

**Humedales
artificiales
para el
tratamiento
de aguas residuales**

Revista Ciencia e Ingeniería Neogranadina
ISSN 0124-8170, N° 13
(Págs. 17 - 24)

CARLOS A. ARIAS I.*
DR. HANS BRIX**

Abstract

The development of constructed wetland technology for wastewater treatment has gone a long way and from an experimental and unknown empirical method, which was capable of handling wastewater a sound technology was developed. Thanks to research, and the work of many public and private companies that have gather valuable operation information, constructed wetland technology has evolved to be a relievable, versatile and effective way to treat wastewater, run off, handle sludge and even improve environmental quality and provide recreation sites, while maintaining low operation and maintenance costs, and at the same time, producing water of quality that can meet stringent regulations, while being and environmental friendly solution to treat wastewaters. Constructed wetlands can be established in many different ways and its characteristics can differ greatly, according to the user needs, the

* Ingeniero civil de la Universidad Militar Nueva Granada. Magister en Ingeniería Ambiental Universidad Politécnica de Catalunya. Candidato al Doctorado (Ph.D.) de la misma Universidad.. Investigador Departamento de Ecología de Plantas, Universidad de Aarhus (Dinamarca). Email: carlos.arias@biology.au.dk

** Ph.D. Director del Departamento de Ecología de Plantas, Universidad de Aarhus (Dinamarca).

geographic site and even the climatic conditions of the area. The following article deals with the general characteristics of the technology and the physical and chemical phenomena that govern the pollution reduction with in the different available systems.

Keywords: Constructed wetland, wastewater, phosphorous reduction, nitrification, absorption, suspended solids, biologic oxygen demand.

INTRODUCCIÓN

El incremento en la generación de aguas residuales ha obligado a la ingeniería a buscar, encontrar y aplicar alternativas de tratamiento de depuración eficientes, autónomas y económicamente viables. Entre las soluciones más atractivas se encuentran los tratamientos que emulan los fenómenos que ocurren espontáneamente en la naturaleza. Estos sistemas se denominan tratamientos naturales de aguas residuales y cada día es más frecuente el uso de lagunajes, de sistemas de infiltración, de humedales artificiales de toda la variedad de sistemas, pues producen efluentes de buena calidad, al mismo tiempo que presentan bajos costos de inversión, operación y mantenimiento y no requieren personal altamente capacitado. El uso de humedales para depurar aguas se ha incrementado durante los últimos veinte años y, hoy por hoy, son una opción de tratamiento de aguas residuales reconocida y recomendada. Se ha demostrado que son efectivos en la reducción de la materia orgánica, para transformar y asimilar nutrientes y retienen y/o eliminan sustancias tóxicas que de otra manera serían vertidas sin tratamiento alguno al medio ambiente.

IWA (2000) define un humedal como una zona inundada o saturada, bien sea por aguas superficiales o por aguas subterráneas y con una frecuencia, duración y profundidad suficientes para mantener especies de plantas predominantemente

adaptadas a crecer en suelos saturados. Estas zonas húmedas se han aprovechado para el control de la contaminación, generada por las aguas residuales de manera espontánea e indiscriminada. El aprovechamiento de estas zonas húmedas era práctica usual dentro de las civilizaciones antiguas, que vertían sus aguas servidas en zonas adyacentes a lagos y ríos (humedales naturales). Evidentemente, la razón primordial era deshacerse de las aguas residuales más que el de depurarlas, pero gracias a la capacidad de estas zonas húmedas, el potencial de contaminación de las aguas negras se reducía antes de que se incorporaran a los cauces. Como beneficio agregado, las aguas estabilizadas del humedal aportaban nutrientes aprovechables para el sostenimiento de fauna y flora.

La investigación científica y sistemática amplió el horizonte de aplicaciones de los humedales como sistemas de control de contaminación. Esta investigación en particular se inició alrededor de los años cincuenta con el trabajo de Seidel y posteriormente de Kickuth que crearon el concepto de "rhizosphere" (Börner et al, 1998). Sin embargo, los resultados obtenidos por estos sistemas no fueron del todo satisfactorios pero marcaron el inicio en el desarrollo y en la investigación de esta tecnología. El primer humedal construido específicamente para tratar aguas residuales entró en operación en 1974 en Othofresen (Vymazal, 1998). A partir de esta fecha, el desarrollo ha sido acelerado y efectivo y ha llevado a la construcción de estos sistemas, tanto en Norte América como en Europa. Según Kadlec y Knight (1996) hay más 200 de estos sistemas en operación en Norte América, mientras que Brix (1993) afirma que hay más de 500 de estos sistemas en operación en Europa.

Además de la depuración de aguas residuales, los humedales ofrecen beneficios ambientales agregados como son: mejoran de la calidad ambiental, crean y restauran nichos ecológicos, generan mejoramientos paisajísticos, contribuyen en la generación de zonas de amortiguamiento de

crecidas de ríos y avenidas, son fuente de agua en procesos de reutilización de aguas residuales para riego y aportan ventajas en otras actividades de carácter lúdico y económico.

TIPOS DE HUMEDALES

Son muy diversas las clasificaciones que existen en la identificación de los humedales artificiales. Vymazal (1998), sugiere una clasificación de acuerdo con las características del material vegetal predominante en los lechos así:

- a) Humedales construidos, basados en macrófitas flotantes. Ej.: *Eichhornia crassipes*, *lemna minor*.
- b) Humedales construidos, basados en macrófitas de hojas flotantes. Ej.: *Nymphaea alba*, *Potamogeton gramineus*.
- c) Humedales construidos, con macrófitas sumergidas. Ej.: *Littorella uniflora*, *Potamogeton crispus*.
- d) Humedales construidos, con macrófitas emergentes. Ej.: *Thypha latifolia*, *Phragmites australis*.

La figura No 1 ilustra cada uno de los sistemas enunciados con sus plantas características.

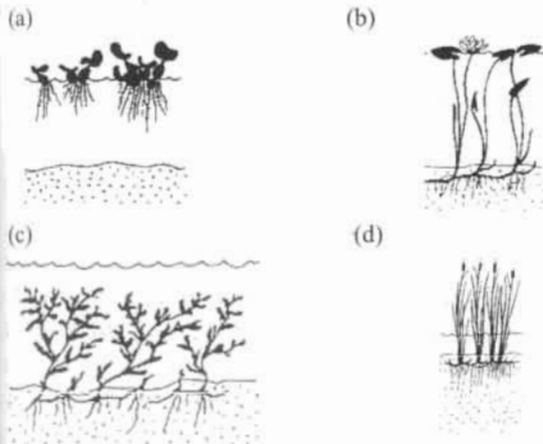


Figura 1. Tipos de humedales según las plantas predominantes: (a) macrófitas flotantes, (b) macrófitas de hojas flotantes, (c) macrófitas sumergidas y (d) macrófitas emergentes. (tomado de Brix, 1993)

Para el tratamiento de aguas residuales existe la posibilidad de usar las diferentes alternativas siempre y cuando las plantas se puedan adaptar a las condiciones ambientales. Sin embargo, las plantas correspondientes al grupo de macrófitas emergentes han demostrado buena capacidad de adaptación y en especial son resistentes a las condiciones ambientales adversas predominantes, cuando se trata de aguas residuales. Una posible subdivisión de estos humedales artificiales plantados con macrófitas emergentes, es:

- a) Sistemas de flujo libre (humedales de flujo superficial (HFS).
- b) Sistemas con flujo horizontal subsuperficial (HFSS).
- c) Sistemas con flujo vertical (HFV).
- d) Sistemas híbridos (SH).

La figura No 2 presenta cada uno de los sistemas enunciados.

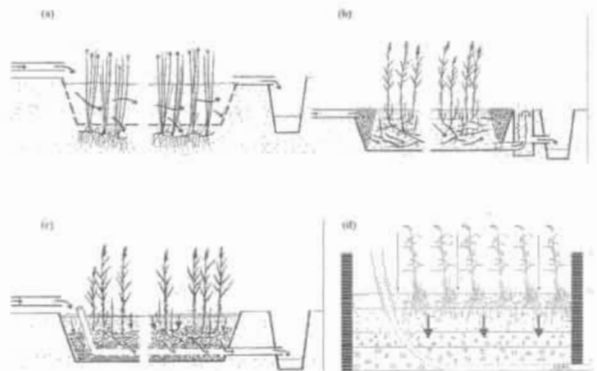


Figura 2. Tipos de humedales construidos según el tipo de flujo predominante en los lechos: (a) humedales de flujo superficial, (b) humedales de flujo subsuperficial, (c) humedales de flujo mixto y (d) humedales de flujo vertical (adaptado de Brix y Cooper, 1998).

La anterior clasificación obedece al sentido preferente del movimiento del agua en los lechos. En los humedales de flujo horizontal superficial (a), el agua se vierte en superficie en un extremo del lecho, trasiega expuesta a la atmósfera, lenta y horizontalmente, para finalmente ser evacuada en el extremo opuesto del lecho, por medio de

un vertedero. En los humedales de flujo horizontal subsuperficial (b), el agua se distribuye en un extremo del lecho, se infiltra, trasiega en sentido horizontal a través de un medio granular de relleno y entre las raíces de las plantas. Al final y en el fondo del lecho, el agua tratada se recoge y se evacua por medio de tuberías y/o vertederos. Las profundidades de estos humedales descritos no suele exceder los 0.60 m. y para facilitar el trasiego del agua deben ser construidos con una leve pendiente en el fondo, pero manteniendo en lo posible condiciones hidráulicas de flujo laminar. Los lechos deben ser aislados del suelo subyacente para evitar la contaminación de suelos y de las aguas subterráneas.

Los humedales híbridos (c) son combinaciones de los humedales anteriormente descritos y pueden estar compuestos de diferentes lechos y/o de zonas en donde el agua circula expuesta a la atmósfera, zonas donde el flujo es subsuperficial e inclusive con sectores con flujo vertical. Su disposición dependerá de los objetivos del tratamiento, de las características del agua por tratar, de las condiciones de operación y de la disponibilidad económica. Para mejorar aun más la calidad del agua, o cuando se quieren obtener resultados de calidad específicos y hacer los sistemas más efectivos, también es posible implementar procesos de recirculación del agua tratada en diferentes puntos de los sistemas.

A diferencia de los humedales de flujo horizontal, en los humedales de flujo vertical (d) el agua fluye de manera descendente y percola en el humedal. El agua se vierte y se distribuye en toda la superficie del lecho y percola en el lecho, entre las diferentes capas de material filtrante de relleno. El material de relleno puede ser de distinta naturaleza y además sirve para facilitar el arraigo de las plantas. El lecho debe tener una profundidad no menor a 1 m. El sistema de distribución del agua afluente está en la superficie y reparte el agua por tratar uniformemente, para asegurar buenos resultados

en la depuración. Una vez el agua pasa a través del lecho, se recoge en el fondo y se evacua por medio de tubería. El agua en los humedales de flujo vertical se puede dosificar de manera continua o intermitentemente hasta inundar totalmente el lecho, siempre dependiendo del modo de operación previsto en el diseño. Los humedales de flujo vertical presentan cierta ventaja con respecto a los humedales de flujo horizontal, en tanto que además de eliminar la DBO_5 , tienen mayor capacidad para nitrificar totalmente el agua tratada, inclusive a niveles que sólo se obtienen en sistemas de tratamiento terciario o secundario (Cooper et al 1998).

PRINCIPIOS DE FUNCIONAMIENTO

Los humedales construidos, generalmente se clasifican dentro del grupo de los sistemas naturales de tratamiento de aguas residuales acuáticos. La depuración del agua ocurre por la interacción entre los elementos componentes del humedal y de los fenómenos físicos, químicos y biológicos dentro del humedal, con la intervención del sol como fuente principal de energía. La tabla No 1 resume los mecanismos más importantes que intervienen en los procesos de depuración.

GENERALIDADES DEL DISEÑO DE LOS HUMEDALES

El dimensionamiento y las características físicas del humedal construido dependen, entre otros factores, de la localización de la planta, de las características climáticas del sitio, de las características de calidad del agua afluente, de la calidad del agua efluente deseada, y de las restricciones de calidad de vertido de aguas tratadas, exigida por las autoridades locales, una vez se conozcan las anteriores condiciones.

Tabla 1. Procesos que contribuyen a la depuración de las aguas residuales en SPA¹: sistemas de plantas acuáticas, HFS²: humedales de flujo superficial, HFSS³: Humedales de flujo subsuperficial y HFV⁴: humedales con flujo vertical (adaptado de Crites & Tchobanoglous, 1998).

Contaminante	SPA ¹	HFS ²	HFSS ³	HFV ⁴
Materia orgánica	Conversión biológica por intervención de las bacterias aerobias, facultativas y anaerobias adheridas a las superficies de las plantas y a los detritos.	Reducción de la DBO soluble por conversión biológica por efecto de bacterias aerobias, facultativas y anaerobias que crecen en la superficie de las plantas y sobre los detritos. La DBO particulada se elimina por absorción, por filtración y por sedimentación	Reducción por conversión biológica por intervención de bacterias facultativas y anaerobias adheridas a las superficies de las plantas y los detritos del medio de relleno del humedal.	Reducción por conversión biológica por medio de bacterias facultativas y anaerobias adheridas a las superficies de las plantas y detritos.
Materia en suspensión	Sedimentación	Filtración y sedimentación	Filtración y sedimentación	Filtración
Nitrógeno	Procesos de nitrificación/desnitrificación.	Procesos de nitrificación/desnitrificación, asimilación por las plantas y volatilización.	Nitrificación/desnitrificación, asimilación por las plantas y volatilización.	Nitrificación/desnitrificación, asimilación por las plantas y volatilización.
Fósforo	Reducción por precipitación y por asimilación por plantas y microorganismos.	Reducción por sedimentación y por asimilación por medio de las plantas y microorganismos.	Por filtración, sedimentación, adsorción, por asimilación por parte de las plantas y microorganismos.	Filtración, sedimentación, absorción y asimilación por las plantas.
Metales pesados	Sedimentación, por absorción y absorción por plantas.	Absorción a las plantas, superficie de detritos y por sedimentación.	Absorción a las raíces de las plantas y los detritos, sedimentación.	Absorción a las raíces de las plantas, sedimentación y filtración.
Trazas de contaminantes orgánicos	Volatilización, absorción y biodegradación.	Volatilización, absorción, biodegradación.	Absorción, biodegradación.	Volatilización, absorción, biodegradación.
Patógenos	Muerte natural, radiación UV. Depredación por otros organismos.	Muerte natural, depredación, radiación UV, sedimentación, secreción de antibióticos de las raíces de las plantas.	Por muerte natural, por depredación, sedimentación, secreción de antibióticos desde las raíces de las plantas.	Muerte natural, depredación, sedimentación, secreción de antibióticos de las raíces de las plantas.

Con respecto al diseño de las estructuras del humedal y el dimensionamiento de los lechos, es frecuente el uso de ecuaciones de primer orden, de regresiones estadísticas desarrolladas a partir de información obtenida de bases de datos y/o el empleo de modelos numéricos empíricos. Las dimensiones obtenidas por estos métodos generan áreas mínimas de tratamiento, que entre otros

factores dependen del contaminante que se quiere eliminar, de la concentración original, del objetivo de calidad final, de la posición geográfica de la planta y de las condiciones climáticas del sitio de localización. Posteriormente, el área de tratamiento obtenida debe ajustarse a una serie de recomendaciones que incluyen: área específica de tratamiento mínima por PE, relación largo ancho,

profundidad y pendiente. Adicionalmente, se debe verificar que los medios filtrantes seleccionados (cuando se trate de humedales con flujo subsuperficial y vertical) cumplan con ciertas características físicas, como la porosidad, granulometría y la conductividad hidráulica. Con respecto a las estructuras de distribución y recogida de aguas, las opciones incluyen canales y tuberías perforadas, las cuales deben asegurar buena distribución de las aguas afluentes en los lechos y que redundará en un mejor tratamiento. En la periferia se recomienda aislar la planta de tratamiento para evitar el acceso de personas ajenas, mediante el establecimiento de zonas boscosas, de cercas vivas y dotarlos de una buena señalización para informar a la población. La tabla No. 2 presenta algunos valores típicos que se utilizan como parámetros para el diseño. Estos valores no son estrictamente obligatorios, pero brindan información típica de las condiciones normales de diseño.

Tabla 2. Parámetros típicos de diseño para humedales construidos para tratamiento de aguas residuales domésticas (adaptado de *Constructed wetlands for wastewater treatment in Europe 1998*)

Tipo flujo	Horizontal	Subsuperficial	Vertical
Carga orgánica afluente	$< 112 \text{ DBO}_5 \text{ kg ha}^{-1} \text{ d}^{-1}$	$< 150 \text{ DBO}_5 \text{ kg ha}^{-1} \text{ d}^{-1}$	$< 112 \text{ DBO}_5 \text{ kg ha}^{-1} \text{ d}^{-1}$
Carga hidráulica	$< 5 \text{ cm d}^{-1}$	$< 5 \text{ cm d}^{-1}$	$< 5 \text{ cm d}^{-1}$
Tiempo de retención hidráulica	5 – 15 días	> 5 días	1-2 días
Area específica por PE,	De 5 m^2 a 20 m^2 PE	De 5 m^2 a 20 m^2 PE	De 1 m^2 a 5 m^2 PE
Relación largo ancho	10:01	03:01	NA
Profundidad	$< 0.60 \text{ m}$	$< 0.60 \text{ m}$	$> 1.00 \text{ m}$
Pendiente del fondo	$< 0.1\%$	$< 0.1\%$	NA
Tipo de relleno	NA	Arenas y gravas	Arenas y gravas
Vegetación	Variable	Variable	Variable

Adicionalmente y cuando se seleccione el tipo de humedal por diseñar, vale tener en cuenta que Cooper afirma (1998) que hay diferencia en

el rendimiento entre las diferentes opciones de humedales artificiales. Afirma además, que los humedales con flujo horizontal son buenos para eliminación de sólidos en suspensión y bacterias, reducción de DBO_5 , hasta el límite de transferencia de oxígeno del lecho permita; son aceptables para desnitrificar, mientras que su capacidad de nitrificar es pobre (baja disponibilidad de oxígeno dentro de los lechos). Además, afirma que los humedales con flujo vertical tienen buena capacidad para nitrificar, lo cual redundará en una buena capacidad para eliminar DBO_5 y DQO, mientras, que su capacidad para retener sólidos es menor y son susceptibles de colmatarse, si no se seleccionan los medios filtrantes adecuados.

Colombia no ha sido ajena al desarrollo de esta tecnología y es así como varias experiencias en el campo de los humedales artificiales han sido documentadas internacionalmente y vale la pena mencionar algunas de ellas. En 1998, Williams *et al* hacen referencia a un humedal artificial de diseño especial para la sede de CENICAFE en Chinchiná y documentan buena eficiencia de depuración. Durante la 7^{ma} reunión mundial de humedales, Giraldo y Zarate (2001) presentan un par de estudios científicos realizados con base en estudios en un humedal artificial de flujo vertical en San Andrés con buenos resultados de reducción de DBO_5 , SS y H_2S . Vale también la pena destacar, el trabajo que se está realizando en

varias universidades nacionales, en las cuales se está innovando y adaptando la tecnología para mejorar la calidad del agua y proteger el medio ambiente.

CONSIDERACIÓN FINAL

Los humedales artificiales son una alternativa para la reducción de la contaminación generada por aguas residuales. Es posible obtener buenos rendimientos en la depuración de aguas residuales domésticas, siempre y cuando el diseño y la operación del humedal se ajuste a las características del agua residual y a las condiciones climáticas del sitio de emplazamiento. Además, también hay experiencias documentadas que demuestran la capacidad de depuración en una amplia variedad de tipos de contaminación, que incluyen: mineralización de fangos provenientes de depuradoras de aguas residuales convencionales, efluentes con alta carga orgánica, depuración de contaminantes orgánicos y otros. Añadido a las anteriores ventajas, se puede agregar la sencillez en el diseño, operación y mantenimiento a bajos costos. Al considerar las anteriores características y con las condiciones climáticas que priman en Colombia, se puede afirmar que los humedales artificiales son una solución razonable para el tratamiento de las aguas residuales en nuestro país, siempre y cuando se ajusten a las condiciones locales, se use material vegetal autóctono y se construyan los sistemas de acuerdo con las recomendaciones de los grupos multidisciplinarios que deben ser partícipes, durante el proceso de evaluación del sistema más idóneo por implementar.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Börner T., Felde K., Gschössl T., Gschössl E., Kunst S. and Wissing F. (1998). Germany, en *Constructed wetlands for wastewater treatment in Europe*. (ed. Vymazal, J., Brix, H., Cooper, P. F., Green, M. B., and Haberl), pp 169-190. RBackhuys Publishers, Leiden, The Netherlands.
- Brix H. (1997). Do macrophytes play a role in constructed treatment wetlands? *Wat.Sci.Tech.* 35, 11-17. IWA publishing.
- Brix H. and Johansen N.H. (1999). Treatment of domestic sewage in a two-stage constructed wetland - design principles. In: Vymazal J. (Ed.), *Nutrient cycling and retention in natural and constructed wetlands*. Backhuys Publishers, Leiden, The Netherlands, page 155-163.
- Cooper P. (1998). A review of the design and performance of vertical flow and hybrid reed bed treatment systems. En *proceedings of 6th International Conference on Wetlands Systems for Water Pollution Control*, Aguas de Sao Pedro, Brazil, September 27 a October 2 de 1998 (ed. Tauk-Tornisielo).
- Crites R., Tchobanoglous G. (1998). *Small and decentralized wastewater management systems*. McGraw Hill Inc. Boston.
- EPA DK (1999). *Rodzzoneanlæg op til 30 PE Vejledning fra Miljøstyrelsen 1*, 1-46.
- Giraldo E., Zárate E. (2001). Development of a conceptual model for vertical flow wetland metabolism. *Wat.Sci:Tech* vol 44 No 11-12, pp. 273-280. IWA publishing.
- Giraldo E., Zárate E. (2001). Removal of hydrogen sulphide BOD from brackish water using vertical flow wetlands in a Caribbean environment. *Wat.Sci:tech* vol 44 No 11-12 pp361-367. IWA publishing.
- IWA (2000), *Constructed wetlands for pollution control. Processes, performance, design and operation*. IWA Specialist group on use of macrophytes in water pollution control. IWA publishing, London, England.
- Kadlec R., Knight R. (1996) *Treatment wetlands*. Lewis-CRC publishers, Boca Raton, FL, USA.

Vymazal, J., Brix, H., Cooper, P. F., Green, M. B., and Haberl, R.(eds.) (1998). *Constructed wetlands for wastewater treatment in Europe*. Backhuys Publishers, Leiden, The Netherlands.

Williams J.B., Zambrano D., Ford M.G. May E., Butler J.E. (1998). *Constructed wetlands for wastewater treatment in Colombia*. En proceedings of 6th International Conference on Wetlands Systems for Water Pollution Control, Aguas de Sao Pedro, Brazil, September 27 a October 2 de 1998 (ed. Tauk-Tornisielo).