

Modelo integrado de un sistema de biodepuración en origen de aguas residuales domiciliarias. Una propuesta para comunidades periurbanas del centro sur de Chile

Integrated model of biopurification system for home sewage. A proposal for peri-urban communities from south center of Chile

Izaúl Parra Piérart y Gustavo Chiang Rojas

Resumen

El crecimiento acelerado de la población mundial y sus impactos han llevado a buscar nuevas fuentes de abastecimiento hídrico. Las aguas residuales constituyen una fuente adicional para satisfacer la demanda de este recurso, razón por la cual se han estado diseñando alternativas para mejorar su tratamiento y potenciar su utilización. Este estudio profundiza en la revisión de algunas alternativas de biodepuración y propone el diseño conceptual de un sistema híbrido de biodepuración en origen de aguas residuales domiciliarias basado en el uso de un biofiltro. Este se compone de un lombrifiltro y una combinación de humedales artificiales de flujo subsuperficial y libre. Los resultados de este estudio apuntan al diseño de soluciones ecosistémicas en la gestión de los recursos hídricos, aportando además beneficios medioambientales, paisajísticos y educacionales en la generación de alternativas para el manejo sostenible de nuestros recursos naturales.

Palabras clave. Tratamiento de aguas residuales, biofiltro, humedales artificiales, lombrifiltro, lombriz de tierra.

Abstract

The rapid growth of world population and its impacts has led to search new sources of water supply. Wastewater constitutes an additional source to satisfy the demand of this resource. Diverse researchers have designed alternatives for improve its processing and promote its utilization. This study examines some alternatives of biopurification and proposes a conceptual design of a hybrid system that combines the use of a bio filter with artificial wetlands. The model designed contributes to improve water resources management and has educational, landscape and environmental benefits for peri-urban communities. Besides constitutes an alternative to promote more efficiently natural resources management at the local level.

Key words. Wastewater treatment, biofilter, lombrifiltro, constructed wetlands, filterworm, earthworm.

Introducción

La ciudad es el hábitat humano por excelencia. La proporción de población urbana y el crecimiento acelerado de las ciudades, tanto en habitantes como en extensión, son fenómenos globales que plantean constantes desafíos en temas de planeamiento y gestión ambiental de los recursos naturales, especialmente en el uso del recurso agua (Sabatini, 1998; De Mattos, 2001; Azócar, 2003). El surgimiento de nuevas zonas residenciales, la contaminación de los cuerpos de agua superficial y subterránea, la distribución desigual del recurso hídrico y los graves períodos secos han forzado a buscar nuevas fuentes de abastecimiento, considerándose a las aguas residuales una fuente adicional para satisfacer la demanda por este recurso (Fuenzalida, 2003; Aedo, 2004; Delgado, 2010).

El agua como recurso natural es más que un solvente y está formada de componentes físicos, químicos y biológicos; es una mezcla de materiales orgánicos e inorgánicos suspendidos o disueltos. En el agua residual la concentración de uno o más de estos componentes, se encuentra alterada por efectos antrópicos directos o indirectos, deteriorando la calidad de aguas que pudiesen ser para consumo humano, uso agrícola, industrial u otro (Arboleda, 2000; Arcos, 2005; De Miguel, 2005). La mayor parte de la materia orgánica encontrada en las aguas residuales consiste en residuos alimenticios, heces, material vegetal, sales minerales, materiales orgánicos y materiales diversos como jabones y detergentes sintéticos. Las aguas residuales domésticas (aguas negras y grises), están constituidas en un elevado porcentaje (en peso) por agua, cerca de 99,9% y apenas un 0,1% de sólidos suspendidos, coloidales y disueltos. Esta pequeña fracción de sólidos es la que presenta los mayores problemas en el tratamiento y disposición para su reutilización (Borja, 2011).

El reuso de aguas residuales está definido como su aprovechamiento en actividades diferentes a las cuales fueron destinadas (Silva et al., 2008). Los tipos y aplicaciones se clasifican de acuerdo con el sector que recibe el beneficio, siendo los principales el urbano y el industrial. En el ámbito urbano,

la reutilización de aguas residuales va destinada a la irrigación de parques públicos, campos de atletismo, áreas residenciales y campos de golf y en el ámbito industrial, se utiliza especialmente en los sistemas de refrigeración y en el sector agrícola, en la irrigación de cultivos (OMS, 1989; Metcalf y Eddy, 1995; Lara, 1999; Gutiérrez, 2003). La actividad agrícola demanda agua residual por la necesidad de un abastecimiento regular, que compense la escasez del recurso por causa de la estacionalidad o la distribución irregular de la oferta de otras fuentes de agua a lo largo del año (Lara y Hernández, 2003). Por otro lado, el uso de aguas residuales presenta beneficios asociados al mejoramiento de la fertilidad de los suelos agrícolas por el aporte de materia orgánica, macronutrientes (N y P) y oligoelementos como Na y K, permitiendo reducir o eliminar la necesidad del uso de fertilizantes químicos, lo que además implica beneficios económicos para este sector. Todos estos nutrientes son energía del sol acumulada en la materia orgánica en forma de biomasa y favorecen la preservación del medio ambiente al evitar el vertimiento directo de las aguas residuales o al reducir los costos de su tratamiento, conservando la calidad del agua y la recarga de los acuíferos de aguas subterráneas (Mara y Cairncross, 1990; Moscoso, 1993).

En Chile existe una grave escasez de métodos naturales implementados como alternativas eficientes para el tratamiento de aguas residuales domiciliarias (Veliz et al., 2009; Pérez, 2010). Es por ello que esta investigación se centra en el problema del no tratamiento de las aguas residuales y su eliminación directa en esteros, ríos, lagos y lagunas, especialmente en sectores periurbanos que no cuentan con sistemas de fosas sépticas o alcantarillados interconectados al sistema central. Este vertido directo en los cuerpos de agua naturales provoca, por un lado, graves condiciones de vulnerabilidad ante las enfermedades que pudieran ser producidas por los patógenos presentes en las heces humanas, y por otro lado, es una amenaza latente para la salud del sistema natural hídrico que se ve sobrecargado de materia orgánica, produciéndose una eutrofización acelerada de sus aguas.

En los últimos años, debido a la creciente escasez de agua fresca, la necesidad de proteger el medio ambiente y aprovechar económicamente las aguas residuales, se ha promovido internacionalmente el reuso controlado de efluentes, lo que representa:

- Reducir considerablemente la carga contaminante que se dispone en los cuerpos receptores superficiales, subterráneos y zonas costeras, mediante vías simples, efectivas y de menor costo.
- Incrementar el potencial aprovechable de los recursos hídricos, así como su mejor manejo al liberar grandes cantidades de agua fresca de mejor calidad para otros usos.
- Potencial de mejora para áreas agrícolas, aportándole materias orgánicas y nutrientes.

Esta investigación se centra además en la necesidad de avanzar en el desarrollo de políticas y prácticas que involucren de forma activa a la población en el manejo sostenible de los recursos naturales (Maldonado, 2005; Ramos y García, 2012; Skewes, 2012). La propuesta diseñada utiliza los humedales artificiales como una forma de introducir un sistema de tratamiento y depuración de aguas, que incrementa además el valor paisajístico de su emplazamiento y potencia la estética del paisaje en que se encuentran insertos. Se analizaron las alternativas existentes de biodepuración de aguas residuales domiciliarias y se estudió la factibilidad de implementar un sistema natural de depuración de aguas para sectores periurbanos del centro sur de Chile (Santibáñez, 2002; Arango, 2004; Arias, 2004).

2. Sistemas naturales de tratamiento de aguas residuales

Existen diversidad de tecnologías naturales de tratamiento de aguas residuales entre las que destacan: i) las lagunas de estabilización, ii) el lombrifiltro (modelo Tohá) y iii) los humedales artificiales. A continuación se hace una breve descripción de cada una de ellas, concentrándose en las técnicas de biorremediación de más bajo impacto en el medio ambiente y, especialmente, en la fitodepuración con plantas de humedal.

2.1. Lagunas de estabilización

Las lagunas de estabilización (Figura 1), constituyen el tratamiento de desagües más comúnmente utilizado para pequeñas comunidades en Latinoamérica y corresponde a un proceso de estabilización natural que consiste en mantener el desagüe en las lagunas, por un período de retención suficientemente elevado (mayor a 20 días) hasta lograr la estabilización de la materia orgánica. La estabilización se logra a través de la simbiosis entre las algas productoras de oxígeno y las bacterias que lo utilizan para metabolizar la materia orgánica produciendo CO_2 , que a su vez consumen las algas.

Un sistema de lagunas de estabilización opera bajo condiciones totalmente naturales (OPS, 2009). En ellas la capa superficial de agua contiene oxígeno disuelto debido a la aireación atmosférica y la respiración de las algas, lo que permite la existencia de microorganismos aeróbicos. La capa del fondo

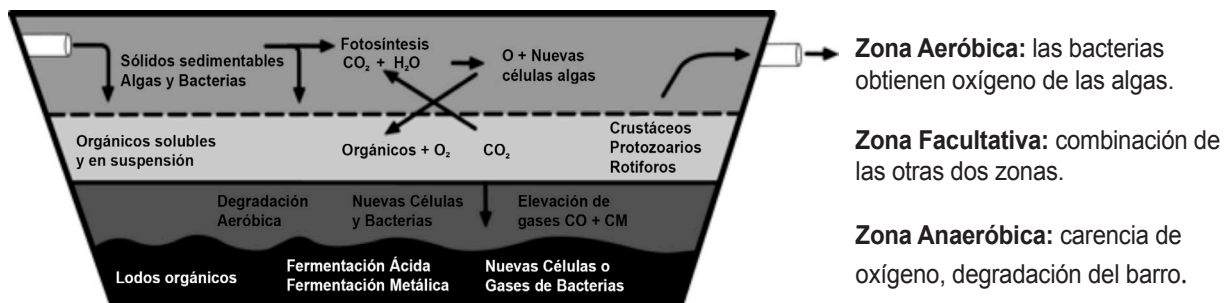


Figura 1. Lagunas de estabilización.

Fuente: Ilustración del autor.

de la laguna contiene los depósitos de sólidos, los que se descomponen debido a la acción de bacterias anaeróbicas (fermentación anaeróbica). La capa intermedia es parcialmente aeróbica y anaeróbica, y la descomposición de los residuos orgánicos la llevan a cabo las bacterias facultativas (EPA-US, 2002).

A pesar de su simplicidad, las lagunas de estabilización requieren de mantenimiento para garantizar su buen funcionamiento. Para ello es necesario remover la materia flotante (grasas y desechos), retirar las malezas que crezcan en los taludes y eliminar la vegetación en el interior de los estanques. En casos de sobrecarga y mal funcionamiento, es necesario desviar el desagüe de la laguna hasta su recuperación. El lodo acumulado en el fondo de las lagunas debe ser removido periódicamente. Se retira la laguna de operación, drenando su contenido y secando el lodo antes de su remoción (OPS, 2009). Pese a su simpleza, estos sistemas no son recomendables ni eficientes dado los costos de mantenimiento, los malos olores o contaminación de aguas superficiales aledañas, y la necesidad de eliminación posterior de los lodos resultantes.

2.2. Lombrifiltro (modelo Tohá)

El sistema de tratamiento de aguas servidas y residuos industriales líquidos orgánicos denominado Sistema Tohá® o Lombrifiltro (Figura 2), está conformado por distintos estratos filtrantes inertes y orgánicos. El estrato superior tiene una alta

densidad de lombrices, la más usada es la lombriz roja californiana (*Eisenia foetida*) en simbiosis con comunidades de microorganismos (*Achromobacter* sp., *Flavobacterium* sp., *Pseudomonas* sp., *Alcaligenes* sp., *Haerotilus natans* y *Beggiataa* sp. entre otras) encargados de efectuar la degradación de la materia orgánica presente en las aguas servidas domésticas y riles (Hernández, 2005).

En una primera etapa, el agua residual es asperjada sobre el sustrato rico en lombrices y ésta escurre por el medio filtrante reteniendo los sólidos. Esta parte sólida del agua residual es consumida por las lombrices y pasa a constituir por un lado su masa corporal y, por otro, sus deyecciones, que son el llamado humus de lombriz. En el caso de existir coliformes fecales en las aguas, éstos son reducidos por las lombrices y los microorganismos consumidores de materia orgánica que viven junto con ellas.

Algunas de las ventajas de este sistema de tratamiento son que degrada casi la totalidad de los sólidos orgánicos, sin producir lodos inestables como el resto de los sistemas de tratamiento, el lecho filtrante no se impermeabiliza ya que no se colmata. Esta característica se debe principalmente a la acción de las lombrices que, con su incansable movimiento, crean túneles y canales que aseguran en todo momento la alta permeabilidad del filtro. Los materiales sólidos orgánicos presentes en el agua residual, que colmatan o tapan otros filtros son digeridos por las lombrices.

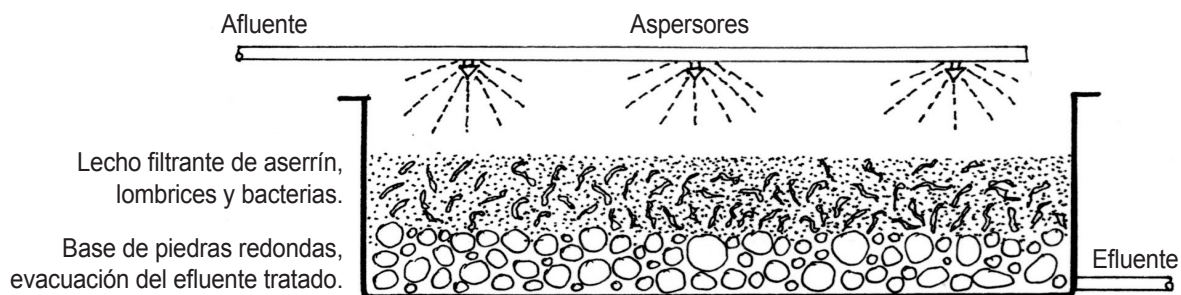


Figura 2. Lombrifiltro Modelo Sistema Tohá®.
Fuente: Ilustración del autor.

Por otro lado, los lombrifiltros necesitan poco espacio. El agua servida de cinco personas (núcleo familiar típico) requiere solo 2 m² de biofiltro para su tratamiento (Hernández, 2005). A lo anterior se suma, sus bajos costos operacionales ya que requieren sólo de energía eléctrica para activar las bombas de una planta elevadora y los equipos de desinfección por radiación ultravioleta. Comúnmente los sistemas requieren plantas elevadoras, ya que los colectores llegan a cierta profundidad en las plantas de tratamiento y por costos los procesos e instalaciones se realizan a nivel del suelo. Si se hace uso de pendientes naturales para llevar las aguas sobre el sistema de filtrado, se puede prescindir de las bombas elevadoras. Por último, el sistema genera un subproducto factible de ser utilizado como abono natural debido a que cada cierto tiempo puede extraerse el exceso de humus, reconstituyendo la estratigrafía inicial del lombrifiltro. Este humus puede ser utilizado como un excelente abono agrícola y las lombrices pueden ser utilizadas como alimento de aves o como materia rica en proteínas.

2.3. Humedales artificiales

Los humedales construidos consisten en el diseño correcto de un recipiente estanco que contiene agua, sustratos y plantas que en su mayoría son del tipo emergentes, aunque también pudieran ser flotantes o sumergidas. Estos componentes pueden manipularse intencionadamente al construir el humedal. Otro componente importante para la salud de los humedales son las comunidades de microorganismos e invertebrados acuáticos que se desarrollan naturalmente, por lo que es conveniente tomar las plantas desde su medio natural.

El mecanismo por el cual las plantas acuáticas eliminan los contaminantes del agua residual y que constituye la base de la tecnología de los humedales, es inyectar grandes cantidades de oxígeno hacia sus raíces. El aire que no es aprovechado por la especie y que ésta expelle es absorbido por microorganismos, tales como bacterias y hongos, que se asocian a la raíz y se encargan de metabolizar los contaminantes que entran al sistema (Novotny y Olem, 1994).

Al igual que las microalgas, estas plantas acuáticas (macrófitas) son usadas para asimilar y descomponer nutrientes, materia orgánica e inorgánica. Presentan una serie de ventajas en su implementación que dependen del tipo de efluente a tratar y de las condiciones de operación. En general, el procedimiento consiste en establecer sistemas con especies flotantes, sumergidas y enraizadas.

Los sistemas de tratamiento de aguas tipo wetland comprenden tres procesos distintos. Los residuos pasan primero por un decantador, para luego ser depositados en forma de líquido en el humedal artificial. Allí las aguas escurren bajo un lecho de piedras de cinco a diez centímetros, sobre el que se plantan las especies acuáticas, lo que impide la aparición de cualquier rastro de mal olor y la crianza de zancudos. Finalmente, los líquidos son descargados en una laguna con plantas flotantes que completa el proceso de depuración de las aguas servidas, removiendo parte del nitrógeno y el fósforo, dejándolas así aptas para ser descargadas en cursos de agua o usadas para el riego (Celis, 2005).

2.3.1. Tipos de humedales artificiales

Básicamente existen dos tipos recurrentes de sistemas de humedales artificiales, desarrollados para el tratamiento de agua residual: i) los sistemas de “Flujo Libre” o FWS y ii) los “Sistemas de Flujo Subsuperficial” SFS (Figura 3).

Los aspectos más relevantes a considerar para la implementación de humedales artificiales son: a) la impermeabilización de la capa inferior de la piscina que contiene al humedal, b) la selección e instalación del medio granular base para los sistemas de flujo subsuperficial, c) el sustrato orgánico en donde será arraigada la vegetación y la selección e implantación de estas especies, y d) finalmente, las conexiones de entrada y salida de aguas.

Cuando son usados para el tratamiento secundario de aguas residuales, los sistemas de flujo libre FWS, habitualmente son configurados a manera de largas piscinas, estanques o canales paralelos, con la superficie del agua expuesta directamente al ambiente. La base o fondo de estos estanques

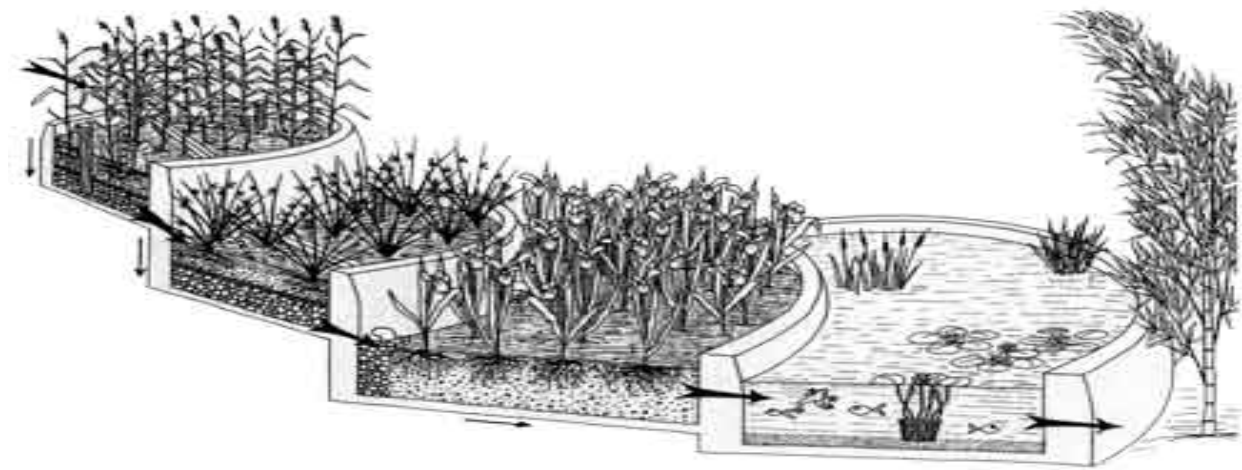


Figura 3. Esquema típico de un Sistema de Humedal Artificial por etapas.
Fuente: Patrice MIRAN, "L'Ecologie pour Vence".

suele estar constituida por capas de suelo arcilloso poco permeable o por membranas artificiales que suponen una barrera hídrica subsuperficial, con una vegetación flotante, sumergida o emergente, enraizada ya sea en un suelo poco profundo, o dentro de aguas también poco profundas, comúnmente entre 0,1 y 0,6 m.

A estos sistemas se les aplica el agua con un flujo continuo y el tratamiento se produce durante la circulación de ésta, entre los tallos y raíces de la vegetación emergente. También son utilizados con el objetivo de recrear condiciones naturales del medio ambiente para ofrecer nuevos hábitats a la flora y fauna endógena de lugares deprimidos o mejorar las condiciones de humedales existentes. Esta clase de humedales suelen configurarse como sistemas complejos, compuestos por espacios abiertos, zonas altamente pobladas de vegetación e islotes de vegetación apropiada para el anidamiento de aves acuáticas colonizadoras estacionales.

2.3.2. Humedales de flujo subsuperficial, SFS

Los sistemas de flujo subsuperficial (SFS) se utilizan para el tratamiento complementario. Consisten en zanjas o canales habitualmente excavados directamente en el terreno y rellenos con sucesivas capas de grava de distintas granulometrías, en las

que el agua mantiene su nivel siempre inferior a la superficie del terreno.

El concepto general implícito en los sistemas de flujo subsuperficial, tiene varias ventajas destacables. Existe la fuerte creencia de que las reacciones biológicas en ambos tipos de humedales, se deben al crecimiento de colonias de microorganismos, las cuales encuentran condiciones idóneas para su sustento en el lecho de grava, que tiene altas tasas de reacción y oxigenación. Por otro lado, como el nivel del agua está por debajo de la superficie del medio granular, no está expuesta, con lo que se evita la posible proliferación de insectos u olores desagradables. Asimismo se evitan los problemas de climas fríos, debido a que esta capa superficial de grava otorga una mayor protección térmica que el agua.

En general el área que se requiere es menor que la de un sistema de flujo libre (FWS) y la viabilidad económica del sistema depende principalmente de los costos asociados al material granular y su transporte. Es difícil que un SFS sea competitivo desde el punto de vista de sus costos de implementación, sin embargo en pequeñas comunidades rurales o periurbanas, dependerá de los costos de la tierra y de la posibilidad de disponer del material, tanto para la impermeabilización como para el relleno.

Finalmente, ambos tipos de humedales, los de flujo libre o los de flujo subsuperficial, independientemente de sus dimensiones o tipologías, requieren de un riguroso aislamiento del terreno natural, para evitar su contaminación con aguas residuales, que pudiera llegar por infiltración a las napas subterráneas o a las aguas superficiales y/o terrenos aledaños.

3. Metodología

Para esta investigación se realizó un análisis comparativo de fuentes bibliográficas referidas al estado del arte de los Humedales Artificiales en Chile y el mundo, para evaluar la factibilidad de implementación de un modelo integrado biodepurador de aguas residuales domiciliarias en origen. Para esta evaluación se estudiaron las tipologías existentes de humedales artificiales, sus parámetros de operación y las especies botánicas depuradoras, tanto endógenas como exógenas, probadamente adaptadas al clima regional.

Se utilizó un enfoque de análisis cualitativo teniendo en cuenta diversos contextos: climáticos, sociales, medioambientales y económicos. Se revisaron los sistemas naturales de tratamiento de aguas residuales y se desarrolló trabajo en terreno, a través de entrevistas a informantes claves y visitas a experiencias implementadas en comunidades, condominios y familias a lo largo del país y, especialmente, en la Región del Biobío.

A partir de la información recabada en la literatura especializada y del trabajo desarrollado en terreno, se elaboró esta propuesta de un modelo conceptual integrado (Lombrifiltro y Humedales artificiales) para la recuperación del agua, biomasa y nutrientes y su reinserción en los ciclos naturales, en zonas periurbanas del centro sur de Chile.

Resultados

El modelo propuesto (Figura 4) de sistema híbrido de biodepuración en origen para aguas residuales domiciliarias, consiste en una serie de etapas de tratamiento. La primera etapa está compuesta por un lombrifiltro modelo Tohá® que se hace cargo

de la depuración de los sólidos de mayor tamaño (coliformes fecales) y de las materias grasas. En esta etapa existe una alta densidad de lombrices y microorganismos, encargados de efectuar la degradación de la materia orgánica presente en las aguas residuales domiciliarias, incluso en invierno, ya que las lombrices pueden reproducirse con temperaturas que van entre los 7 y los 40 °C (Pérez, 2010). El agua residual escurre por el medio filtrante reteniendo la parte sólida, la que es consumida por las lombrices y sus deyecciones son el llamado humus de lombriz, que es el mejor abono natural conocido para fertilizar cultivos agrícolas.

En una segunda etapa, se ha ubicado un humedal artificial de flujo subsuperficial utilizando las plantas macrófitas emergentes más comúnmente halladas en la zona centro sur del país (*Typha latifolia* y *Scirpus lacustris*) ambas ubicuas, muy resistentes y habitualmente encontradas compartiendo el mismo hábitat. Este flujo subsuperficial en que las aguas no son expuestas directamente al ambiente, permite evitar los riesgos de malos olores o la proliferación de plagas indeseadas como mosquitos o ratas, además de regular la temperatura del sistema. Dentro de este sustrato de grava y materia orgánica, las raíces de las plantas encuentran las condiciones idóneas para su sustento, con altas tasas de reacción y oxigenación. Aquí ocurren una serie de reacciones biológicas que se deben al crecimiento de colonias de microorganismos, los que en conjunto con las plantas, llevan a cabo la mayor parte de la acción depuradora del sistema.

La última etapa está constituida por un humedal artificial de flujo libre con plantas flotantes (*Eichhornia crassipes*), que pese a no ser autóctonas, han colonizado rápidamente ríos, lagos y lagunas adaptándose al clima local. Estas plantas cumplen con la función de tratamiento complementario avanzado, ya que las comunidades de microbios aerobios sustentados en la fina capa de oxígeno que cubre las raíces flotantes, terminan de digerir las moléculas orgánicas presentes en el agua y las trazas metálicas que pudieran persistir consumiendo CO₂ para liberar oxígeno y agua. Por otro lado, la exposición de la superficie del agua (entre las

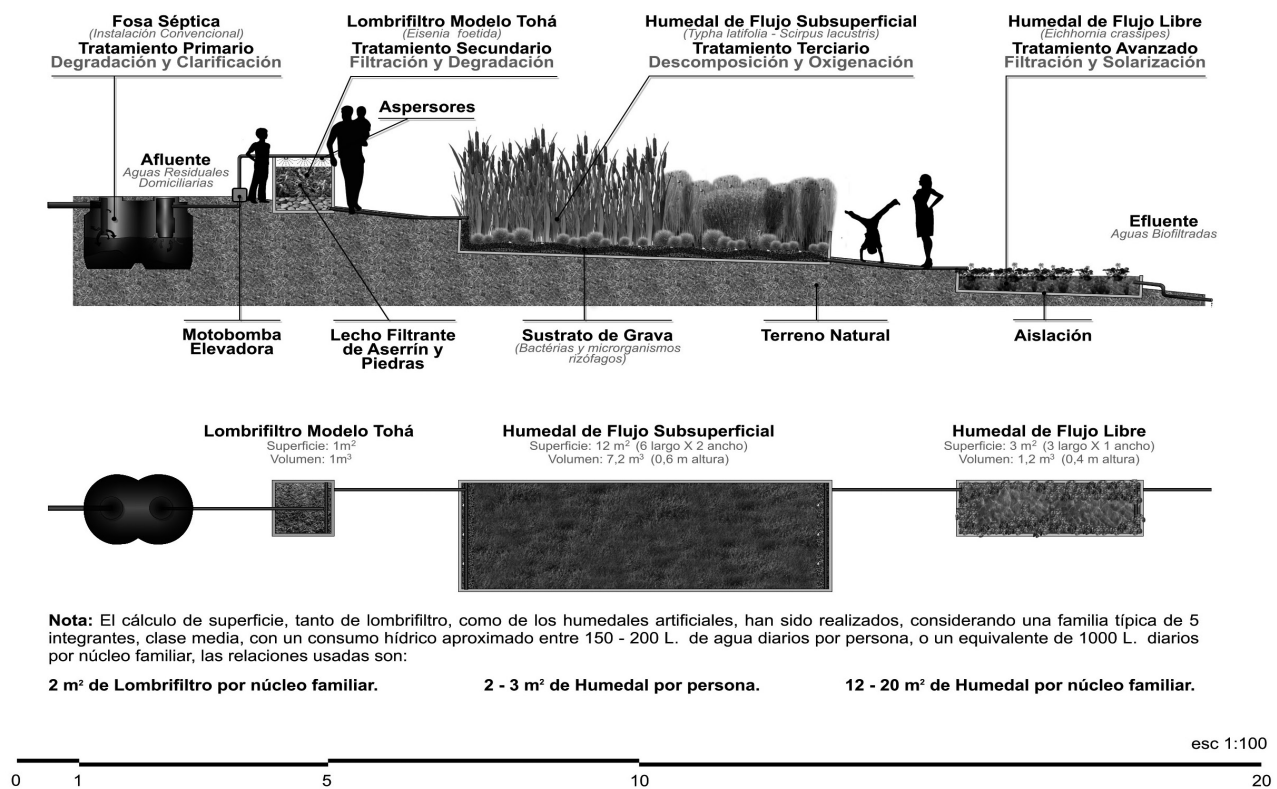


Figura 4. Diseño conceptual de propuesta sistémica. Fuente: Ilustración del autor.

plantas) a los rayos UV del sol, permite la llamada solarización, probadamente letal para las bacterias y virus que pudieran estar presentes en los coliformes fecales humanos.

4. 1. Integración del biofiltro en un master plan domiciliario

El sistema de biofiltración propuesto es un reactor digestor de contaminantes, que puede operar de manera aislada generando subproductos útiles tales como humus, biomasa y agua, los cuales son factibles de insertarse en un sistema integral mayor, que permita cerrar los ciclos, tanto del agua como de la energía solar biomásica acumulada en las plantas (Arango, 2004; Celis, 2005).

El humus de lombriz es un excelente fertilizante para cultivos agrícolas. El excedente del crecimiento de las plantas de los humedales, debe ser extraído

al menos una vez al año y puede ser reconvertido en materia orgánica fértil (tierra), por medio de una compostera básica que acelere el proceso de descomposición natural, convirtiendo la biomasa en un sustrato orgánico ideal para el cultivo de hortalizas y verduras. Finalmente, el agua biofiltrada puede ser reutilizada para el riego de estos cultivos por lo cual es altamente recomendable que el biofiltro pase a integrar un plan maestro cíclico, compuesto por zonas de depuración, compostaje y cultivo. Este conjunto (Figura 5) permite visualizar el ciclo cerrado del agua y el reciclaje de desechos orgánicos humanos, para ser reconvertidos en alimentos vegetales para el núcleo familiar y por añadidura, contribuye a embellecer paisajísticamente el entorno de la vivienda, constituyéndose en una importante herramienta para la educación medioambiental de las nuevas generaciones.

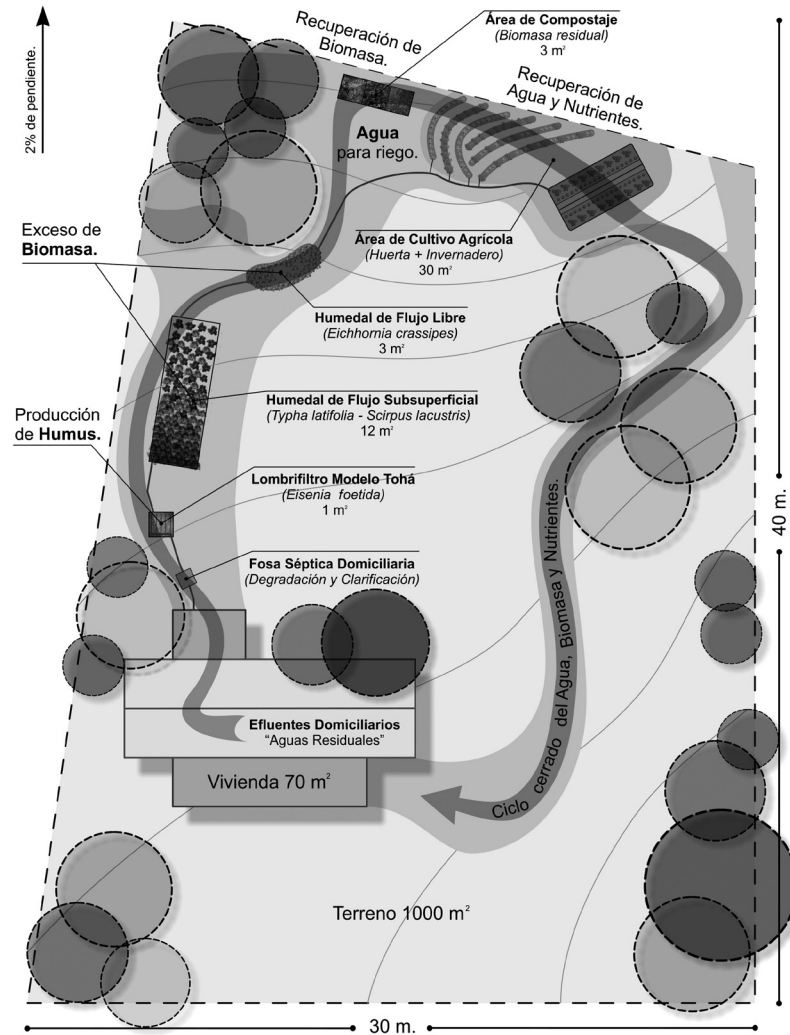


Figura 5. Máster Plan Domiciliario. Ciclo cerrado del agua, biomasa y nutrientes.

Fuente: Ilustración del autor.

4. 2. Diseño operativo del sistema de biofiltración de aguas residuales domiciliarias

4. 2. 1. Estructuras de entrada y salida

El colector de entrada suele ubicarse sobre la superficie, con el fin de permitir el acceso para ajustes y control. Los sistemas pequeños de flujo subsuperficial normalmente incluyen una tubería perforada, ubicada en el fondo del lecho en su extremo más alto, rodeada por material rocoso de distinta granulometría para conseguir la distribución uniforme del afluente.

El conducto de salida (para los sistemas de flujo libre o subsuperficial) consiste normalmente en una tubería perforada, situada al final del estanque y en el fondo de su lecho. En algunos casos se coloca una zanja poco profunda, rellena con material rocoso, ligeramente por debajo del fondo de la celda del humedal, para asegurar un drenaje completo (Lara, 1999). Es conveniente, sobre todo en los sistemas de flujo subsuperficial en que el nivel del agua no es visible, que este ducto de salida sea de nivel regulable, por ejemplo conectándolo a una manguera flexible. Esto es muy útil en la etapa inicial de arraigamiento

de las plantas, durante la cual se va bajando el nivel del agua paulatinamente, para inducir a las raíces a ir más profundo y las plantas crezcan en su búsqueda; en este período (aproximadamente un mes) se debe mantener a los humedales sólo con agua limpia. No se debe introducir el agua contaminada al sistema hasta que las comunidades de bacterias y microbios se hayan establecido completamente en las estructuras reticulares de las plantas, evitando el riesgo de que estos no sean capaces de soportarlo y mueran.

4. 2. 2. Operación y mantenimiento

Para obtener buenos resultados en los niveles de depuración, es necesario tener permanentemente una correcta operación del sistema por lo que se recomienda tener un “Plan de Operación y Mantenimiento”, el cual se elabora durante la etapa final del diseño del sistema. Este plan debe enfocarse en los aspectos más importantes para la eficiencia del tratamiento, los cuales se relacionan principalmente con otorgar una amplia y constante oportunidad para el contacto del agua con la comunidad bacteriana presente en las estructuras reticulares, con la capa de residuos de la vegetación y con el sedimento. Se debe asegurar que el flujo alcance homogéneamente todas las áreas del humedal y mantener un crecimiento vigoroso de la vegetación, para asegurar un ambiente saludable.

Respecto de la hidrología de los sistemas, en los humedales de flujo libre deben verificarse periódicamente el flujo y los niveles de agua, teniendo en cuenta que cubra todas las partes de la superficie del humedal. Este se debe analizar regularmente para asegurar que el agua se está moviendo a través de todas las zonas, y revisar también que el aumento de residuos no haya bloqueado el camino al flujo y no se han formado áreas de estancamiento. En los humedales de flujo subsuperficial es indispensable verificar que no se desarrolle flujo en la superficie, por exceso de agua en el sistema.

Además, es necesario inspeccionar todas las estructuras de control de los niveles de agua, tanto de entrada como de salida, de forma regular e inmediatamente después de cualquier anomalía en

el flujo. Los humedales deben revisarse luego de las subidas importantes en el caudal o después de la formación de hielo, ya que éstos pueden afectar tanto al sustrato como a las plantas y particularmente a las estructuras de salida de los efluentes.

El manejo y control del nivel del agua es la clave para el éxito de la vegetación. Mientras las plantas del humedal pueden tolerar cambios temporales en la profundidad del agua, se recomienda tener cuidado en no exceder los límites de tolerancia de las especies usadas durante periodos largos de tiempo. Es indispensable mantener la cubierta vegetal para desarrollar una capa de tierra, capaz de soportar extensos sistemas reticulares, que resisten mejor la erosión natural de los elementos. La vegetación debe observarse regularmente y quitar las especies invasoras manualmente. Se recomienda evitar el uso de herbicidas, excepto en circunstancias extremas y de hacerlo, deben exacerbarse los cuidados ya que pueden dañar severamente a la vegetación emergente.

Los mosquitos son comunes en los humedales naturales y pueden esperarse en los humedales artificiales. La mejor manera de evitar su proliferación es crear condiciones que no les sean atractivas o que no propicien el desarrollo de larvas. Los lugares abiertos con agua estancada son un excelente hábitat para los mosquitos y los nutrientes del agua estancada son ideales para el desarrollo larval, pero cuando el agua está en movimiento se minimiza el riesgo de su proliferación.

4. 2. 3. Control de la salud del humedal

La supervisión es la herramienta fundamental para medir si el humedal está cumpliendo con los objetivos trazados, como también para indicar su integridad biológica. Proporciona datos para incrementar su rendimiento y permite detectar tempranamente los problemas que pudieran ocurrir. Llevar regularmente un registro fotográfico permite documentar la acumulación de sustancias potencialmente tóxicas, antes de que sean bioacumulables y realizar un muestreo de los niveles de depuración, permitiría verificar el cumplimiento de las normativas y regulaciones.

4. 2. 4. Dimensionamiento del sistema, superficie v/s caudal

De acuerdo a la literatura especializada (Mitsch, 2000; Peña et al., 2003; Arias, 2004; Celis, 2005; Tiner, 2005), la superficie necesaria de humedal para depurar una cantidad determinada de agua, depende de diversos factores:

- Tipo y concentración de los contaminantes presentes en el agua, dependiendo de su fuente de origen (domiciliario, industrial, grises, negras, mixtas).
- Condiciones medioambientales del emplazamiento (temperatura del agua y del ambiente, régimen pluviométrico, calidad del aire, exposición solar).
- Tipología del humedal, tipo de flujo, profundidad, proporciones, aislamiento, gradiente del terreno, entre otras.
- Especies de plantas utilizadas, densidad, distribución, profundidad de enraizamiento, salud del sistema biótico, etc.
- Tipos de sustratos utilizados, granulometría de las gravas, compactación/aireación del material orgánico, calidades, cantidades y distribución de cada uno de ellos.

Como regla general se recomiendan 2-3 m² por persona con un consumo aproximado de 150-200 litros de agua diarios, dependiendo del estrato social al que pertenezcan los usuarios del sistema. Los hábitos de consumo hídrico y alimenticio son variables, por lo mismo las concentraciones de los contaminantes en relación con el caudal de agua diario, también lo son. Por lo tanto, se puede sugerir una relación de 12-20 m² de humedal por cada 1000 litros de agua diarios y de acuerdo a los hábitos de consumo de la familia, dimensionar estimativamente su superficie.

5. Conclusiones

De acuerdo a los antecedentes expuestos, se puede afirmar que es factible la separación del agua y la materia orgánica presente en los residuos líquidos domiciliarios. Así, no sólo pueden recuperarse los

nutrientes presentes (N, P, K, entre otros), sino que también es posible mejorar considerablemente las condiciones de estas aguas (reducción de DBO, trazas metálicas, sólidos suspendidos, coliformes fecales), dejándolas aptas para su reutilización en riego agrícola. Asimismo, se obtiene biomasa residual por el crecimiento de las plantas depuradoras, la cual constituye un recurso aprovechable energéticamente como sustrato orgánico.

Además la utilización de sistemas naturales de biofiltración a nivel domiciliario, presenta importantes beneficios medioambientales y paisajísticos, permitiendo al grupo familiar ser más eficiente en la gestión de los recursos, reingresando parte de sus desechos al ciclo natural (energía biomásica y nutrientes), revalorizando el recurso hídrico habitualmente tratado como residuo y disminuyendo las cargas orgánicas de los acuíferos naturales. Estos sistemas son fácilmente implementables y dado su bajo costo de inversión, operación y manutención, constituyen un medio para incrementar la sustentabilidad del consumo energético de una vivienda.

Finalmente, la implementación de estas iniciativas constituye una forma de avanzar en la educación medioambiental, al involucrar activamente a generaciones actuales y futuras en el proceso de reinserción de sus residuos a los ciclos naturales. Esta asimilación simbiótica de los procesos naturales, en que ambos factores bióticos y antrópicos se ven beneficiados mutuamente, permite creer en un futuro optimista de sustentabilidad y responsabilidad medioambiental de la sociedad.

Referencias

- Aedo, M. 2004. Recursos hídricos en Chile: desafíos para la sustentabilidad. Santiago, Chile: Programa Chile Sustentable. Disponible en: <http://www.chilesustentable.net/wp-content/plugins/downloads-manager/upload/RECURSOSHIDRICOS.pdf>. Fecha de acceso: 20 de octubre de 2012.
- Arango, A. 2004. La biofiltración, una alternativa para la potabilización del agua. *Revista Lasallista de Investigación* 1 (2): 61-66.

- Arboleda, J. 2000. Teoría y práctica de la purificación del agua, Tomo 2. Mc Graw Hill. Santa Fé de Bogotá, Colombia.
- Arcos, M. 2005. Indicadores microbiológicos de contaminación de las fuentes de agua. *NOVA - Publicación Científica* 3 (4): 69-79.
- Arias, O. 2004. Estudio de la biodegradación de la materia orgánica en humedales construidos de flujo subsuperficial. Universitat Politècnica de Catalunya. Departament d'Enginyeria Hidràulica. Marítima i Ambiental. Barcelona, España. Disponible en: <http://upcommons.upc.edu/pfc/handle/2099.1/3339>. Fecha de acceso: 2 de Septiembre de 2012.
- Azócar, G. 2003. Cambio en los patrones de crecimiento en una ciudad intermedia: el caso de Chillán en Chile Central. *Revista EURE* 29 (87): 79-92.
- Borja, M. 2011. Diseño de una Planta de Tratamiento para aguas residuales de la ciudad de Guaranda. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Facultad de Ciencias. Riobamba, Ecuador: Escuela de Ciencias Químicas. 163 pp.
- Celis, J. 2005. Recientes aplicaciones de la depuración de aguas residuales con plantas acuáticas. *Theoría* 14: 17-25.
- Delgadillo, O. 2010. Depuración de aguas residuales por medio de humedales artificiales. Cochabamba, Bolivia: Centro Andino para la Gestión del Agua.
- De Mattos, C. 2001. Metropolitización y suburbanización. *Revista EURE* 27 (80): 5-8.
- De Miguel, E. 2005. Manual de fitodepuración. Filtros de macrófitas en flotación. Proyecto LIFE.
- EPA-US. 2002. Wastewater Technology Fact Sheet: Facultative Lagoons. EPA. United States. Disponible en: <http://www.epa.gov/npdes/pubs/faclagon.pdf>
- Fuenzalida, V. 2003. Asignación eficiente de recursos naturales: el caso de las aguas terrestres. *PHAROS Arte, Ciencia y Tecnología* 10 (2): 27-60.
- Gutiérrez, J. 2003. Controvérsias disciplinares e compromissos pendentes na pesquisa contemporânea em educação ambiental. *Revista de Educação Pública* 12 (22): 83-106.
- Hernandez, Y. 2005. Anteproyecto de construcción para aplicación de Lombricultura al tratamiento de Planta Llau-Llao de Salmonera INVERTEC S. A. Tesis de Ingeniero en Construcción. Facultad de Ciencias de la Ingeniería. Escuela de Construcción Civil. Universidad Austral de Chile. Valdivia. Chile. 189 pp.
- Lara, J. 1999. Depuración de Aguas Residuales Municipales con Humedales Artificiales. Tesis de Master en Ingeniería y Gestión Ambiental. Institutao Catalán de Tecnología, Universidad Politécnica de Cataluña. Barcelona. España. 122 pp.
- Lara, J. y A. Hernandez. 2003. Reutilización de aguas residuales: aprovechamiento de los nutrientes en riego agrícola. Seminario internacional sobre métodos naturales para el tratamiento de aguas residuales. Disponible en: <http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/agua2003/riego.pdf>. Fecha de acceso: 15 de Junio de 2012.
- Maldonado, D. 2005. La educación ambiental como herramienta social. *Geoenseñanza* 10 (1): 61-67.
- Mara, D. y S. Cairncross. 1990. Directrices para el uso sin riesgos de aguas residuales y excretas en agricultura y acuicultura. Medidas de protección de la Salud Pública. Organización Mundial de la Salud (OMS). 213 pp.
- Metcalf y Eddy. 1995. Ingeniería de aguas residuales. Tratamiento, vertido y reutilización. McGraw-Hill/ Interamericana de España S.A. 1485 pp.
- Mitsch, W. 2000. Wetlands. New York: John Wiley & Sons, Inc. 936 pp.
- Moscoso, J. 1993. Reuso de las aguas residuales en Perú. Taller regional para América sobre aspectos de salud, agricultura y medio ambiente. México. Disponible en: <http://www.bvsde.ops-oms.org/eswww/fulltext/repin53/arp/arp.html>. Fecha de acceso: 10 de Agosto de 2012.
- Novotny, V. y H. Olem. 1994. Water quality: prevention, identification and management of diffuse pollution. Van Nostrand Reinhold. New York. 1072 pp.
- Organización Mundial de la Salud - OMS. 1989. Directrices sanitarias sobre el uso de aguas residuales en agricultura y acuicultura. Disponible en: http://whqlibdoc.who.int/trs/WHO_TRS_778_spa.pdf. Fecha de acceso: 7 de Mayo de 2012. 90 pp.
- Organización Panamericana de la Salud - OPS. 2009. Guía de orientación en saneamiento básico para alcaldías de municipios rurales y pequeñas alcaldías. Disponible en: http://www.bvsde.paho.org/bvsacg/guialcalde/0gral/078_guia_alcaldes_SB/Guia_alcaldes_2009.pdf. Fecha de acceso: 7 de Mayo de 2012. 135 pp.
- Peña, M., J. Silva y C. Madera. 2003. Sistemas combinados de tratamiento de aguas residuales basados en tanque séptico - filtro anaerobio - humedales: una alternativa sostenible en pequeñas comunidades de países tropicales. Seminario sobre Métodos Naturales para el Tratamiento de Aguas Residuales. Cali: Instituto Cinara - Universidad del Valle. pp 169-176.
- Pérez, A. 2010. Selección de Sistema de Tratamiento de aguas residuales para la localidad de Santa Barbara usando metodología de decisión multicriterio AHP. Tesis. Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Santiago. 110 pp.

- Ramos, C. y M. García, M. 2012. Estudio de percepción de la problemática ambiental en Arauca: herramientas para la valoración ecosistémica. *Gestión y Ambiente* Vol. 15 (1): 119-128.
- Sabatini, F. 1998. Direcciones para el futuro. Ciudades intermedias en América Latina y el Caribe: propuestas para la gestión urbana. Santiago: CEPAL / Ministerio degli Afaire Esteri Cooperazione Italiana. Disponible en: <http://www.eclac.org/publicaciones/xml/7/4497/lcl1117.pdf>. pp 125-214.
- Santibáñez, J. 2002. Estudio de Plantas Piloto de Aguas Servidas a base de Tecnologías no Convencionales. Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Universidad de Chile. Santiago. Chile. 118 pp.
- Silva, J., P. Torres y C. Madera. 2008. Reuso de aguas residuales domésticas en agricultura. Una revisión. *Agronomía Colombiana* 26 (2): 347-359. Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=180314732020> Fecha de acceso: 30 de noviembre de 2011.
- Skewes, J. 2012. Ciudadanía y sustentabilidad ambiental en la ciudad: la recuperación del humedal Angachilla y la organización local en la Villa Claro de Luna. Valdivia. Chile. *EURE* 38 (113): 127-145.
- Tiner, R. 2005. In search of swampland. A wetland sourcebook and field guide. New Brunswick, N.J.: Rutdgers University Press. 330 pp.
- Veliz, E., J. Llanes, L. Asela y M. Bataller. 2009. Reúso de aguas residuales domésticas para riego agrícola. Valoración crítica. *Revista CENIC Ciencias Biológicas* 40 (1): 35-44.

Izaúl Parra Piérart

Diseñador Industrial
Magíster en Hábitat Sustentable y Eficiencia Energética
Académico del Departamento de Arte y Tecnologías del Diseño
Facultad de Arquitectura, Construcción y Diseño.
Universidad del Bío-Bío
Chile
izaulpa@ubiobio.cl

Gustavo Chiang Rojas

Biólogo Marino
Diplomado en Análisis y Gestión Ambiental.
Doctor en Ciencias Ambientales con mención en Sistemas Acuáticos Continentales.
Académico de la Universidad de Concepción
Investigador del Centro de Ciencias Ambientales (EULA)
Chile.
gchiang@udec.cl

Citación:

Parra Piérart, I. y G. Chiang Rojas. 2013. Modelo integrado de un sistema de biodepuración en origen de aguas residuales domiciliarias. Una propuesta para comunidades periurbanas del centro sur de Chile. *Revista Gestión y Ambiente* 16 (3): 39-51.

Fecha de recepción: 7-V-2013

Aceptación: 2-X-2013

Recibido versión final: 4-X-2013