

Opciones técnicas de saneamiento para las comunidades pequeñas. Un ejemplo creativo con la de Dieulefit, Francia: Una estación de depuración por lodos activados o una estación de depuración por humedales construidos o artificiales equipados de aireación forzada

Technical sanitation options for the small communities. A creative example with the commune of Dieulefit, France: An activated sludge treatment plant or a constructed or artificial wetland treatment plant equipped with forced aeration

Federico Beisso¹, Amado Enrique Navarro-Frómeta²

¹ *Association Partage de Connaissances*

Tel. +33 6 67 30 90 64. Correo-e (e-mail): carlos.beisso@gmail.com

²Universidad Tecnológica de Izúcar de Matamoros

Izúcar de Matamoros, Puebla, México

Correo-e (e-mail): navarro4899@gmail.com

*Autor a quien debe dirigirse la correspondencia

Recibido: Mayo 10, 2022

Aceptado: Junio 30, 2022

RESUMEN

Los humedales de flujo vertical tipo francés constituyen una atractiva tecnología que aún no ha sido suficientemente explorada en México en particular y en América Latina y el Caribe en general. Por ello se ilustran algunas de sus bondades. Con la finalidad de disminuir la problemática generada por el uso del agua en comunidades pequeñas se presenta en este ejemplo una reunión comunitaria convocada por un alcalde a la que fueron invitados expertos y en la que participaron los propios habitantes. El intercambio fue interesante porque refleja la necesidad de socializar el conocimiento en las personas que habitan en las comunidades pequeñas y que ellas mismas pueden resolver sus problemas de sanidad si conocen con claridad lo que significa la depuración de las aguas negras o usadas. Se dan al inicio las bases de diseño de este tipo de pequeños humedales artificiales tipo francés.

Palabras clave: Opciones de saneamiento de aguas residuales comunitarias, sistemas de lodos activados, sistemas de humedales artificiales (construidos) clásicos y con aireación forzada

ABSTRACT

French-type vertical flow wetlands are an attractive technology that have not yet been sufficiently explored in Mexico in particular and in Latin America and the Caribbean in general. Therefore, some of its benefits are illustrated. In order to reduce the problems caused by the use of water in small communities, this example presents a community meeting called by a mayor to which experts were invited and in which the inhabitants themselves participated. The exchange was interesting because it reflects the need to socialize knowledge in people who live in small communities and that they themselves can solve their health problems if they clearly know what the treatment of sewage or used water means. At the beginning, the design bases of this type of small French-type artificial wetlands are given.

Keywords: Community wastewater remediation options, activated sludge systems, classic and forced aeration artificial (constructed) wetland systems

INTRODUCCIÓN

La década de los 2000 trajo consigo una modificación importante en el paisaje del saneamiento de las aguas residuales domésticas a nivel de pequeñas y medianas colectividades en Francia. Gradualmente, las tecnologías más difundidas como las lagunas artificiales, los filtros de arena, los lechos bacterianos y los lodos activados han sido substituidos por humedales artificiales de flujo vertical. Esta tecnología fue objeto de un importante trabajo de investigación, durante los años 80 y 90, por parte del Cemagref actualmente INRAE⁸ (Instituto Nacional de Investigación para la Agricultura, la Alimentación y el Ambiente, en español), para adaptarla a las condiciones y requerimientos reglamentarios existentes en Francia. Servicios técnicos de apoyo y transferencia de tecnología, como los SATESE (Servicios de Asistencia Técnica para Gestores de Estaciones de Depuración, en español) jugaron un importante papel en la difusión y adopción de esta tecnología por parte de las comunidades o colectividades pequeñas y medianas.

Como resultado del trabajo mencionado de muchos investigadores, entre los cuales destacó el Dr. Pascal Molle, se desarrolla la tecnología de los humedales de flujo vertical de tipo francés (Boutin et al., 2000). El estudio de numerosos sistemas instalados ha demostrado que es una tecnología eficiente y robusta (Paing et al., 2015). Pudiendo constar de una o dos etapas, una segunda etapa mejora la remoción del nitrógeno total, aunque se consiguen buenos resultados con una etapa (Navarro et al., 2020; Silveira et al., 2015). Su efectividad ha sido demostrada también en condiciones similares a las que pueden encontrarse en los países de Latinoamérica y el Caribe (Trein et al., 2020; Yadav et al., 2018). Sobre esto se abunda más adelante.

Antes de continuar es importante aclarar que, como se está hablando de una tecnología donde participan activamente vegetales y microorganismos, esta no se puede extrapolar directamente de una región a otra y debe ser objeto de una adaptación particular. En este caso se está hablando de humedales artificiales de flujo vertical adaptados a las condiciones ambientales presentes en Francia continental.

El IRSTEA (actual INRAE) trabajó durante más de una década en la adaptación de los humedales artificiales de flujo vertical al clima tropical (Guadalupe, Guyana, Martinica y Mayota) y el resultado de esta investigación la pueden encontrar en la publicación "Humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales domésticas en zona tropical - Guía de dimensionamiento para zonas tropicales" (ver "Documentos").

Los humedales artificiales depuran las aguas residuales domésticas crudas sin tratamiento previo al mismo tiempo que degradan los lodos producidos durante el tratamiento de dichas aguas residuales.

Los lodos se acumulan y degradan lentamente a nivel de la superficie del humedal (perdiendo masa y volumen) para posteriormente ser retirados y dispersados directamente en parcelas agrícolas. Esta acumulación de lodos, en Francia continental, se realiza a una tasa promedio de 2 cm por año, por lo que dichos lodos mineralizados son retirados del humedal cada 10 o 15 años.

Son tecnologías extensivas, de fácil manejo y escasa mecanización al tiempo que presentan una excelente integración en el paisaje. En muchos pueblos son parte de circuitos de paseos y son puestos en valor ya que representan una manera ecológica de restituir el agua doméstica, una vez depurada, al medio natural.

⁸ As the result of the merger of INRA and IRSTEA, INRAE is France's National Research Institute for Agriculture, Food and Environment. Its mission is to carry out excellent science in order to provide innovative solutions addressing global challenges, notably climate change, biodiversity and food security while at the same time enabling the much needed agroecological, nutritional and energy transitions. This research also serves policy making from regional to international levels, thereby contributing to the Sustainable Development Goals (<https://www.peer.eu/about-peer/centres/inrae-national-research-institute-for-agriculture-food-and-the-environment>) [Nota de los editores]

Otras razones también justifican la adopción casi unánime de los humedales artificiales de flujo vertical por parte de las pequeñas y medianas colectividades. Presentan menos costos de inversión y explotación que tecnologías más compactas como por ejemplo los lodos activados y esto se verifica hasta un tamaño de estación de depuración de entre 3 y 4000 equivalentes de habitantes⁹; requiriendo menos superficie que las lagunas de tratamiento en una relación de 1-1.5 a 11 m² por equivalente de habitante y presentan mejores rendimientos en términos de depuración; en cuanto a los filtros de arena, éstos presentan problemas de colmatado y gestión de lodos que no se observan en los humedales artificiales del flujo vertical.

Por último, los humedales artificiales de flujo vertical tienen una gran tolerancia a golpes hídricos debidos a flujos turísticos estacionales o a períodos de fuertes lluvias. Esto ocurre, tanto por la acción mecánica del filtrado en la capa superficial como por la presencia de microorganismos adheridos a las gravas que constituyen el macizo granular y que por esta razón no son arrastrados por un caudal excesivo de agua. A nivel del Departamento del Tarn, situado en el sudeste de Francia, el primer humedal artificial de flujo vertical fue construido en el pueblo de Peyroles, en 2002 y tiene una capacidad de tratamiento de 200 equivalentes de habitantes equivalentes.

Si se sigue la línea de agua, los equipos que se suceden después del canal de llegada del agua residual doméstica, son:

1. Una arqueta de desbaste manual,
2. Un canal de medición,
3. Una arqueta de alimentación equipada de un sifón auto cebador que envía una ola de un volumen preestablecido, por gravedad, al lecho en alimentación,
4. Una arqueta de distribución de dicha ola entre uno de los tres lechos que componen el humedal artificial del primer nivel,
5. Una red aérea de tubos que distribuye la ola de manera homogénea sobre la superficie del lecho en alimentación, donde atraviesa
6. un macizo granular plantado de carrizos atravesado por una red de tubos de aireación que es el lugar donde ocurre la filtración y degradación de la contaminación,
7. Una red de canalización que permite recuperar el agua al fondo del macizo granular y la envía hacia
8. la arqueta de alimentación del humedal artificial de segundo nivel, igualmente equipada de un sifón auto-cebador que una vez alcanzado el nivel de agua preestablecido, envía la ola hacia
9. la arqueta de distribución, de donde parte la ola por gravedad hacia uno de los dos lechos que componen el humedal artificial de segundo nivel hacia
10. una red aérea de tubos que distribuye la ola de manera homogénea sobre la superficie del lecho en alimentación, donde atraviesa
11. un macizo granular constituido de arena, plantado de carrizos y atravesado por una red de tubos de aireación que es el lugar donde ocurre el afinado del tratamiento,
12. Una red de canalización que permite recuperar el agua al fondo del macizo granular y la envía hacia
13. un canal de salida y luego al punto de vertido en el arroyo de Badaillac.

En la Figura 1 se tiene la representación gráfica del humedal artificial del pueblo de Peyroles. Éste es el esquema clásico del humedal artificial de flujo vertical de tipo "francés".

⁹ El término 'equivalentes de habitantes' es un término técnico que, en este caso, indica que es exactamente el número de habitantes que producen las aguas residuales. Si se tienen píaras u otros animales domésticos se calcularán de acuerdo con el equivalente que sus desechos tendrían con respecto de los de las personas considerando alguna variable importante de contaminación (cantidad de material biodegradable disuelto y en forma de sólidos suspendidos, por ejemplo. Lo mismo sería para el caso de los agentes agroquímicos que no son biodegradables con respecto a lo que los seres humanos emplean de medicamentos, sustancias químicas usadas en los hogares, etc.) [Nota del primer autor]

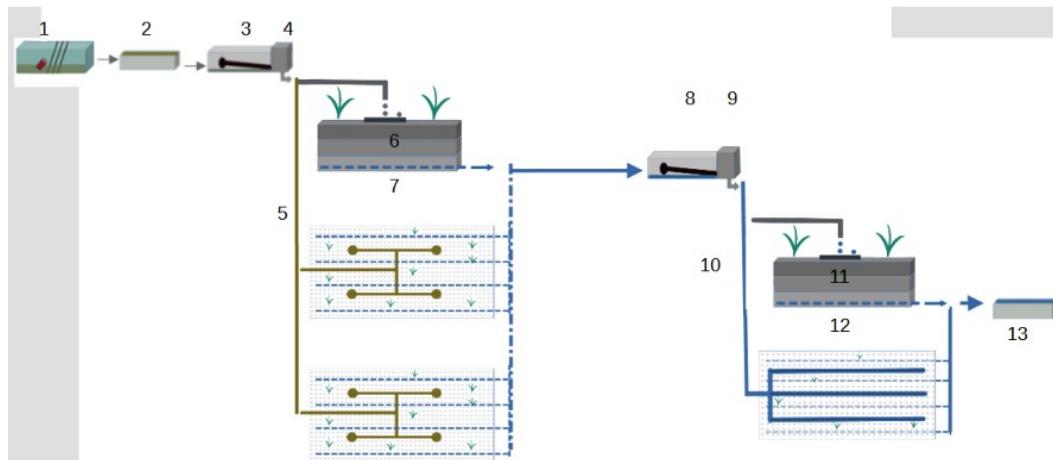
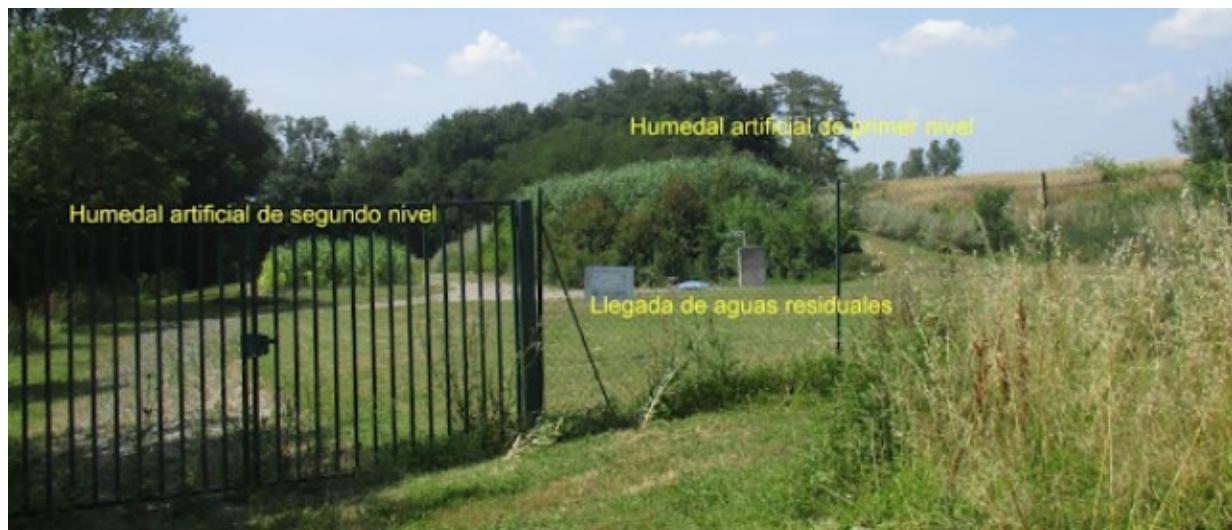


Figura 1.
Humedal
artificial
del pueblo
de
Peyroles

Este humedal artificial fue utilizado como demostración por parte del SATESE del Tarn. Por aquí pasaron numerosos responsables de saneamiento de diferentes colectividades y jugó un papel muy importante al momento de tomar la decisión respecto de que tecnología de tratamiento adoptar.

Este tipo de humedales son los que se encuentran en mayor número en el Tarn y presentan una capacidad de tratamiento que van de 100 (Parisot-Bousquet, Fotografía 1) a 3000 equivalentes de habitantes (Cordes sur Ciel/ Les Cabannes).



Fotografía 1. Humedal artificial de Parisot-Bousquet diseñado para 100 equivalentes de habitantes

El Departamento del Tarn cuenta con más de 130 humedales artificiales en funcionamiento.

En los casos en que el medio receptor lo permite y siempre respetando las exigencias de la reglamentación en términos de calidad de vertido, es posible construir un humedal artificial de flujo vertical con solamente el primer nivel de tratamientos lo que permite una economía de inversión de entre un 30 a un 40%.

Se tomará como ejemplo el humedal artificial de Montans/Bourg Ouest que fue construido en 2011. Tiene una capacidad nominal de 300 equivalentes de habitantes pero actualmente funciona con una

carga de 170 equivalentes de habitantes aunque está dimensionado en el terreno y los equipos para trabajar a término con una carga de 600 equivalentes de habitantes.

Al igual que en Peyroles, el agua discurre por gravedad y, por lo tanto, no están conectados a la red eléctrica.

La secuencia de equipos es la misma (reja de desbaste, etc.) solamente que el tratamiento se termina en el primer nivel, luego viene el canal de salida. En este caso crearon una pequeña laguna para afinar el tratamiento y, por último, el punto de vertido en el río Tarn (Figura 2).

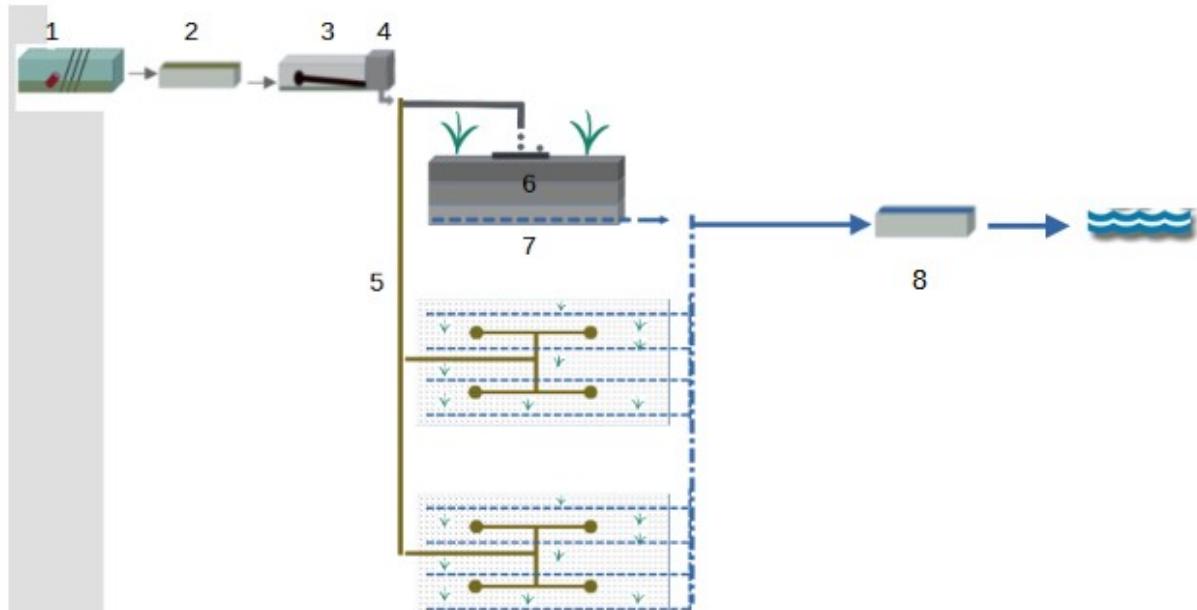
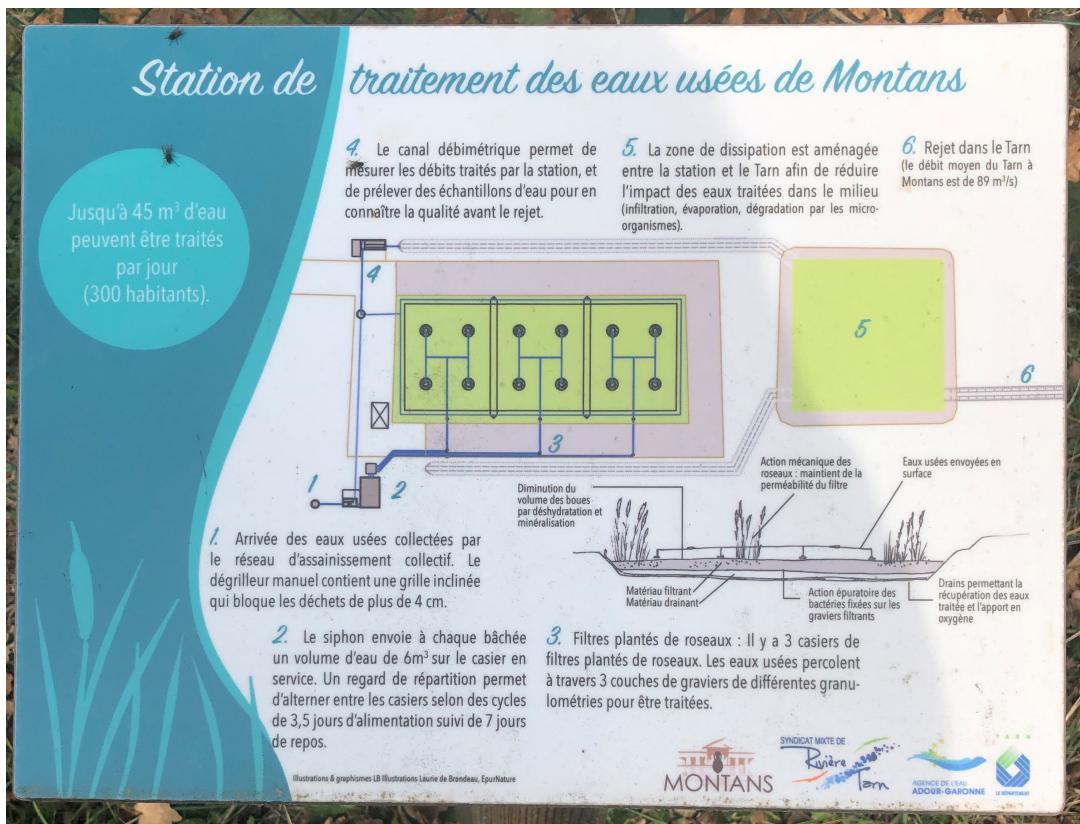


Figura 2. Humedal artificial del pueblo de Montans/Bourg Ouest que descarga al río Tarn

El elemento que debe destacarse es que la alcaldía creó un paseo que incluye el humedal artificial con un cartel que explica gráficamente el tratamiento al que es sometida el agua residual previamente a su vertido en el río (Fotografías 2-5). También están presentes un circuito para realizar bicicleta acrobática (a 15 metros de distancia), una pequeña plaza de descanso con bancos (a 50 metros) y una laguna con patos y otros animales salvajes a 100 metros de la entrada de la estación de depuración. Esta voluntad de poner en valor el humedal artificial es muy frecuente en los distintos pueblos del Departamento del Tarn. Por un lado, les permite crear paseos y áreas de recreación al aire libre y, por otro, comunican sobre la vocación de respeto y cuidado del ambiente que orientan las políticas municipales.

Este tipo de humedales, son una variante del sistema clásico. Empezaron a implementarse más tarde en el tiempo y en cuanto a su capacidad de tratamiento se tiene, como ejemplo del más pequeño, el Lac de Montagnés con una capacidad de tratamiento de 30 equivalentes de habitantes hasta el de Ste. Affrique les Montagnes con una capacidad de tratamiento de 1200 equivalentes de habitantes.

Por último, siempre a nivel del Departamento del Tarn, hay humedales artificiales de filtro vertical con recirculación. Esta tecnología propone un humedal artificial de flujo vertical de primer nivel al que se le agrega a la salida una arqueta equipada de una bomba que envía todo o una parte del efluente nuevamente hacia la entrada del humedal.



Fotografía 2. Este cartel, situado a la entrada de la estación explica las diferentes etapas por las que atraviesa el agua residual durante el proceso de depuración



Fotografía 3. Vista del humedal artificial a fines del invierno, las cañas han sido cortadas y retiradas



Fotografía 4. La flora y la fauna es rica en diversidad y en este cartel se detallan las características de las mismas



Fotografía 5. Este cartel está situado en la mitad del recorrido. Explica al visitante las diferentes etapas e instalaciones con las que se va a encontrar

Esto permite reducir la superficie requerida por el humedal manteniendo los niveles de calidad del vertido de un humedal artificial de flujo vertical de dos niveles. Una desventaja es que, en aquellos humedales en los que por razones de topografía se podía hacer circular el agua por gravedad y, por lo tanto, evitar el uso de electricidad, al equiparlos en este caso de una bomba necesariamente deben contar con un suministro de electricidad.

Se tienen algunos humedales equipados para realizar recirculación en el Departamento, el más pequeño es el del pueblo de Rouffiac (81150) construido en 2014, con una capacidad nominal de 260 equivalentes de habitantes y el más grande es el del pueblo de Frejairolles (81990), construido en 2013, con una capacidad nominal de 1300 equivalentes de habitantes.

Con el paso de los años y la experiencia acumulada, constructores y centros de investigación han propuesto nuevas utilizaciones para los humedales artificiales con la finalidad de ampliar el espectro de contaminantes a eliminar, de sustancias a tratar o que simplemente se modifican porque permiten una disminución de la superficie requerida. La estación de tratamiento de lodos por humedales artificiales de la ciudad de Nègrepelisse es un buen ejemplo de la aplicación de la tecnología de humedales artificiales en el tratamiento de lodos derivados del tratamiento de aguas residuales domésticas en sistemas tradicionales como los de lodos activados que todavía existen.

Cuando uno de los objetivos es mejorar el tratamiento del nitrógeno total se utilizan humedales artificiales que presentan una zona saturada en el fondo del perfil de grava que funciona en condiciones de anoxia. Esto se puede asimilar al superponer un humedal artificial de flujo vertical sobre un humedal artificial de flujo horizontal (Figura 3).

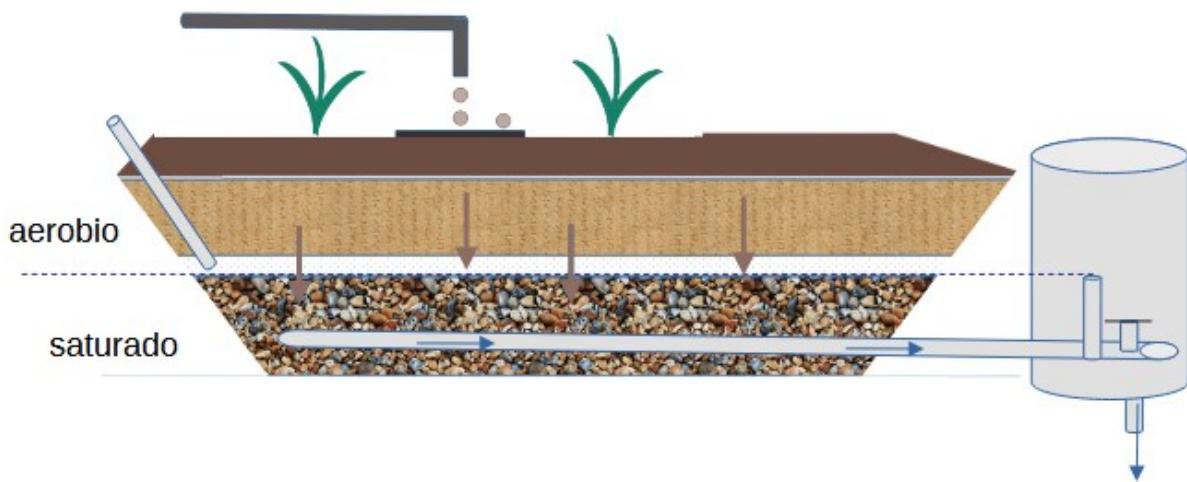


Figura 3. Humedal artificial de flujo vertical superpuesto sobre un humedal artificial de flujo horizontal para eliminar nitrógeno

Por último, es importante hacer notar que actualmente en Francia hay más de 5000 humedales artificiales de flujo vertical en funcionamiento y que 8 de cada 10 nuevas estaciones de depuración para pequeñas colectividades adoptan la tecnología de humedales artificiales de flujo vertical (hay que tener en cuenta que dentro del 2 de cada 10 restantes hay situaciones donde los humedales artificiales no se pueden realizar por cuestiones de superficie disponible).

A continuación, con objeto de mostrar que los habitantes de una pequeña comunidad pueden sensibilizarse cuando se les demuestra en una reunión virtual o presencial la bondad de mantener el agua limpia y, al mismo tiempo, sin que su costo sea excesivo ni implique el uso de tecnologías complicadas, se presenta el ejemplo de una reunión realizada en plena pandemia del Covid-19 en la región de Auvergne-Rhône-Alpes.

Esto demuestra que los habitantes de las márgenes del lago de Cuitzeo o del de Pátzcuaro en Michoacán, México, o los de Chalco, México, asentados en el lecho de una zona lacustre, como los que ahora están al lado de los canales de Xochimilco en la populosa Ciudad de México, pueden cambiar su entorno para mejorar su calidad de vida y la de sus hijos, nietos y bisnietos instalando sistemas de humedales artificiales “a la medida de cada comunidad”.

Ejemplo de una reunión convocada por el alcalde de una pequeña comunidad francesa

Si bien los humedales artificiales, como ya se vio, son una técnica de saneamiento que ha sido ampliamente adoptada para el caso de pequeñas y medianas comunidades, la realización de un proyecto particular de saneamiento exige reuniones de información y de confrontación de diferentes alternativas.

Aquí se tomó como ejemplo la discusión de diferentes alternativas técnicas para el proyecto de saneamiento de la ciudad de Dieulefit. La reunión se realizó el 7 de abril de 2021 y a causa de la pandemia de Covid 19, se desarrolló por videoconferencia.

El video lo pueden encontrar en Internet en la dirección [https://youtu.be/FEDzjOmQR2E¹⁰](https://youtu.be/FEDzjOmQR2E), está en idioma francés.

¹⁰ La dirección electrónica puede copiarse para ver el video y hay un Anexo que tiene una parte de ella en español [Nota de los editores]

Se trata de un proyecto de saneamiento para una estación de depuración de una capacidad de 5600 equivalentes de habitantes. Después de las elecciones municipales, la nueva administración se encuentra con un proyecto de saneamiento por lodos activados. Esta es una técnica muy utilizada para estaciones de depuración de más de 4000 equivalentes de habitantes. Una parte del equipo municipal está al corriente de los avances que en los últimos años se han obtenido en los humedales artificiales o también llamados humedales de tratamiento y proponen confrontar el proyecto de saneamiento por lodos activados con una alternativa de proyecto de saneamiento por humedales artificiales equipados de aireación forzada.

Aquí hay un elemento que es importante destacar y es que si bien los humedales artificiales de tipo francés son una técnica que se utiliza frecuentemente para estaciones de depuración de hasta 4000 equivalentes de habitantes, constructores, gestores e institutos de investigación generan de manera permanente nuevos conocimientos y mejoras que permiten superar los límites técnicos a diferentes niveles. En nuestro caso particular, la incorporación de aireación forzada al sistema ha permitido desplazar la barra de 4000 equivalentes de habitantes hacia 6000 equivalentes de habitantes. En lo que se refiere a la investigación, desde hace mucho tiempo se trabaja en las técnicas de tratamiento con vegetales entre las cuales se encuentran los humedales artificiales, objeto de discusión de la reunión anual del Día Mundial de los Humedales que se celebra cada 2 de febrero.

Es a partir de esta propuesta, de analizar ambas opciones técnicas, que el alcalde organizó una reunión de discusión a nivel de toda la comunidad. En esta reunión participaron también el doctor Pascal Molle (INRAe) y el ingeniero Laurent Besombes (SYNTEA), dos expertos en el área de saneamiento.

El doctor Pascal Molle realizó una presentación sobre el interés de los humedales artificiales y su pertinencia para el caso de la ciudad de Dieulefit.

El ingeniero Laurent Besombes presentó el proyecto de humedales artificiales con aireación forzada de la ciudad de Bas en Basset en el departamento de Haute-Loire. El interés de este proyecto es que presenta características muy similares al de Dieulefit, su tamaño es de 4500 equivalentes de habitantes: Eran antiguas lagunas, se crearon humedales artificiales con aireación forzada y, por último, se realizó un nivel más de humedal artificial para el tratamiento exclusivo del fósforo.

Posteriormente, se sucedieron las distintas preguntas del público: ¿Cuál es el costo de las distintas alternativas? ¿Cuál es más ventajosa en términos de seguridad de tratamiento? ¿Cuál requiere menos calificación a nivel de personal? ¿Los humedales artificiales atraen a los mosquitos y otro tipo de insectos molestos? ¿Se pueden obtener ayudas financieras del Estado para ambas alternativas? ¿Cuánto tiempo llevaría la construcción del humedal artificial y cuál sería el costo de inversión?

La participación del público fue muy intensa y el intercambio muy enriquecedor.

Por último y en resumen:

Para el caso del ejemplo, el costo de inversión de ambos proyectos es similar, el costo final del proyecto (considerando los 30 años de vida útil del proyecto e integrando los costos de explotación) es mucho menor para el caso del humedal artificial. Esta última técnica es muy rústica y resistente al estrés hídrico (fuertes lluvias), las tareas necesarias para la gestión del humedal artificial requieren de muy poca tecnicidad (esencialmente son actividades de jardinería). Los humedales artificiales de flujo vertical no atraen mosquitos ni otros insectos peligrosos ya que en ningún momento el agua está estancada y está ligeramente por debajo del nivel de la superficie. El proyecto de saneamiento por humedal artificial tiene las mismas ayudas financieras del Estado que cualquier otro proyecto cuya eficacia ha sido confirmada y, por último, la realización del proyecto (incluyendo todas las etapas del mismo) puede llevar un año y la inversión final, si se compara al de la ciudad de Bas en Basset, se

puede estimar en 1,700,000 € (aproximadamente 36 millones de pesos mexicanos, sin ayuda por parte de los habitantes, especialmente en mano de obra).

A manera de conclusiones

Puede concluirse de esta contribución que los humedales artificiales representan excelentes soluciones para comunidades pequeñas sin necesidad de tecnologías complicadas ni de electricidad si se canaliza el agua residual de forma inteligente hacia a la zona más baja y allí se instala el sistema.

Por otro lado, permiten que los habitantes de la comunidad aprendan a amar la naturaleza y a cuidar su comunidad para las futuras generaciones.

Finalmente, las autoridades, los expertos y todos y todas en general están compartiendo responsabilidades y comprometiéndose de manera amigable y respetuosa para proteger todo lo que los rodea.

Glosario de términos

Arqueta	Del diminutivo de arca. Casilla o depósito para recibir el agua y distribuirla (diccionario de la lengua española, https://dle.rae.es/arqueta?m=form). En México normalmente se les conoce como registros, atarjeas, tanques sépticos, cárcamos, entre otros, dependiendo de la zona y las costumbres [Nota de los editores]
Atarjea	Del árabe hispánico <i>attāṣyī</i> ¹ y este del árabe clásico <i>taṣyī</i> ¹ , acompañamiento 1.f. Caja de ladrillo con que se visten las cañerías para su protección. 2.f. Conducto o encañado por donde las aguas de la casa van al sumidero. 3.f. Andalucía, Canadá y México. Canal pequeño de mampostería, a nivel del suelo o sobre arcos, que sirve para conducir agua.
Cárcamo	La definición del diccionario de la lengua española no corresponde con lo que se da en México a este término. Por ejemplo, el llamado Cárcamo de Dolores es una obra hidráulica ubicada en la Segunda Sección del Bosque de Chapultepec, de la que destaca el conjunto arquitectónico integrado por el edificio, obra del arquitecto Ricardo Rivas, en su interior el mural -originalmente subacuático- de El agua, origen de la vida del muralista mexicano Diego Rivera, así como la instalación artística Cámara Lambdoma de Ariel Guzik y, en la parte exterior, la Fuente de Tláloc, de Diego Rivera. El edificio se construyó en 1951, para conmemorar el final de las obras del Sistema Lerma. Este sistema sigue abasteciendo a la Ciudad de México de agua potable y pasa por el lugar aunque desviado del propio edificio, como originalmente se concibió. Actualmente es parte del Museo de Historia Natural de la Ciudad de México [Nota de los editores]
INRAE	El Instituto Nacional para la Investigación Agronómica (oficialmente y en francés <i>Institut National de la Recherche Agronomique</i> o INRA) era un organismo con sede en París fundado en 1946 y dedicado a investigaciones agronómicas orientadas. El 1 de enero de 2020 se fusionó con el IRSTEA (<i>Institut National de Recherche en Sciences et Technologies pour L'Environnement et l'Agriculture</i>) o Instituto Nacional de Investigación en Ciencias y Tecnologías para el Ambiente y la Agricultura, para dar lugar al Instituto Nacional de Investigación para la Agricultura, la Alimentación y el Ambiente (<i>Institut National de Recherche pour l'Agriculture, l'Alimentation et l'Environnement</i>).

Referencias bibliográficas

Boutin, C., Esser, D., Molle, P., Lienard, A. 2000. Les filtres et lits plantés de roseaux en traitement d'eaux usées domestiques. Perspectives pour le traitement d'eaux pluviales. Les rendez-vous du

- GRAIE. Le traitement des eaux par macrophytes. Perspectives pour les eaux pluviales, Mar, Le Bourget-du-Lac, France. p. 1 - p. 19. fffhal-00508350f
- Navarro, A., Beisso, F., Bec, J.M., Jaumejoan, T. 2020. Desempeño de humedales construidos de flujo vertical en el tratamiento de aguas residuales municipales. Revista Cubana de Química. 32(3[sept-dic.]): 364-377. e-ISSN: 2224-5421.
- Paing, J., Guilbert, A., Gagnon, V., Chazarenc, F. 2015. Effect of climate, wastewater composition, loading rates, system age and design on performances of French vertical flow constructed wetlands: A survey based on 169 full scale systems. Ecological Engineering. 80: 46-52. doi:10.1016/j.ecoleng.2014.10.029
- Silveira, D.D., Belli-Filho, P., Philippi, L.S., Kim, B., Molle, P. 2015. Influence of partial saturation on total nitrogen removal in a single-stage French constructed wetland treating raw domestic wastewater. Ecological Engineering. 77: 257-264. doi:10.1016/j.ecoleng.2015.01.040
- Trein, C.M., Banc, C., Maciejewski, K., de-Moraes-Motta, A., Gourdon, R., Molle, P., Gautier, M., von Sperling, M. 2020. French vertical flow treatment wetlands in a subtropical climate: Characterization of the organic deposit layer and comparison with systems in France. Science of The Total Environment. 742, 140608. doi:10.1016/j.scitotenv.2020.140608
- Yadav, A., Chazarenc, F., Mutnuri, S. 2018. Development of the "French system" vertical flow constructed wetland to treat raw domestic wastewater in India. Ecological Engineering. 113: 88-93. doi:10.1016/j.ecoleng.2018.01.001

Documentos

1. Humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales domésticas en zona tropical. Guía de dimensionamiento para zonas tropicales. El vínculo para obtener la versión gratuita es: [Guía de dimensionamiento zona tropical](#)
2. Humedales de flujo vertical. Guía de explotación. La versión en francés esta disponible en el sitio del EPNAC <https://www.epnac.fr/>. La versión en español hay que solicitarla por correo electrónico (epnac@inrae.fr) .
3. Depuración de aguas residuales domésticas por medio de humedales plantados de macrofitas. Versión en francés disponible en el sitio del EPNAC (<https://www.epnac.fr/>).

Internet

1. EPNAC: Grupo de trabajo dedicado a la gestión integrada de aguas urbanas de pequeñas y medianas colectividades. Éste sitio está dedicado a los actores que participan en la gestión y tratamiento de aguas urbanas, presenta la bibliografía de referencia producida en Francia en esta área. El vínculo <https://www.epnac.fr/>
2. Una gran cantidad de información sobre el saneamiento colectivo en Francia, con la ficha técnica de cada estación de depuración, la pueden encontrar fácilmente en <https://www.assainissement.developpement-durable.gouv.fr/PortailAC/>
3. Estación de tratamiento de lodos por humedales artificiales de la ciudad de Nègrepelisse . El vínculo es: <https://epuration-negrepelisse.com/fr/>
4. ABT Tratamiento de aguas residuales, es una empresa fundada en 1993. Diseña y comercializa equipos para el tratamiento de aguas residuales urbanas y rurales de pequeñas colectividades. El vínculo es: <https://abt.fr/>
5. Alistep Es un fabricante de materiales para plantas de producción de agua potable y de tratamiento de aguas residuales, tiene mucha información en español y en particular la página dedicada Tanques pendulares es muy interesante. El vínculo es: <http://www.alistep.com/>
6. Syntea es una empresa que se dedica al diseño y construcción de humedales artificiales, en el sitio web tienen mucha información sobre los procedimientos que proponen para el tratamiento de distintos tipos de efluentes, el vínculo es: <https://www.syntea.es/>

7. "Utilización de soluciones basadas en la naturaleza para el tratamiento de aguas residuales y de lodos". Allí se pueden encontrar conferencias de diferentes participantes de Brasil. Como invitado, en español, se tuvo al doctor Pascal Molle que se extiende entre las 10:20 horas hasta las 11:40 horas. El vínculo es: <https://youtu.be/-n4IKuotq8Y>

Anexo: Parte de la sesión virtual traducida al español por los editores¹¹

El doctor Molle fue invitado para dar su opinión con respecto de las dos tecnologías de saneamiento de aguas residuales urbanas que estaban en discusión aclarando que, en realidad, existen muchas más probablemente una cincuentena de tecnologías de tratamiento del agua, cada una con sus ventajas e inconvenientes.

Según el doctor Molle, los elementos a tener en cuenta cuando una colectividad comienza a abordar el tema de la gestión de sus aguas urbanas son varios, dos de ellos son el costo de la inversión y el costo de la explotación durante toda la vida útil de la estación de depuración.

Si se considera la vida útil de una estación de depuración sin incluir la red de saneamiento, se habla de 30 años de vida útil.

En cuanto a la tecnología, esta incide en diferentes factores:

Cuando se eligen tecnologías intensivas, estas van a requerir de competencias de gestión más importantes que se traducen en un costo salarial mayor frente a otro tipo de tecnologías más "naturales" que van a requerir una menor tecnicidad de gestión, por tanto un menor costo salarial.

Las tecnologías intensivas son más "compactas" y por tanto requieren menos superficie de terreno, mientras que las tecnologías extensivas van a requerir más superficie.

Tanto el aspecto económico (inversión y costo de explotación acumulado a lo largo de la vida útil del proyecto) como la superficie de terreno requerido representan los dos criterios de base en la selección de una u otra tecnología.

Teniendo en cuenta que actualmente el sistema de tratamiento de las aguas residuales es por lagunas construidas el tema de la disponibilidad de terreno está resuelto ya que cualquiera de las dos opciones que hoy se encuentran en discusión requieren de menos terreno que el que están ocupando las lagunas.

Otros elementos a considerar son las variaciones de carga que va a recibir la estación de depuración. Éstas pueden ocurrir por afluencia turística estacional o por lluvias intensas que pueden aumentar fuertemente el caudal de agua que llega a través de la red ya que no todas las tecnologías presentan la misma "robustez" o resistencia a la variación de cargas. Esto no quiere decir que no existan soluciones técnicas para atenuar los efectos de una sobrecarga, pero esto siempre va a exigir adaptaciones al proyecto y costos complementarios. Un ejemplo son los estanques para tormentas utilizados en estaciones de depuración por lodos activados en situaciones donde pueden ocurrir fuertes lluvias.

Los lodos activados son la tecnología con la cual se trata la mayor cantidad de aguas residuales urbanas en Francia. Esto no quiere decir que represente el mayor número de instalaciones respecto del parque de saneamiento ya que la mayor parte de estaciones de depuración pertenecen a pequeñas y medianas colectividades.

¹¹ Una disculpa si hubiere errores ya que los editores son hispanohablantes [Nota de los editores]

En lo que se refiere a los humedales artificiales, esta tecnología ha sido desarrollada históricamente para pequeñas colectividades y es económicamente atractiva para capacidades de hasta 5000 equivalentes de habitantes. Desde el punto de vista económico, con 5000 equivalentes de habitantes, en términos de inversión y explotación se está en el límite de las ventajas que presentan los humedales artificiales frente a los lodos activados. Es decir que los lodos activados son económicamente más atractivos, en términos de inversión y explotación, a partir de 5000 equivalentes de habitantes¹².

Ahora bien, en los últimos 10 años en Francia, pero antes a nivel internacional la tecnología de humedales artificiales se ha "intensificado" un poco con el agregado de la ventilación forzada. Al igual que para el caso de los lodos activados se va a introducir aire pero con mucho menos intensidad. La idea ha sido de intensificar un poco la cadena de tratamiento de los humedales artificiales pero sin modificar o disminuir su resistencia a las variaciones de carga que como vimos podían ser debidas tanto a lluvias como al flujo turístico estacional.

Esta nueva tecnología ha tenido por efecto que aquel límite económico donde era ventajoso construir humedales artificiales y que se había estimado en 5000 se desplazara a 7000 equivalentes de habitantes. Es decir, hoy se constata que muchas colectividades de entre 5000 y 7000 habitantes adoptan la tecnología de humedales artificiales equipados de ventilación frente a la opción de lodos activados y sin los riesgos sanitarios que esta tecnología conlleva. Esto es en lo que respecta a los aspectos económicos. En lo que respecta al nivel de tratamiento que la tecnología puede garantizar, hay que tener en cuenta que el constructor por ley tiene que garantizar un determinado nivel de tratamiento. A partir de estudios que se han realizado recientemente y para los parámetros clásicos de materia orgánica, carbono, nitrógeno, fósforo, etc., se **puede afirmar que los humedales artificiales equipados de ventilación son más resistentes a variaciones hídricas, robustos, presentan mayores rendimientos de depuración y son más fiables que las estaciones de tratamiento por lodos activados.**

En particular, respecto del nitrógeno global, que era uno de los puntos delicados de los humedales artificiales, se pueden observar niveles de vertido muy interesantes y, en todo caso, correspondientes a los niveles de vertido exigidos para el caso de la estación de depuración del pueblo de Dieulefit. Respecto de este punto, el estudio realizado por los equipos de Tolosa (Toulouse, Francia) han demostrado que este tipo de tecnología puede perfectamente representar una solución para el caso de Dieulefit construyendo el humedal artificial en el lugar donde se encuentra una de las antiguas lagunas con un interés económico evidente.

El ingeniero Besombes (el otro experto que participa de esta reunión) presentó un caso muy similar de transformación de una laguna de tratamiento en un humedal artificial equipado de ventilación forzada para una capacidad similar a la del pueblo de Dieulefit y que permitirá tener una idea muy aproximada de los costos de inversión.

Por ello, pudo verse que, con respecto de la inversión, esta sería más o menos equivalente en comparación con una estación de depuración por lodos activados. Lo importante es que existe una fuerte diferencia en términos económicos a favor del humedal artificial en lo que se refiere a los costos de explotación¹³. Aquí se encuentra una relación de 10 veces menos.

¹² Esta opción de tratamiento tiene defectos de diseño y seguridad. Hay muchos ejemplos de los problemas por los que estos sistemas ya no son recomendados, especialmente por los aerosoles que llevan microorganismos potencialmente patogénicos. En la Ciudad Universitaria de la Universidad Nacional Autónoma de México, UNAM, fue necesario 'encerrar' el sistema de lodos activados para evitar que sus aerosoles llegaran a las personas que habitaban al lado de los terrenos de la universidad porque padecían de enfermedades gastrointestinales atribuibles a la presencia de la planta de tratamiento de aguas residuales, PTAR, de la UNAM y los aerosoles de este sistema [Nota de los editores]

¹³ En México se conoce a estos costos como de operación [Nota de los editores]

Si se consideran los costos de explotación u operación proyectados para los 30 años de vida útil de la estación de depuración, la diferencia encontrada es enorme. Es por esta razón que el señor alcalde realizó esta convocatoria para comparar las ventajas y desventajas de estas dos tecnologías ya que en el proyecto original no se consideraba otra opción que la de una estación de depuración por lodos activados. Muy probablemente el equipo de ingenieros que realizaron el proyecto de estación de depuración por lodos activados no estaban informados de la existencia de esta tecnología, pero es claro que en esta reunión puede afirmarse que los humedales artificiales con ventilación forzada serían una tecnología que potencialmente representan una solución y que al menos deben ser estudiados y comparados seriamente frente a tecnologías más intensivas.

Presentación del caso de la estación de depuración de Bas en Basset por el experto de saneamiento el señor Laurent Besombes

El señor Besombes se presenta y presenta su experiencia profesional. En lo que se refiere al caso que se discute él ha trabajado en un proyecto de características similares, una laguna de saneamiento que estaba en el fin de su vida útil y que fue sustituida por una estación de depuración equipada de la tecnología de humedales construidos con aireación forzada. El trabajo en la obra tomó 10 meses. La capacidad de esta estación es de 4500 equivalentes de habitantes y se terminó en diciembre de 2019. La particularidad de esta estación es que incluye un módulo para el tratamiento del fósforo exigido por la reglamentación en ese caso específico. Así que, en definitiva, se realizaron dos niveles de humedales, uno para el tratamiento de los parámetros clásicos y el otro para el tratamiento del fósforo. Aquí el autor hace otra pequeña precisión: Al principio del funcionamiento de la estación se debieron realizar ajustes para optimizar el tratamiento que requirieron de competencia técnica pero, después de esta etapa crítica, se puede considerar que la gestión de este tipo de estación es relativamente simple.

Los elementos a destacar de este segundo caso son los siguientes: Es una tecnología relativamente compacta y muy resistente para los golpes hidráulicos. **Otro elemento a destacar es que es una obra relativamente poco compleja a construir lo que permite poder contar con empresas locales. Por último, es importante tener en cuenta que los humedales artificiales se distinguen por la ausencia de olores y de mosquitos a nivel de la estación.**

En particular en lo que respecta a los mosquitos, esta tecnología se basa en el tratamiento aerobio de la materia orgánica. Los tubos descargan el agua residual ligeramente abajo del nivel superficial y, por lo tanto, no genera nunca condiciones de agua estancada que es uno de los elementos principales para el desarrollo de los mosquitos.

El doctor Pascal Molle interviene para advertir que si existieran problemas de olores o de mosquitos hoy, no habrían las más de 5000 estaciones de depuración en Francia equipadas de humedales artificiales. Posteriormente, agregó que el tema de los mosquitos era fundamental al momento de desarrollar o adaptar la tecnología de humedales construidos artificiales al medio tropical, sobre todo por los problemas sanitarios que podrían provocar y nunca se encontraron mosquitos originados en un humedal construido (o artificial). La estación de depuración que presentó el señor Besombes se encuentra en el pueblo de Bas en Basset en el Departamento de Haute-Loire.

Continuando con este ejemplo de una pequeña comunidad interesada en mejorar su calidad de vida se presentan a continuación algunas de **las preguntas del público participante**.

Pregunta número uno: ¿Cuál es el tipo de material impermeabilizante que se utiliza para aislar el humedal del medio circundante y cuál es su vida útil?

Pascal Molle: El tipo de material impermeabilizante que se instala son las llamadas geo-membranas que tienen una vida útil de 60 años¹⁴. Esta vida útil es del doble de lo que se estima debe ser el mínimo de la vida útil del humedal artificial.

Pregunta número dos: ¿Es necesario una separación de las materias fecales y la orina previamente al tratamiento?

Pascal Molle: No, de ninguna manera, esta tecnología ha sido concebida para tratar las aguas residuales urbanas brutas (o crudas, como vienen de las casas e instalaciones sanitarias). Es más, hay que tener bien presente que una de las ventajas que tienen los humedales artificiales es que tratan al mismo tiempo las aguas residuales urbanas y los lodos generados por las mismas. Durante el pasaje de las aguas residuales por el filtro los lodos son retenidos en la superficie del mismo y lentamente mineralizados y estabilizados, como en el caso del compost. Estos lodos acumulados, en Francia metropolitana, se retiran del humedal artificial con una frecuencia de entre 10 a 15 años y pueden ser utilizados directamente en agricultura. En cambio en una estación de depuración por lodos activados estos deben ser retirados regularmente y transportados a una plataforma de tratamiento de lodos. Son dos tecnologías que, en términos de gestión de lodos, no tienen nada que ver: Por un lado, los humedales artificiales producen lodos que van a ser retirados y utilizados directamente en agricultura una vez cada 10 o 15 años y por otro lado, si se considera el caso de la estación de depuración de Dieulefit con un sistema de lodos activados, se estarían retirando cada 15 días lodos que van a terminar siendo dispersados en parcelas agrícolas. Sólo que en períodos de Covid, la reglamentación exige un tratamiento previo de higienización que en el caso de pequeñas y medianas estaciones de depuración se traduce por un tratamiento de cal que cuesta muy caro. Esta situación no concierne los lodos de humedales artificiales. Así que esa gran flexibilidad en la gestión de los lodos que presentan los humedales artificiales explican la adopción generalizada que ha tenido esta tecnología a nivel de colectividades pequeñas y medianas a partir de los años 2000.

Pregunta número tres: ¿Cómo se gestionan las aguas de lluvia en un humedal artificial, cuál es el material que se utiliza para su construcción y como se envía el aire?

El señor Besombes responde a la primer parte de la pregunta explicando la diferencia entre una red unitaria, que conduce tanto aguas pluviales como residuales de una red separada que conduce por un lado las aguas de lluvia y por otro lado las aguas residuales. En el caso de una red unitaria, se instala a la entrada de la estación de depuración una obra que se conoce como vertedero de tormenta y que permite regular el caudal de entrada de agua a la misma. Luego describe con más detalle lo que es un vertedero de tormenta y cómo funciona. En lo que respecta al sustrato utilizado en el relleno del humedal artificial: En ningún caso se trata de tierra, se trata más bien de grava de características muy particulares en términos de calibración, redondeadas, lavadas, de un tamaño de grano preciso.

Hubo hace años incluso hasta patentes para garantizar que el agua realmente inundara todo el humedal¹⁵. En la primera capa se tiene generalmente un tamaño de 2 a 6 milímetros, 6 a 10 mm en la segunda capa que está casi siempre saturada y, por último, en el fondo del filtro se ponen gravas más gruesas ya que es en esta capa donde se realiza el drenaje del mismo. Por supuesto que la recepción de estos materiales es estrictamente controlado tanto por el contratista como por el propietario de la obra. Por último, el aire es enviado al interior del macizo filtrante por medio de motores y bajo presión. Se prevé un número de motores de forma que si alguno deja de funcionar, será sustituido por otro de reemplazo.

¹⁴ Estos materiales poliméricos se emplean para recubrir los sitios que se usarán como depósitos de residuos sólidos urbanos, por lo que son muy resistentes al corte y otros posibles daños [Nota de los editores]

¹⁵ HUMEDALES ARTIFICIALES DE FLUJO HORIZONTAL O VERTICAL, PROCEDIMIENTO PARA TRATAR AGUAS RESIDUALES. Solicitud de Registro: Diciembre 15, 1998. VÍCTOR MANUEL LUNA-PABELLO Y MARÍA DEL CARMEN DURÁN-DOMÍNGUEZ-DE-BAZÚA. Cesión irrestricta de derechos a la UNAM. INSTITUTO MEXICANO DE LA PROPIEDAD INDUSTRIAL. DIRECCIÓN DIVISIONAL DE PATENTES. MÉXICO. Patente Núm. 210924. Otorgada el 21 de octubre de 2002. Terminada a los 20 años y disponible para su uso [Nota de los editores]

El doctor Pascal Molle aporta algunos elementos más respecto de la gestión del agua de lluvia para el caso de la futura estación de Dieulefit: En una estación de depuración por lodos activados se tiene un gran estanque donde se hace circular aire para desarrollar un cultivo de bacterias y otros microorganismos que van a degradar la materia orgánica biodegradable del efluente y, posteriormente, se tiene otro estanque donde se hace la decantación, es decir, separar el agua tratada de los lodos (mezclas de bacterias y otros microorganismos formados). Como este procedimiento trata de la decantación, se está hablando de hidráulica y de tiempo de decantación así que se pueden imaginar que en el caso de una llegada muy importante de agua, esta agua en exceso va a agitar el agua contenida en el estanque, mezclar nuevamente el agua tratada con los lodos y en definitiva provocar una salida masiva del efluente mezclado hacia el medio receptor.

Es por esta razón que en una estación de depuración por lodos activados se permite la entrada de agua hasta un límite que no supera tres veces el caudal por hora recibido en tiempo seco (de secas o estiaje se dice en México). Es por esta razón que es necesaria la gestión del agua de lluvia antes de su entrada a la estación de depuración. Esto se puede realizar tanto por la instalación de un vertedero de tormenta como por la creación de una cadena de tratamientos paralela específica para tratamiento de agua de lluvias que llega en exceso.

En el caso de la tecnología por humedales artificiales se tiene también una masa bacteriana y de otros microorganismos que se desarrolla pegada a las gravas que constituyen el soporte del macizo filtrante y a las raíces de las plantas acuáticas, así que cuando se tiene un golpe hidráulico no se van a "lavar" los lodos o microorganismos presentes en el humedal. Es así que se ha observado que un humedal artificial puede aceptar hasta 15 veces el caudal hidráulico diario para el cual ha sido dimensionado. También se han podido observar situaciones puntuales de golpes hidráulicos muy fuertes, de hasta 50 veces el caudal hidráulico de tiempo seco sin que esto represente problemas para el tratamiento en el humedal. Y esto es una diferencia muy importante entre ambas tecnologías donde se encuentran dos capacidades y riesgos diferentes en términos de vertido y de impacto sobre el ambiente frente a condiciones de lluvias fuertes.

En cuanto al segundo elemento, actualmente ustedes tienen un sistema de depuración por lagunas, una laguna requiere de 11 m^2 para depurar las aguas residuales de un equivalente de habitante. En el caso de un humedal artificial con aireación forzada, esta tecnología requiere de 1 m^2 de humedal por equivalente de habitante es decir que ustedes pueden construir el humedal artificial en el lugar que hoy corresponde a una laguna, en cuanto a las otras lagunas pueden manejar la hipótesis de utilizarlas para recibir el exceso de agua que pueda ser provocado por fuertes lluvias. Como verán entonces, en este caso, si se deciden por la tecnología de humedales artificiales con aireación forzada el tema de instalar un estanque de tormenta ni siquiera se plantea.

Esto no quiere decir que la colectividad no deba tratar el tema de la gestión de las aguas de lluvia, ya sea a través de la creación de redes de colecta lo que representa una inversión importante, ya sea a través de la creación de espacios de infiltración de las aguas de lluvia dentro de la zona urbana de manera de evitar la escorrentía y el hecho de que terminen entrando de una manera o de otra dentro de la red que conduce al estación de depuración.

Siempre es mejor la creación de espacios verdes de infiltración que crear kilómetros de redes de colecta. Es una manera de pensar la ciudad, introduciendo espacios verdes, evitando las islas de calor. Bueno, esto es una reflexión global¹⁶.

¹⁶ Los editores invitan a los(as) lectores(as) a visitar la página-e donde está el libro de 2020 y el de 2022 de dos seminarios académicos auspiciados por el Gobierno de la RFA a través de su DAAD donde la conferencia magistral inaugural presentada por el Prof. Dr. Roland Arno Müller fue publicada como el capítulo 2 en cada uno de ellos sobre las ciudades verdes ejemplificando con una parte de la ciudad de Leipzig. El primero es un artículo publicado en una revista y el segundo es un resumen ejecutivo (<https://www.ambiental.unam.mx> en su parte de cursos y seminarios organizados)

Pregunta número cuatro: ¿Qué ocurre en caso de corte de electricidad en una estación de lodos activados y en una estación por humedales artificiales?

Respuesta del doctor Pascal Molle: Respecto del tema del aporte de aire y las eventuales averías del equipo. Esta última parte Laurent Besombes la ha tratado de manera suficiente, en cuanto al aporte de aire es exactamente igual que para los lodos activados, en este caso se utilizan también equipos para enviar aire por alta presión. Pero detengámonos en la ocurrencia de un corte eléctrico. En el caso de lodos activados es ciertamente un problema, pero en el caso del humedal construido o artificial depende de cómo esté siendo alimentada el agua residual. Si es alimentado por gravedad, el proceso seguirá funcionando, es decir como mínimo el carbono y una parte del nitrógeno serán tratados.

Han habido estudios que han demostrado la resistencia de esta tecnología donde se ha observado que pueden pasar 20 horas sin aporte de aire sin afectar el tratamiento del nitrógeno y que el tratamiento del carbono se realiza muy bien y que al momento de la puesta en marcha de la ventilación en un período de 5 a 10 horas se encuentran nuevamente los rendimientos esperados. Ahora bien, en vuestro caso, la alimentación del humedal seguramente será realizada por medio de bombas. Aquí estamos en una situación comparable a la tecnología por lodos activados es donde se tendrá un problema y habrá que tomar las precauciones necesarias para la corrección de la situación.

Pregunta número cinco: ¿Se puede establecer una comparación entre la estación de depuración de Bas en Basset con una capacidad de tratamiento de 4500 equivalentes de habitantes y la de Dieulefit con una capacidad de tratamiento de 5600 equivalentes de habitantes?

Respuesta del doctor Pascal Molle: Si se habla de costo de inversión con referencia al costo de inversión por habitante o equivalente de habitante, aquí se observa que cuanto menor es la capacidad de la estación de depuración mayor es el costo por habitante.

Esto se puede traducir en una gráfica donde se va a observar que a medida que se aumentamos la capacidad de la estación de tratamiento, el costo unitario por habitante disminuye hasta un punto donde la curva se estabiliza.

Es por esta razón que tomar como referencia el costo de una estación de depuración de 500 habitantes y extrapolarlo al costo de inversión de una estación de depuración para 5000 habitantes no tiene sentido.

Cuando se toma el costo unitario de inversión para una estación de depuración con capacidad de tratamiento de 4500 habitantes ya se está en esa zona de la gráfica estable y si se hace una extrapolación para el costo de una estación de depuración de 5600 habitantes el margen de error es mucho menor.

Es por esta razón que la comparación propuesta entre los costos de inversión de ambas estaciones de depuración resulta razonable. Por supuesto que después hay que afinar un poco más en función del tipo de terreno. En este ejemplo, en ambos casos se va a construir un humedal en el lugar donde antes existía una laguna así que se piensa que la comparación es pertinente.

Pregunta número seis: ¿Los humedales artificiales son una tecnología experimental o se dispone de experiencia?

Respuesta del doctor Pascal Molle: La tecnología de humedales artificiales ha sido desarrollada, a nivel internacional desde los años 70 del siglo veinte, así que respecto de la tecnología de lodos activados es, entre comillas, más joven lo que no significa tampoco que sea una tecnología reciente.

En Francia, esta tecnología fue desarrollada en los años 80 tanto a nivel de investigación como de aplicación. Así que la estación de tratamiento por humedales artificiales más vieja que se tiene en Francia tiene 40 años y sigue funcionando muy bien.

Hasta ahora estamos hablando de la tecnología de tratamiento por humedales artificiales clásica, en lo que respecta a la tecnología de tratamiento por humedales artificiales con aireación forzada, esta comienza a nivel internacional a principios de los años 2000 donde fue concebida para efluentes industriales, ya sea para la industria química, agroalimentaria o para el caso de los aeropuertos donde la contaminación química es muy importante.

La idea era de potenciar el tratamiento para poder tratar cargas más fuertes o moléculas más complejas. Posteriormente, esta tecnología fue utilizada hace unos 15 años para el tratamiento de efluentes domésticos, teniendo en cuenta que son más fáciles de tratar. En Francia su desarrollo comienza hace unos 10 años a nivel de la investigación y a nivel de la aplicación, el humedal artificial de aireación forzada más viejo debe ser de los años 2014 o 2015.

Hay que tener en cuenta que tampoco hemos inventado la pólvora, esto se apoya en toda la investigación y experiencia obtenida de la tecnología de humedales artificiales de tipo clásico. En todo caso lo que es indiscutible es que no estamos de ninguna manera en una etapa experimental.

Para terminar este anexo, si el(a) lector(a) desea conocer las preguntas restantes de la sesión virtual puede acceder a la versión en francés o consultar a los editores por vía electrónica, aunque la respuesta condensada de ellas está en la primera parte de esta contribución.