consta de una profundidad que va desde los 60 cm hasta los 76 cm, con una pendiente del 1%. Esta altura fue escogida con base en la profundidad que alcanzan las raíces de la vegetación propuesta, de manera que estas logren llegar lo más cerca posible al fondo del lecho. Se puede apreciar esta pendiente en la Sección C-C de la segunda lámina de los planos constructivos del presente trabajo.

En el fondo del humedal se debe colocar un material impermeabilizante y resistente que no permita que el agua se filtre por abajo, por lo que se cubrirá completamente con geomembrana de 1.5 mm de espesor. Al colocarla se debe anclar a la tierra en sus ocho lados (cuatro lados en cada ceda), con el fin de que no se desplace en ninguna dirección y se mantenga firme. Además se colocará piedra cuarta sobre la parte anclada que colabore con esta causa.

La primera capa colocada será la única que vaya inclinada sobre la pendiente. Después de colocada esta, el espacio restante quedará completamente nivelado. Esta capa conformada por piedra de 8 cm de diámetro tendrá la función de servir de drenaje en el fondo del humedal y ayudará a prevenir que el agua se retenga en el fondo.

Después de colocada esta capa de piedra, se pondrá una cubierta delgada de burucha que tendrá la función de impedir que la siguiente se filtre por la piedra gruesa y rellene los vacíos necesarios para que fluya el agua.

Seguidamente se coloca la próxima capa, en la cual se utiliza piedra quinta (3/8"). Esta es el medio en el que el agua y las raíces estarán en contacto constante. Las razones por las que se utiliza esta granulometría son: para que cuando las raíces se desarrollen puedan sostener la piedra; y presenta una porosidad de aproximadamente 35%, lo que hace posible que el agua se pueda desplazar por estas cavidades.

La capa superior es una mezcla de suelo del sitio, fibra de coco, compost y burucha. Esta servirá como un medio apropiado para sembrar las plantas, las cuales se han cultivado con anterioridad en un vivero. Esta capa es muy importante para que las plantas puedan desarrollarse, pues no podrían crecer si se ponen

en contacto con los lixiviados desde un principio. La distribución de estas capas se muestra en la tercera lámina de planos constructivos, en el detalle de las capas de suelo.

Por último, el humedal cuenta con un soporte de taludes en cada una de sus paredes para que sostenga la presión de la tierra. Estos taludes tienen una pendiente de 1:1 y están conformados por piedras de 8 cm y tienen un espesor de 40 cm. Entre otras funciones tienen la de servir como entrada de los lixiviados al humedal en su parte superior, pues sus poros permiten que el líquido pueda entrar sin obstrucciones.

El libro recopilatorio acerca del simposio realizado en Estados Unidos en 1997 acerca de humedales construidos para el tratamiento de lixiviados de rellenos sanitarios, presenta tres grandes especies de plantas utilizadas en estos proyectos. Se escogió utilizar la planta *Phragmites Australis*, la cual es también tiene una mención de recomendación en los manuales de la EPA y que además de haber sido utilizada un muchos experimentos para comprobar su rendimiento, de los que se han obtenido resultados muy positivos, cuenta con una penetración de raíces adecuada para este humedal (aproximadamente 60 cm).

Puesta en marcha

Para que el humedal empiece a funcionar es necesario en primera instancia llevar los lixiviados generados por el relleno sanitario. Para que los rendimientos esperados empiecen a producirse serán necesarios aproximadamente seis meses, tiempo que le tomará a las plantas desarrollar sus raíces a la profundidad esperada.

El primer paso es llevar los lixiviados a un tanque de recolección plástico que se encuentra enterrado a una profundidad menor que la de donde estos se producen con el fin de que no se necesite hacer uso de un sistema de bombeo que los lleve a este sector. Unida a este tanque, habrá una bomba hidráulica automatizada que transportará los lixiviados al tanque de sedimentación cuando el de recolección se encuentre lleno hasta algún nivel determinado.

Este proceso podría estar ocurriendo muy continuamente. La escogencia de esta bomba se realizó haciendo una comparación de los

rendimientos que tienen los productos disponibles.

Los próximos dos tanques: el de sedimentación, y el que comunica los lixiviados con el humedal serán contenedores de 20 pies sin tapa, colocados sobre una base sobre la superficie. A estos posteriormente se les colocará una lona para evitar cualquier tipo de accidente con los trabajadores del relleno sanitario. En la tercera lámina de los planos constructivos se muestra esto en el detalle de contenedores y tanque de lixiviados.

Estos dos estarán unidos por un tubo horizontal que los comunicará. Las tuberías de entradas y salida llevarán en los extremos una "T" para reducir el comportamiento turbulento en estas zonas. Cada uno de estos contenedores tiene una capacidad de almacenamiento de 32 metros cúbicos, por lo que no hay riesgo de que se desborde el líquido, pues se cuenta con un caudal teórico de 25 metros cúbicos diarios y mientras se estén produciendo lixiviados, estos siempre estarán ingresando al humedal.

Los lixiviados tienen una gran capacidad para corroer y dañar el metal del contenedor en cuestión de días, por lo que se deberá cubrir el interior de este con fibra de vidrio, para alargar su vida útil significativamente. Esta fue una recomendación para este proyecto el Ingeniero Jorge Calvo Gutiérrez, del Instituto Tecnológico de Costa Rica.

Seguidamente, los lixiviados se traspasan a cuatro cajas de registro de afluentes colocadas linealmente, separadas 6 m entre ellas y colocadas 60 cm bajo el nivel del terreno. Este sistema comunica el segundo tanque contenedor con la primera de estas cajas por medio de una tubería de 4 pulgadas de diámetro. Estas cajas son tanques de PVC de 18 pulgadas de diámetro, con una entrada y tres salidas cada una; la entrada es la que proviene del segundo contenedor o de la caja de registro de afluentes anterior y se encuentra colocada a 45 cm del fondo, mientras que las salidas son: dos a cada una de las celdas del humedal, ubicadas a 15 cm sobre el fondo de las cajas; y la otra a la caja de registro siguiente, ubicada a la misma altura a la que se encuentra su entrada. Las cuatro cajas de registro tendrán las mismas características.

La entrada a la primera será controlada por una válvula que regulará la entrada del líquido en caso de considerar que se necesite detener el flujo en algún momento, o que se considere que

se necesita hacer la entrada intermitente para mantener el líquido más tiempo en el humedal. Estas cajas se encuentran colocadas a lo largo del espacio que separa las dos celdas del humedal construido y tendrán la función de recibir y distribuir el líquido proveniente del segundo tanque contenedor.

Las cuatro cajas llegan son abastecidas por medio de un sistema en el que el líquido empieza a ingresar al humedal al momento en que entra a su respectiva caja de registro y la tubería que se dirige a la siguiente caja se encuentra colocada arriba de estas salidas al humedal. Por esto en el momento que esta se llena hasta una altura de 45 cm, se rebalsa y se fuga por esta tercera salida, la cual es el mismo tubo de la entrada de la siguiente caja de registro de afluente. Este proceso ocurre en las tres primeras cajas.

La función de las últimas tres es de seguridad, pues en caso de que la primera ya no pueda recibir más líquido y provoque algún estancamiento en el humedal, estas cajas servirán de respaldo. En el caso de la tercera salida de la última caja, esta irá dirigida de regreso al tanque de sedimentación. Esto en el caso de que el líquido se rebalsara en esta, lo cual se debe tomar en cuenta aunque no sea muy probable. Para esto se utilizará una tubería que hará prácticamente una vuelta en "U". Esta se colocará subterráneamente, pues se encontrará al mismo nivel de las demás, y llevará una pendiente del 1% para que el líquido se desplace por medio de la gravedad y no necesite de una bomba hidráulica. Esta conducirá el líquido al tanque de sedimentación. Una vez llegado el líquido a este, se volverá a iniciar el proceso. En el detalle: diagrama de alimentación de humedales, ubicado en la tercera lámina de los planos constructivos se muestra gráficamente como se plantea este sistema. Además también se muestran dos detalles de estas cajas de registro de afluente en la misma lámina.

Cada una de las salidas de las cajas de registro mencionadas anteriormente es una entrada al humedal. Se trata de tuberías que ingresan por la parte inferior del talud (sobre la capa intermedia del humedal). Después de estas, y sobre el mismo nivel, se encuentran cuatro tuberías perforadas de 4 pulgadas de diámetro y dos metros de longitud cada una, las cuales tienen la función de distribuir aún más la entrada de los lixiviados al humedal. Estas se muestran

en la Sección A-A ubicada en la segunda lámina de los planos constructivos.

Una vez dentro del humedal, los lixiviados tardan 7 días en salir, siempre que el caudal de entrada sea constante y de 25 metros cúbicos diarios. En caso de que la entrada sea intermitente, este tiempo de retención será mayor. Mientras tanto, el líquido transita entre la piedra quinta y está en contacto con las raíces de las plantas, las cuales son las encargadas de la *purificación* por medio de procesos biológicos tales como la nitrificación o la desnitrificación.

Cuando los lixiviados llegan al otro extremo del humedal, son recibidos en el fondo de este por una tubería perforada colocada a lo largo de este, con la función de conducirlos afuera. En la sección B-B ubicada en la segunda lámina de los planos constructivos se muestra gráficamente esto.

A continuación, una tubería sin perforar comunica a la perforada con cinco tanques (en cada celda) de control de nivel de líquido ubicados en el exterior y a lo largo del lado mayor de cada extremo del humedal construido. Estos tanques de control de nivel son de PVC de 18 pulgadas de diámetro, y se encuentran a una profundidad de 80 cm para que coincidan con la que tiene el humedal en su parte más profunda (los 76 cm que alcanza al descender por la pendiente del 1%).

Estos tanques contienen en su interior un codo unido con un tubo vertical que tiene su extremo superior al mismo nivel al que se encuentra la parte más alta de la capa de piedra quinta, para que de esta manera el agua se mantenga constantemente al menos a ese nivel. Después de rebasar ese nivel y conseguir entrar al tanque, el líquido es transportado por una tubería sin perforar, a la zona de recepción de aguas pluviales o desagüe natural. En la tercera lámina de los planos constructivos adjuntos se muestra un detalle de estas cajas de control de nivel del humedal.

Otras consideraciones de diseño

Todas las tuberías utilizadas en el humedal son de 4 pulgadas de diámetro: este es prácticamente el estándar en los proyectos que

se analizaron y, además, con este se logra mantener un flujo muy lento sobre cada una de las tuberías. El caudal de lixiviados producidos por el relleno sanitario, en combinación con el área de la tubería, provoca una velocidad de flujo que nunca llegará a ser siquiera cercana a 10 cm por segundo en caso de encontrarse la válvula de entrada al humedal siempre abierta, por lo que el movimiento será siempre muy lento.

El humedal construido incluye también tuberías verticales que tienen una doble función: monitoreo del nivel de agua y de ventilación. Estas se encuentran colocadas en el fondo y son sostenidas por medio de una unión con los tubos de las cajas de registro de afluentes de un lado y con los tubos de las cajas de control del nivel del otro. Estas uniones impiden que se puedan torcer. Dichas tuberías son perforadas hasta el nivel en que coinciden con la parte superior de la capa de piedra quinta, para que ingrese el líquido que se encuentra en el humedal. Además, se encuentra forrada con un geotextil para que no entren piedras ni grava que la puedan obstruir por dentro. Desde ese extremo hasta una altura de 50 cm sobre el nivel del terreno, la tubería no tiene perforaciones y posee una tapa perforada en la parte superior que sirve de aireación para el interior del humedal.

Ubicación del humedal construido

Se realizó un cuadro comparativo entre cinco posibles ubicaciones para el humedal construido, el cual se muestra en los apéndices de este documento. Después de analizar las ventajas y desventajas que acarrea la construcción en cada uno de los sitios, se tomó la decisión de hacerlo en la zona que mejor satisficiera las necesidades de la empresa encargada del proyecto.

Con la opción escogida, a diferencia de con las demás, el nivel freático no se va a convertir en un problema que requiera una bomba hidráulica para sacar el agua que aparezca. Además, no se necesita construir caminos de acceso para la maquinaria encargada de la excavación del humedal, ni para las vagonetas que llevan la piedra de las capas, así como de otro transporte de materiales para la

construcción. Por estas razones, la obra podría empezar su ejecución en el momento que se necesite.

TABLA 11. RESUMEN DE CANTIDAD DE MATERIALES Y COSTOS DE LA OBRA

Material	Cantidad	Unidad	Precio unitario	Precio
Tanque de bombeo 4200 litros	1	U	369262	Ø369.262,00
Bomba sumergida Grundfos SE50 96001483	1	U	190455,2	Ø190.455,20
Contenedor 20 pies	2	U	1560000	Ø3.120.000,00
Tubería PVC 4 pulgadas	215	Metros	4247,2	Ø913.140,83
Tubería PVC 2 pulgadas	6	Metros	1203,833333	Ø7.223,00
Tubería perforada 4 pulgadas	73	Metros	2251,2	Ø164.335,17
Tubería 18 pulgadas	11	Metros	91192,66667	Ø1.003.119,33
Piedra 18 cm de diámetro	71,2	m ³	7500	Ø534.000,00
Piedra quinta	128,8	m ³	9300	Ø1.197.840,00
Piedra cuarta	24,5	m ³	9300	Ø227.850,00
Mezcla con compost	61,2	m ³	25000	Ø1.530.000,00
Geomembrana HDPE 1.5 mm	955,4	m ²	2860	Ø2.732.444,00
Uniones para tubos 4 pulgadas	14	u	1548,67	Ø21.681,38
Codos de 90°	14	u	2384,96	Ø33.389,44
"Ts"	21	u	3269,91	Ø68.668,11
Llave reguladora de entrada	1	u	46867	Ø46.867,00
Tapas 4 pulgadas	18	u	376,11	Ø6.769,98
Plantas	2500	u	5,2	Ø13.000,00
Maquinaria y mano de obra				Ø3.000.000,00
Dirección y gastos administrativos				Ø1.500.000,00
				Ø16.680.045

Word XP

Recomendaciones

1. Realizar un estudio de caracterización de los lixiviados generados por el relleno sanitario, pues los datos con los que se trabajó pueden variar de la realidad.
2. Contar con mano de obra calificada para la construcción, que tenga experiencia en uniones y colocación de tuberías.
3. Tener las semillas sembradas con anterioridad en un vivero cercano, para que las plantas puedan crecer antes de ser colocadas en el humedal.
4. Colocar una capa de arena sobre la geomembrana antes de colocar la primera capa de piedras, pues estas la pueden dañar.
5. Asegurarse que se han colocado plantas en todo el humedal construido, y que no queden zonas sin plantación.
6. En caso de poca precipitación, y por consiguiente, poca generación de lixiviados, se debe regular una entrada intermitente al humedal, pues no se puede permitir que este se seque por completo.
7. Periódicamente se deben limpiar los sedimentos que quedan en el tanque de sedimentación.
8. Podar las plantas cuando estas estén alcanzando alturas muy grandes, pues esto puede convertirse en un problema para notar algún malfuncionamiento.
9. Habitualmente chequear los tubos verticales de monitoreo de nivel, pues estos indican la altura a la que se encuentra el agua en los distintos puntos de entrada y salida del humedal, y esto también puede hacer notar algún problema con el flujo de líquido.
10. Tomar muestras del líquido que ingresa y del efluente periódicamente, para verificar un buen funcionamiento, especialmente en los primeros meses de haber puesto en marcha la operación.
11. En ciertas zonas del humedal, probar el funcionamiento de otras especies de plantas, para tomarlo en cuenta en caso de que se necesite cambiar.
12. Una vez construidos los humedales propuestos, y que estos entren en funcionamiento, hacer una valoración para validar el diseño propuesto.
13. Colocar chimeneas en los tanques sedimentadores, para aumentarles su vida útil.
14. Para tiempos de mucha sequía, colocar una tubería de recirculación de líquido, para que el humedal no se vaya a secar.
15. Se puede conseguir información acerca del mantenimiento que requieren estas plantas en el libro *Constructed wetlands for the treatment of landfill leachates* mencionado en la sección de Referencias de este documento..
16. Se contactar la adquisición de las plantas utilizadas en el humedal al número de teléfono 580-822-3655, en Oklahoma, Estados Unidos.

Conclusiones

1. Los humedales construidos son una tecnología factible para el tratamiento de gran variedad de aguas residuales.
2. En muchos países del mundo, esta es una tecnología que se ha venido aplicando más en los últimos años.
3. La realización de este proyecto de construcción sería de gran beneficio para el ecosistema y para la salud de la población cercana al Sitio Los Laureles.
4. El sistema de tratamiento de lixiviados propuesto es natural, pues la bomba hidráulica es el único recurso que necesitaría de electricidad para funcionar.
5. La operación de este sistema no requiere de mano de obra especializada, ni permanente, lo que reduce los costos.
6. Los humedales construidos permiten la reutilización del agua residual, por ejemplo para uso en agricultura.
7. Este sistema se construye en armonía con el paisaje.
8. Suministran hábitat para varios microorganismos.
9. El humedal requiere de al menos una pequeña cantidad de líquido para sobrevivir, en caso de que el humedal se encuentre seco, pueden morir la vegetación.
10. Es un sistema que puede llegar a requerir de grandes áreas de terreno.
11. En caso de contar con el terreno necesario para su construcción, puede resultar ser un tratamiento mucho más económico que un tratamiento convencional.
12. Pueden llegar a pasar inadvertidos por el público en general.
13. Por medio de la hoja de cálculo preparada, se puede estimar el dimensionamiento de un humedal de flujo sub superficial horizontal de forma rápida y confiable.

Apéndices

Se adjuntan 9 apéndices. El número 1 es un mapa del relleno sanitario con cinco posibles ubicaciones para el humedal construido. El segundo es un cuadro comparativo realizado para determinar la mejor localización de la obra. Los apéndices del 3 al 7 son fotografías que muestran cada una de estas localizaciones.

Apéndice 1. Mapa del relleno sanitario con las ubicaciones que se tomaron en cuenta para construir el humedal.



Apéndice 2. Cuadro comparativo para la selección de la ubicación del humedal construido.

<u>UBICACIÓN</u>	<u>VENTAJAS</u>	<u>DESVENTAJAS</u>
# 1	<ul style="list-style-type: none"> • El terreno está limpio. • Hay un fácil acceso para mantenimiento. • El terreno es plano. 	<ul style="list-style-type: none"> • El nivel freático alto puede complicar la construcción. • El efluente queda muy a la vista. • El efluente va a una quebrada pequeña y de bajo caudal.
#2	<ul style="list-style-type: none"> • El terreno está limpio. • Tiene fácil acceso para su mantenimiento. • El terreno es plano. 	<ul style="list-style-type: none"> • Se debe remover la casa. • El nivel freático alto puede complicar la construcción. • El efluente queda muy a la vista. • El efluente va a una quebrada pequeña y de bajo caudal.
#3	<ul style="list-style-type: none"> • Es un terreno firme. • El nivel freático no es un problema. • Está cerca del punto de mayor generación de lixiviados. • No requiere camino nuevo. • Se puede iniciar la construcción inmediatamente. • El efluente queda en dirección a futuros drenajes que van de este a oeste. • Si se requiere puede ampliarse pues existe campo. • Si se requiere espacio para relleno en el futuro, esta ubicación se convertiría en la base para una nueva celda de basura. 	<ul style="list-style-type: none"> • Existe alguna basura depositada a un nivel más bajo, por lo que habría que bombear algunos lixiviados. • Los niveles de lixiviados más bajos requieren un tanque de depósito. • Si se requieren bombas se necesita llevar electricidad pero no está tan lejos. • Si el relleno crece rápido, el humedal tiene que reubicarse en 2 ó 3 años. • Nota: debe dejar espacio para un camino lateral.
#4 y #5	<ul style="list-style-type: none"> • Hay poca visibilidad y no habría problemas de olores. • Tendría un nivel del fondo similar a la futura celda de basura. 	<ul style="list-style-type: none"> • Esta ubicación requiere que se construyan drenajes más largos. • Requiere el mejoramiento del acceso para la construcción.

Apéndice 3. Fotografía de la ubicación 1 tomada en cuenta para la construcción del humedal



Apéndice 4. Fotografía de la ubicación 2 tomada en cuenta para la construcción del humedal



Apéndice 5. Fotografía de la ubicación 3 tomada en cuenta para la construcción del humedal



Apéndice 6. Fotografía de la ubicación 4 tomada en cuenta para la construcción del humedal



Apéndice 7. Fotografía de la ubicación 5 tomada en cuenta para la construcción del humedal



Anexos

Se adjuntan 6 anexos. El número 1 corresponde a un estudio climatológico preparado por la Escuela de Ciencias Geográficas de la Universidad Nacional de Costa Rica. El 2,3, y 4 son las caracterizaciones de los lixiviados de tres rellenos sanitarios distintos en Latinoamérica. El anexo número 5 es un recorte de los límites máximos permisibles que exige el Gobierno de Costa Rica para verter aguas en un cuerpo receptor. El anexo 6 es una fotografía demostrativa del tallo de una planta utilizada en humedales artificiales, esta se bajó de Internet. Por último en el anexo 7 se muestra la curva de rendimiento para la bomba hidráulica escogida.

Anexo 1. Estudio Climatológico para el distrito de Roxana en el cantón de Pococí.

CLIMA USAF	CALIDO/HUMEDO/MUYHUMEDO
CLIMA USAF DETALLE	CALIDO/HUMEDO3/MUYHUMEDO9
CLIMA KOPPEN	Af
PRECIPITACION ANUAL mm	4975
PRECIPITACION MENSUAL mm	E398-F219-MZ173-AB277-MY376-JN474-JL612-AG466-S351-O445-N594-D590
TEMPERATURA ANUAL (C)	temp-med=25-- temp max=29-- temp-min=20
TEMP. VARIACION ANUAL (C)	1.82
EVAPOTRANSPIRACION ANUAL mm	1585
EVAPOTRANSPIRACION MENSUAL mm	E119-F119-MZ146-AB144-MY147-JN134-JL133-AG140-S138-OC136-N119-D110
PROMEDIO HORAS SOL	4
LLUVIAS MAXIMAS EN 24 HORAS mm	100 a 125
MESES SECOS (INDICE M.A.I.)	0
INDICE FOURNIER	75
ALTITUD PROM. METROS	159
ORIENTACION DE LADERAS	E
VIENTO Km/h MENSUAL	E9-F9-MZ9-AB10-MY8-JN6-JL7-AG6-S6-OC6-N7-D9
AUTOR	GONZALO HERNANDEZ R.

Anexo 2. Caracterización de lixiviados en el Relleno Sanitario El Guayaban en Colombia

Parámetro	Unidad	Promedio	Mínimo	Máximo
pH	-	7,54	6,5	8,35
DQO	mg/L O ₂	16334	7650	28250
DBO ₅	mg/L O ₂	12878	5250	20890
DBO ₅ : DQO		0,78	0,68	0,89
Sólidos totales	mg/L	15961	11478	24370
Sólidos sedimentables	ml/L*h	1,2	0,2	3
Sólidos suspendidos	mg/L	2043,2	336	3974
Turbiedad	NTU	359	210	600
Cloruros	mg/L Cl ⁻	1496	260	5300
Dureza total	mg/L CaCO ₃	3878	1764	5750
Alcalinidad total	mg/l CaCO ₃	6875	2750	9500
Nitrógeno total	mg/L N	1266,6	761,45	1959,72
Nitrógeno amoniacal	mg/L NH ₃	809,25	577,5	937
Nitratos	mg/L NO ₃ ⁻	107,31	60,48	215
Nitritos	mg/L NO ₂ ⁻	1,39	0,54	1,98
Fosfatos	mg/L PO ₄ ⁻³	30,03	24,30	34,75
Sulfatos	mg/L SO ₄ ⁻²	120,67	50	175
Cobre	mg/L Cu	0,04	0,008	0,064
Plomo	mg/L Pb	0,032	0,021	0,041
Cromo	mg/L Cr	0,316	0,034	0,861
Zinc	mg/L Zn	0,75	0,37	1,70
Litio	mg/L Li	0,19	0,15	0,33
Manganeso	mg/L Mn	12,82	0,17	35,40
Hierro total	mg/L Fe	42,23	23,37	77,8
Potasio	mg/L K	2045,6	504,2	4048
Sodio	mg/L Na	1976,92	919,8	3991
Calcio	mg/L Ca	655	200	1300
Magnesio	mg/L Mg	639	235	928
Coliformes totales	ufc/ml	53900	35600	80000
Coliformes fecales	ufc/ml	14125	3500	28000
Hongos y levaduras	ufc/ml	341000	2000	1050000

Anexo 3. Caracterización de lixiviados en el Relleno Sanitario de Pereira en Colombia

Parámetros	Media +/- LC	Coef. de Variación (%)
DQO	8629.17 +/- 3211.67 mg/l O ₂	86.06
DBO ₅	430.81 +/- 28.81 mg OD/l	49.86
DBO ₅ /DQO	0.12 +/- 0.013	79.15
Alcalinidad	7860.50 +/- 1101.98 mgCaCO ₃ /l	29.96
Fósforo	178.86 +/- 34.10 mg/l	41.88
Sulfatos	330.05 +/- 116.64 mg/l	63.81
SST	390.13 +/- 101.60 mg/l	48.88
Calcio	721.80 +/- 218.46 mg/l	52.43
Cromo	0.59 +/- 0.07 mg/l	19.50
Hierro	7.36 +/- 1.52 mg/l	35.82
Magnesio	107.23 +/- 35.27 mg/l	48.88
Níquel	0.16 +/- 0.05 mg/l	50.83
Zinc	0.70 +/- 0.10 mg/l	21.51
pH	8.10 +/- 0.34	9.06
Dureza total	383.33 +/- 134.25 mg CaCO ₃ /l	52.77
N Total	346.52 +/- 145.58 mg/l	94.74
N amoniacal	272.17 +/- 111.72 mg/l	92.56
Temperatura	27.07 +/- 3.89 °C	21.38

Tabla 1. Caracterización del lixiviado

Anexo 4. Caracterización de lixiviados en el Relleno Sanitario de la ciudad de Mérida en Yucatán, México

Parámetro [unidad]	Media	Rango	Parámetro [unidad]	Media	Rango
PH	8.40	8.34-8.50	Redox [mg/l]	67	30-123
Turbiedad [UNT]	108	95-130	O ₂ [mg/l]	0.91	0.15-1.30
*Alcalinidad [mg/l]	6857	5340-11107	SST [mg/l]	73	42-88
*Dureza Total [mg/l]	964	720-1196	SSV [mg/l]	51	38-64
Cloruros [mg/l]	2804	2489-3332	ST [mg/l]	12810	10064-16214
Sulfuros [mg/l]	405	30-705	STV [mg/l]	3839	2546-5260
DBO ₅ [mg/l]	1652	920-2580	Cu [mg/l]	0.320	0.290-0.388
DQO Total [mg/l]	5764	4460-7610	Fe [mg/l]	102.9	76.7-164.4
DQO Soluble [mg/l]	5532	4410-7490	Mn [mg/l]	1.28	1.08-1.49
COT [mg/l]	2857	2283-4380	Zn [mg/l]	5.02	3.60-5.80
Grasas y aceites [mg/l]	27	4-62	Na [mg/l]	20145	15540-28180
SAAM [mg/l]	6.74	0.88-13.80	K [mg/l]	16139	3711-23100
N-NH ₃ [mg/l]	1481	1120-2303	Cd [mg/l]	0.0107	0.086-0.158
N-org [mg/l]	176	82-298	Pb [mg/l]	0.384	0.265-0.900
NKT [mg/l]	1659	1232-2515	Cr [mg/l]	6.98	4.74-14.35
P Total [mg/l]	27.74	7.04-45.54			

Anexo 5

Límites máximos de vertido de aguas estipulados por el Decreto 33601 del Gobierno de Costa Rica

Parámetro	Límite
- DBO _{5,20}	50 mg/L
- DQO	150 mg/L
- Sólidos suspendidos	50 mg/L
- Grasas/aceites	30 mg/L
- Potencial hidrógeno	5 a 9
- Temperatura	15°C ≤ T ≤ 40°C
- Sólidos sedimentables	1 mL/L
- Sustancias activas al azul de metileno	5 mg/L

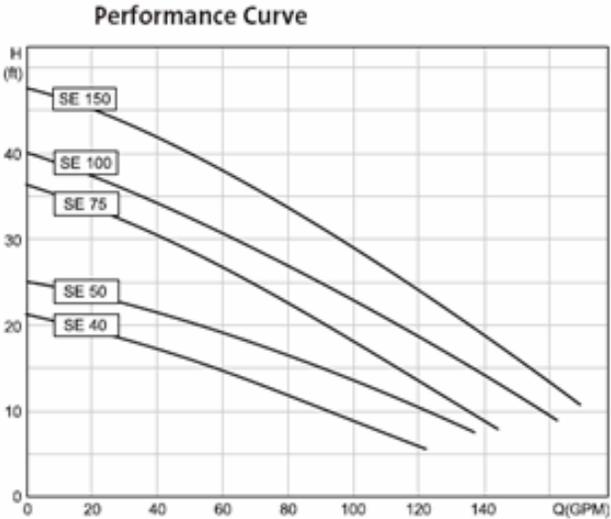
Parámetro	Límite Máximo
- Materia flotante	Ausente
- Mercurio	0,01 mg/L
- Aluminio	5 mg/L
- Arsénico	0,1 mg/L
- Bario	5 mg/L
- Boro	3 mg/L
- Cadmio	0,1 mg/L
- Cloro residual	1 mg/L
- Color (pureza) ¹	15%
- Cromo	1,5 mg/L
- Cianuro total	1 mg/L
- Cianuro libre	0,1 mg/L
- Cianuro libre en el cuerpo receptor, fuera del área de mezcla	0,005 mg/L
- Cianuro disociable en ácido débil	0,5 mg/L
- Cobre	0,5 mg/L
- Plomo	0,5 mg/L
- Estaño	2 mg/L
- Fenoles	1 mg/L

Parámetro	Límite Máximo
- Fosfatos	25 mg/L
- Nitrógeno total	50 mg/L
- Níquel	1 mg/L
- Zinc	5 mg/L
- Plata	1 mg/L
- Selenio	0,05 mg/L
- Sulfitos	1 mg/L
- Sulfuros	25 mg/L
- Fluoruros	10 mg/L
- Hidrocarburos	10 mg/L

Anexo 6. Corte del tallo de una planta utilizada en humedales construidos



Anexo 7. Curva de rendimiento de la bomba seleccionada



Referencias

- Davis, L. 1994. **A HANDBOOK OF CONSTRUCTED WETLANDS.** U.S. Environmental Protection Agency.
- Llagas, W; 2006. **Diseño de humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales en la UNMSM. REVISTA DEL INSTITUTO DE INVESTIGACIONES FIGMMG. Volumen 15, No17, 85-96.**
- García, J. 2008. **DEPURACIÓN CON HUMEDALES CONSTRUIDOS. GUÍA PRÁCTICA DE DISEÑO, CONSTRUCCION Y EXPLOTACIÓN DE SISTEMAS DE HUMEDALES DE FLUJO SUB SUPERFICIAL.** Catalunya. Departamento de Ingeniería Hidráulica, Marítima y Ambiental de la Universidad Politécnica de Catalunya.
- Jaime Lara. 1999, **DEPURACIÓN DE AGUAS RESIDUALES MUNICIPALES CON HUMEDALES ARTIFICIALES.** Proyecto Final. Instituto Catalán de Tecnología. Barcelona España. No 29:94
- <http://fichas.infojardin.com/acuaticas/typha-latifolia-totora-enea-anea-junco-bayon-bayunco.htm> (VISTO EL 16 DE SETIEMBRE DE 2010)
- <http://www.westcarlston.com/Aquatics%20data/Plants/Marginals/Scirpus-cernuus.jpg> (VISTO EL 16 DE SETIEMBRE DE 2010)
- http://www.mdinvasivesp.org/archived_invaders/archived_invaders_2005_07.html (VISTO EL 16 DE SETIEMBRE DE 2010)
- <http://www.ecohusky.uconn.edu/phragmites.htm>. (VISTO EL 16 DE SETIEMBRE DE 2010)
- Reed, S.C. 1995. **NATURAL SYSTEMS FOR WASTE MANAGEMENT AND TREATMENT.** Estados Unidos. Editorial McGraw Hill
- Crites R; 1998. **SMALL AND DECENTRALIZED WASTEWATER MANAGEMENT SYSTEMS.** Estados Unidos. Editorial McGraw Hill
- United States Environmental Protection Agency. 1993. **SUB SURFACE FLOW CONSTRUCTED WETLANDS FOR WASTEWATER TREATMENT.**
- Li Rong. 2009. **MANAGEMENT OF LANDFILL LEACHATE** Tesis Final. TAMK University of Applied Sciences
- Cepis. 2007. **DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y OPERACIÓN DE RELLENOS SANITARIOS.** Washington D.C. Estados Unidos.
- Kadlec, R. 1996. **TREATMENT WETLANDS.** Boca Raton. Estados Unidos. Editorial CRC Press.
- Kopka. R. 1990. **EVALUATION OF CONSTRUCTED WETLANDS FOR THE TREATMENT OF MINICIPAL SOLID WASTE LANDFILL LEACHATE.** Tesis de Maestria. Nueva York. Estados Unidos.
- Peverly, J. 1995. **GROWTH AND TRACE METAL ABSORPTION BY PHRAGMITES AUSTRALIS IN WETLANDS CONSTRUCTED FOR LANDFILL**

**LEACHATE TREATMENT,
ECOLOGICAL ENGINEERING.**

Mulamoottil, G. 1999. **CONSTRUCTED WETLANDS FOR THE TREATMENT OF LANDFILL LEACHATES.** Estados Unidos. Editorial Lewis Publishers.

Lopez, J. 2010. **CONSULTAS SOBRE EL USO DE HUMEDALES ARTIFICIALES EN EL**

**TRATAMIENTO DE LIXIVIADOS DE
RELLENOS SANITARIOS.** Costa Rica.
Comunicación Personal.

Urbanic-Bercic, O. 1994. **INVESTIGATION INTO THE USE OF CONSTRUCTED REEDBEDS FOR MUNICIPAL WASTE DUMP LEACHATE TREATMENT, WATER SCIENCE AND TECHNOLOGY.**