



HAL
open science

Humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales domésticas en zona tropical

Rémi Lombard-Latune, Pascal Molle

► **To cite this version:**

Rémi Lombard-Latune, Pascal Molle. Humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales domésticas en zona tropical. [reportType_6] Agence française pour la Biodiversité. 2017. hal-03242968

HAL Id: hal-03242968

<https://hal.science/hal-03242968v1>

Submitted on 31 May 2021

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales domésticas en zona tropical

Guía de dimensionamiento para zonas tropicales



Destinada a los directores de proyecto y a los adjudicadores, esta guía ha sido diseñada como una herramienta de apoyo para el diseño y la realización de un proyecto de tratamiento de aguas residuales mediante humedales artificiales (HA). Los Departamentos de Ultramar (DFU) enfrentan desafíos de saneamiento particularmente sensibles y una de las mayores problemáticas proviene de la mala adecuación de las tecnologías al contexto particular de los trópicos. Las recomendaciones aquí presentadas, diseñadas en el marco de investigaciones realizadas en departamentos franceses de ultramar, pueden ser utilizadas en el conjunto de la zona tropical.

Esta guía de dimensionamiento de los humedales artificiales en zona tropical recapitula diez años de investigaciones realizadas en los cinco DFU y que buscan adaptar una tecnología largo tiempo ensayada en clima templado. La enseñanza que se desprende se basa en seguimientos cuidadosos y también en un estudio específico sobre la elección de los vegetales.

Estas investigaciones han permitido construir y validar reglas de dimensionamiento adaptadas al contexto tropical con un objetivo de compacidad, garantizando al mismo tiempo el equilibrio entre eficacia y solidez de esta alternativa de tratamiento. Los trabajos se han focalizado en los filtros plantados de flujo vertical. Alimentados con aguas residuales brutas, aportan una solución pertinente al problema de gestión de los lodos, punto sensible en el contexto insular. Se ha prestado especial atención a la consideración de los períodos lluviosos, una de las debilidades de los procedimientos convencionales en el contexto tropical. Los seguimientos han puesto en evidencia la confiabilidad de los HA en relación con las exigencias reglamentarias e incluso más allá: tratamiento mejorado del carbono, nitrificación total y factor de reducción de 70% para el nitrógeno total.

La compacidad del sistema tropical permite a la vez competir con los procedimientos convencionales cuando el terreno disponible es limitado, y también ser competitivo en el caso de centros urbanos de tamaño medio.

Después de una descripción de los procesos que participan en esas obras y de los rendimientos de los diferentes procedimientos estudiados, en esta guía se presentan diferentes aspectos que deben tomarse en consideración al elaborar un proyecto de saneamiento. Es así como incluye:

- las características de las aguas residuales de las pequeñas comunidades de los DFU;
- una recapitulación de las reglas para determinar el nivel de vertido;
- las decisiones tecnológicas considerando las limitaciones locales, y las eventuales fases por realizar;
- las reglas precisas de dimensionamiento y de diseño de las obras;
- las diferentes especies vegetales que pueden ser utilizadas;
- el detalle de las tareas de explotación y de vigilancia por realizar para una gestión óptima de las obras.

Humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales domésticas en zona tropical

Guía de dimensionamiento para zonas tropicales



Autores

Rémi LOMBARD LATUNE: ingeniero investigador (Irstea, Epure—Lyon), remi.lombard-latune@irstea.fr

Pascal MOLLE: director de investigaciones en tecnologías de tratamiento de aguas residuales de comunidades pequeñas y medianas (Irstea, REVERSAAL Lyon), pascal.molle@irstea.fr

Traducción

Laura Delgado-González

Agradecimientos

Los autores agradecen por su amable contribución a las personas que siguen.

■ Por la evaluación y seguimiento de los diferentes sistemas de tratamiento en los DFU:

Hugues DELANNAY (Office de l'eau Guadalupe), Nicolas FINA (COTRAM Assainissement), Sarah GOBERT (Office de l'eau Guadalupe), Bruno GREZILLER (DEAL Mayotte), Gérald LACOMBE (Étiage Guyane), Olivier LAPORTE-DAUBE (Étiage Guyane), Frédéric L'ETANG (SICSM—Espace Sud), Andinani M'GUEREZA (SIEAM), Lucas PELUS (Office de l'eau Martinica), Christophe RIEGEL (SIEAM), Leslie VEREPLA (CANGT).

■ Por transmitir la experiencia adquirida durante las fases de construcción:

Antoine BAJEUX (Mayotte Bureau d'Études), Nicolas FINA y Patrick LANES (COTRAM Assainissement), Gérald LACOMBE (Étiage Guyane), Julien PHILIPPE (ETG 976).

■ Por sus relecturas y contribuciones a la guía:

Véronique BARRE, Claire LEVAL y Béatrice GENTIL-SALASC (Agence française pour la biodiversité), Nicolas FINA (COTRAM Assainissement), Laurence HAMONT (CANGT), Gérald LACOMBE (Étiage Guyane), Frédéric L'ETANG (SICSM—Espace Sud), Lucas PELUS (Office de l'eau Martinica).

Los autores quieren también agradecer a la Agencia Francesa de la Biodiversidad por el apoyo financiero y la edición de esta guía, así como a Béatrice SAUREL por el diseño gráfico y la composición.

Rémi LOMBARD LATUNE

Pascal MOLLE

Introducción

Esta guía tiene como objetivo presentar los humedales artificiales (HA) adaptados a la zona tropical. Las reglas de dimensionamiento fueron establecidas y validadas a partir del seguimiento de los rendimientos de siete estaciones de tamaño real, especialmente equipadas para el seguimiento científico y presentes en cuatro Departamentos Franceses de Ultramar (DFU): Guadalupe, Guyana, Martinica y Mayotte. Se realizaron casi un centenar de balances de materia durante un periodo de 24 horas durante más de una década, en el ámbito de proyectos de investigación. Estos han permitido validar las decisiones técnicas que aquí se presentan.

En esta guía, no se presentan todas las posibles configuraciones de HA, sino únicamente aquellos procesos que parecen particularmente adaptados para el tratamiento de aguas residuales domésticas en los DFU y en el medio tropical. Dado que la "tropicalización" de los filtros es relativamente reciente (máximo una década), las prescripciones y recomendaciones pueden evolucionar con los avances técnicos, la experiencia adquirida y las investigaciones realizadas sobre estas tecnologías en zona tropical.

Esta guía ha sido concebida como una herramienta de acompañamiento para el diseño de los HA en zonas tropicales y ecuatoriales, y está destinada a los constructores y directores de proyecto. Los aspectos vinculados con la explotación son objeto de una parte sucinta de la presente guía, y de las fichas técnicas adjuntas. El problema del costo de las obras es delicado, dado que está necesariamente vinculado con las especificidades de cada uno de los DFU, con las decisiones técnicas y con el desarrollo de estos procesos alternativos. En consecuencia, en esta guía no se abordan los costes asociados a la obra, pero se proporcionan algunos elementos y fichas complementarias que pueden solicitarse y presentarse a través del sitio web del grupo de trabajo "Evaluación de nuevos procedimientos de saneamiento para comunidades pequeñas y medianas, Epnac" (www.epnac.irstea.fr/DOM/). Por lo demás, esta guía no constituye una norma que estandarice el diseño de la tecnología: recurrir a los ingenieros de diseño o constructores especializados en estas técnicas de tratamiento seguirá siendo indispensable para una óptima adaptación a cada contexto.

FPR y HA

En Francia Metropolitana se habla de FPR, filtros plantados con carrizos (roseaux en francés), porque la planta utilizada es el carrizo común (*Phragmites australis*).

En la zona tropical, *Phragmites australis* es considerada una especie invasiva. Se utilizan por ello otras plantas (parte 4 p. 46) y la tecnología adopta el nombre de HA (humedales artificiales).

Esta guía contiene cinco capítulos.

- 1 En el capítulo "Principios de funcionamiento de los HA" se presentan las generalidades sobre los filtros, detallando los procesos depurativos que se producen en los HA, así como el papel de los vegetales y la gestión de los lodos en este tipo de obras. Se exponen las diferentes variantes de la tecnología HA, y a continuación los rendimientos de los diferentes procesos presentes en la zona tropical.
- 2 Las tareas a realizar para el "Diseño de un sistema de saneamiento mediante HA" se presentan en el segundo capítulo. Se hace mención a los textos reglamentarios en vigor que permiten definir los valores límites de emisión de contaminantes. En función de éstos últimos, un cuadro de síntesis permitirá seleccionar el proceso alternativo mejor adaptado. Por último, frente a la constatación unánime del sobredimensionamiento de las obras en todos los DFU, se proponen algunos puntos claves para la evaluación de las cargas a tratar.
- 3 El tercer capítulo, expone las "Reglas de dimensionamiento" que presiden la definición de las características de los sistemas. Además, se detallan los requerimientos para la estanqueidad de la obra y la composición de los lechos filtrantes.
- 4 La pregunta "¿Qué plantas son las adecuadas para los HA en zona tropical?" encontrará su respuesta en el cuarto capítulo de este documento, donde se presenta la gestión realizada y los resultados alcanzados en un estudio específico sobre el tema.
- 5 El último capítulo describe la "Implementación y gestión del sistema". Se recoge información sobre la experiencia adquirida por los constructores, y también las diferentes fases observadas en la vida de un filtro. Como complemento de la guía de explotación de los HA publicada por el grupo de trabajo Epnac en 2015, se abordarán aquí algunos puntos acerca de la gestión de la planta relacionados con las limitaciones características de la zona tropical. Por último, se recuerdan algunos puntos claves de las tareas de seguimiento y control reglamentario.

Para permitir diferentes niveles de lectura en función de los conocimientos del lector, los recuadros de color verde definen o aportan precisiones sobre conceptos claves.

Ocasionalmente, pueden aparecer párrafos en un recuadro marrón que abordan conocimientos más avanzados en este ámbito, con la indicación "Para mayor detalle".

Con el fin de concentrarse en lo esencial, los datos o las informaciones importantes son resaltados en negrita.

Por último, se coloca un asterisco (*) la primera vez que se menciona una palabra que se explica en el glosario incluido al final de la guía.



Resumen y palabras claves



Los Departamentos de Ultramar presentan desafíos de saneamiento particularmente sensibles. Uno de los mayores problemas proviene de la inadecuada aplicación de las tecnologías y de su adaptación al contexto particular de los DFU.

Con el fin de mejorar el saneamiento en pequeñas y medianas comunidades de los DFU, la Onema y la Agencia Francesa de la Biodiversidad (AFB) han apoyado un trabajo acerca de la adaptación de los procesos alternativos de tratamiento fiables y adecuados al contexto tropical. Esta guía de dimensionamiento de los humedales artificiales (HA) en zona tropical, recapitula la situación tras diez años de investigaciones realizadas en los cinco DFU, destinadas a adaptar una tecnología ampliamente evaluada ya en climas templados.

Los HA constituyen una familia de procesos relativamente variada en función de los tipos de flujo, los niveles de saturación, etc., y de su asociación entre ellos o con procedimientos convencionales, todo lo cual lleva a una multitud de posibles alternativas de tratamiento. El objetivo de los trabajos realizados consistió en adaptar un determinado número de procesos con el fin de responder a diferentes niveles de tratamiento, buscando al mismo tiempo la compacidad de la planta sin afectar la fiabilidad y la robustez del tratamiento.

Los sistemas más implementados son los filtros de flujo vertical alimentados con aguas residuales brutas para facilitar la gestión de los lodos. Los HA de flujo vertical son lechos de gravilla calibrada, aislados del suelo, atravesados por una red de aireación y drenaje y sobre los cuales se plantan los vegetales. Son sistemas de tratamiento en los cuales interactúan varios procesos (filtración, actividad biológica, flujos, transferencia de gases, actividad vegetal, etc.) y en los que la durabilidad de su funcionamiento reposa sobre el establecimiento de unas condiciones de equilibrio. Para ello tanto el diseño como la gestión deben realizarse con conocimiento de causa.

Una de las particularidades de la adaptación de los HA al clima tropical, es la reducción de la superficie del suelo ocupada por los filtros. En efecto, las temperaturas altas y regulares del clima tropical permiten aplicar períodos de reposo de igual duración que los períodos de alimentación, garantizando al mismo tiempo una buena mineralización de los lodos. Esto permite colocar únicamente dos filtros en paralelo disminuyendo así el espacio ocupado por el sistema con respecto al espacio necesario en Francia Metropolitana.

Del mismo modo, los esfuerzos tecnológicos se han orientado a desarrollar sistemas innovadores que permitan trabajar con una sola etapa de tratamiento y respetando los valores límite de emisión de contaminantes. Si bien el dimensionamiento de los HA se realiza en base a la carga (orgánica e hidráulica) aceptable en el filtro en funcionamiento, los órdenes de magnitud de la superficie del filtro por habitante-equivalente requerida, son conocidos. Ésta varía entre 0,8m²/HE y 1,6m²/HE, de acuerdo con los requisitos de vertido. La configuración más simple garantiza rendimientos superiores al mínimo reglamentario (75%, 80%, 80% y 60% de factor de reducción, respectivamente, para DQO, DBO₅,

SST y NTK, con concentraciones de salida inferiores a 125 mg DQO/L). En función de las necesidades y de las limitaciones, los HA pueden ser adaptados para garantizar un tratamiento del carbono superior a 95%, una nitrificación total o un tratamiento del nitrógeno total del 70%. Estos dimensionamientos permiten mantener una fuerte aceptación de las sobrecargas hidráulicas en temporada de lluvias, sin comprometer la confiabilidad del sistema.

Las plantas ejercen una acción mecánica indispensable para el funcionamiento de los HA. La *Phragmites australis* se utiliza tanto en Francia Metropolitana como en el extranjero. Sin embargo, esta especie no se encuentra presente de forma natural en la zona tropical, donde representaría un gran riesgo de invasión de la flora local, por lo que debe ser sustituida por otra especie apropiada para la zona tropical. Un centenar de especies fueron evaluadas con este propósito gracias a un estudio desarrollado en tres etapas: bibliografía, ensayos pilotos y comportamiento a gran escala. *Heliconia psittacorum*, o ave del paraíso, ha mostrado ser la especie más interesante, si bien se han propuesto otras soluciones para adaptarse a las exigencias de cada proyecto.

Una de las claves del éxito de los humedales en Francia Metropolitana radica en la simplicidad de la explotación de las plantas. Con poco o incluso sin material electromecánico y, por lo tanto, sin electricidad si la topografía lo permite, las tareas de explotación son simples y los riesgos de fallas escasos. Las tareas de mantenimiento de los vegetales son, sin embargo, más exigentes en zona tropical y constituyen la principal ocupación del operador de la planta.

La compacidad del sistema tropical no sólo permite competir con los procedimientos convencionales cuando el suelo disponible es limitado; sino que permite también ser competitivo por encima de la capacidad económica límite definida en Francia Metropolitana (5 000 HE). El abanico de posibilidades para el uso de los HA es amplio, desde instalaciones semi-colectivas para parcelas o aldeas aisladas, hasta aglomeraciones urbanas de tamaño medio.

Las recomendaciones de esta guía, elaborada con base en investigaciones realizadas en los DFU pueden aplicarse por extensión a toda la zona tropical.

Además de describir los procesos que actúan en estos sistemas y los rendimientos de los diferentes procedimientos estudiados, esta guía presenta diversos aspectos que deben tomarse en consideración al elaborar un proyecto de saneamiento. Así, se presentan:

- las características de las aguas residuales de pequeñas comunidades de los DFU y la relación entre habitante y habitante-equivalente;
- una recapitulación de las reglas para determinar los requisitos de vertido;
- las alternativas tecnológicas disponibles en función de las limitaciones locales y de las posibles fases de construcción;
- las reglas precisas de dimensionamiento y de diseño de la planta;
- las diferentes especies vegetales que pueden utilizarse;
- las tareas de explotación y vigilancia a realizar para una gestión óptima de la planta.

Palabras claves: saneamiento, pequeñas comunidades, gestión de lodos, zona tropical, humedales artificiales.

Índice

8	Introducción	
10	1. Principios de funcionamiento de los HA	
	1.1 Filtro de flujo vertical insaturado	
	1.2 Diferentes configuraciones del sistema tropical	
	Recirculación	
	Filtro vertical insaturado/saturado	
	Segunda etapa de tratamiento	
17	1.3 Procesos depuratorios y control del sistema	
	Retención física y gestión de los lodos	
	Tratamiento biológico y aireación	
	Tratamiento del nitrógeno, filtración y espesor del lecho filtrante	
19	1.4 Papel de los vegetales	
19	1.5 Rendimientos depurativos de los HA en zona tropical	
	Características de las aguas residuales domésticas en los DFU; consideración del impacto de los episodios de lluvia.	
	Rendimientos de los diferentes sistemas de humedales artificiales en clima tropical	
	Rendimientos de los HA a la escala del proceso global	
28	2. Diseño: objetivos de tratamiento, cargas a tratar y estrategia	
28	2.1 Requisitos del vertido	
	Exigencias reglamentarias	
	El medio receptor	
29	2.2 Elección del sistema a implementar	
31	2.3 Estimación de las cargas a tratar	
	Definición del HE tropical	
	Coefficientes de corrección para el dimensionamiento del sistema	
	Fases temporales de los proyectos	
36	3. Reglas de dimensionamiento y materiales	
36	3.1 Protección de las instalaciones	
37	3.2 Dimensionamiento de los filtros	
	Factores de dimensionamiento	
	Tipo de construcción	
	Altura de resguardo	
39	3.3 Unidades del sistema y red de alimentación	
	Características de la alimentación en discontinuo	
	Alimentación por gravedad	
	Alimentación mediante estación de bombeo	
	Red de alimentación	
41	3.4 Red de aireación-drenaje	
42	3.5 Estanqueidad y materiales	
	Estanqueidad artificial, natural e infiltración	
	Materiales de relleno de los filtros	
43	3.6 Dimensionamiento de los filtros horizontales	
	Hidráulica	
	Degradación de los contaminantes	
46	4. Qué plantas utilizar en los HA de la zona tropical ?	
47	4.1 Resultados del estudio	
	Las Zingiberales	
	Las Ciperáceas	
	Las Poáceas	
50	4.2 Herbario para los HA en los DFU	
52	5. Implementación y gestión del sistema	
52	5.1 Implementación de los HA	
	Experiencia adquirida en la construcción	
	Lista de los documentos que deben aportarse y las pruebas que debe realizar el constructor	
	Incidentes importantes con impacto sobre las estaciones	
55	5.2 Diferentes fases de operación de los filtros	
	Plantación de los vegetales y fase de puesta en marcha de los HA	
	Funcionamiento normal	
	Funcionamiento degradado	
	Extracción de los lodos	
	Colmatación irreversible	
57	5.3 Gestión de las obras en la zona tropical	
	Tropicalización de las instalaciones	
	Mantenimiento de los vegetales	
	Síntesis de las tareas a realizar	
	Resultados de la experiencia en Guyana	
60	5.4 Seguimiento reglamentario	
	Producción de documentos	
	Metrología y realización de las mediciones de control y seguimiento	
64	6. Conclusión	
66	7. Glosario	
67	8. Siglas y abreviaciones	
68	9. Lista de figuras, cuadros y cuadros	
70	10. Bibliografía	

Introducción

El sistema francés de HA plantados con carrizos (FPR, por sus siglas en francés) ha sido desarrollado por el Instituto Nacional de Investigación en Ciencias y Tecnologías para el Medio Ambiente y la Agricultura (Irstea¹) desde los años 80. Dentro de la familia de los *constructed wetland* de la cual forman parte, los FPR presentan la particularidad de que son alimentados con aguas brutas, lo que permite el tratamiento conjunto de las aguas y los lodos en un mismo sistema. Actualmente, este sistema es el preferido por las pequeñas comunidades: se estima que el 80% de las estaciones de menos de 2 000 habitantes-equivalentes (HE) construidas cada año en Francia son FPR.

Los trabajos realizados por Irstea en la zona tropical se iniciaron en 2005 en asociación con el Sindicato Intercomunal de Agua y Saneamiento de Mayotte (SIEAM, por sus siglas en francés). Los dos primeros HA en zona tropical entraron en servicio en Mayotte en 2006 (Hachenoua: 110 HE, y Totorossa: 145 HE).

En 2010, la Oficina Nacional del Agua y de Medios Acuáticos (Onema, que en 2017 pasó a ser la Agencia Francesa de la Biodiversidad, AFB) solicitó a Irstea trabajar en el desarrollo de alternativas de tratamiento de aguas adaptadas a las pequeñas comunidades de ultramar. Un diagnóstico de la situación en los diferentes departamentos muestra que la tecnología que responde mejor a los desafíos de los DFU es la de los FPR (Eme, 2012).

Gracias a un trabajo conjunto con técnicos locales, se crearon varias estaciones en Guyana (Bois d'Opale 1 [300 HE] en 2010 y Bois d'Opale 2 [480 HE] en 2012), Martinica (Mansarde Rancée [1000 HE] en 2013 y Taupinière [900 HE] en 2014), Guadalupe (Les Mangles [120 HE] en 2015), Mayotte (Champ d'Ylang 2 [180 HE] en 2015) y en La Reunión (Salazie [90 HE] en 2017).

El proyecto Attentive (Saneamiento de aguas residuales adaptado al contexto tropical mediante el tratamiento extensivo utilizando vegetales), que se focaliza en las Antillas, recibió en octubre de 2014 de manos de la Ministra de Ecología, Desarrollo Sostenible y Energía, el premio de ingeniería ecológica en la categoría "Gestión alternativa de aguas residuales y pluviales".

Este reconocimiento nacional de los HA en zona tropical facilitó su aceptación por parte del ejecutivo local. En la figura 1A se muestra que en Francia Metropolitana fue necesario esperar cerca de 15 años para que el número de filtros plantados se multiplicara. De forma similar ha sucedido en Mayotte donde, después de 8-10 años, el sistema parece haber ganado la confianza de las constructoras (Figura 1B). El esquema rector de saneamiento de Mayotte de 2015 incluye los HA como el sistema más representado en número de estaciones en el futuro parque de la isla.

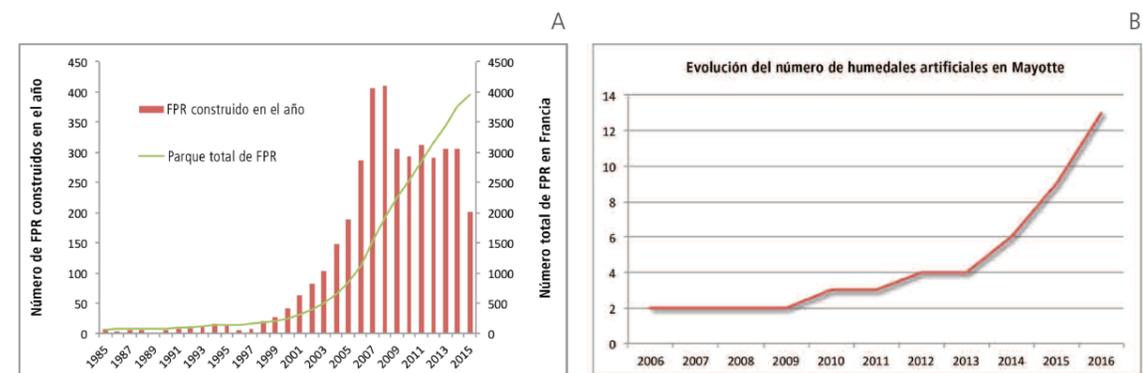
En Guyana han sido construidos seis HA desde 2010, y la Comunidad de Comunas del Centre Litoral convocó en 2017 a una licitación de obra para un filtro de 3 000 HE. El hecho de que se haya solicitado una planta de HA con tal capacidad de tratamiento, demuestra un gran aumento del interés de la comunidad a lo largo de estos últimos 10 años gracias a los positivos resultados de este sistema.

Habitante-equivalente (HE)

El HE es la unidad de medida que permite evaluar la capacidad de una estación de depuración. Se basa en la cantidad de contaminantes emitidos por una persona en un día. La directiva europea del 21 de mayo de 1991 define el HE como "la carga orgánica biodegradable que tiene a los 5 días una demanda bioquímica de oxígeno (DBO5) de 60 gramos de oxígeno al día".

La cantidad real emitida por una persona cambia en función del contexto (parte 2.3.1 p. 32).

¹ - En esos años Cemagref, Centro Nacional de Mecanización Agrícola, Ingeniería Rural y de Aguas y Bosques, que pasó a ser Irstea en 2011.



Los HA son de gran interés para la zona tropical y aportan garantías a la Autoridad Contratante:

- **proceso robusto**, con respecto a la capacidad para mantener una calidad de tratamiento elevada (parte 1.5 p. 19), incluso en presencia de importantes variaciones de cargas orgánicas e hidráulicas;
- **simplicidad de explotación**, ya que el mantenimiento de este tipo de estación no requiere conocimientos técnicos particulares y exige poco tiempo (aproximadamente 300 horas de trabajo por año para una estación de 1 000 HE; parte 5.3 p. 57);
- **utilización de materiales locales** para la construcción, dado que el soporte para el desarrollo de la biomasa es gravilla y que son necesarios pocos equipos electromecánicos (exógenos) en comparación con otras tecnologías;
- **fácil gestión de los subproductos**, ya que los filtros son alimentados con las aguas residuales brutas y el tratamiento de lodos se realiza en la superficie del filtro (parte 1.3 p. 17). En Francia Metropolitana, los lodos deben ser retirados cada 10-15 años y pueden ser valorizados directamente en agricultura;
- **sobriedad**, ya que no utiliza productos químicos y puede incluso prescindir de electricidad cuando la topografía del sitio lo permite (flujo por gravedad; parte 3.3 p. 39);
- **aceptación de grandes cargas hidráulicas características de la temporada de lluvias lo cual es posible** cuando se trata de una red de saneamiento unitaria. Se han enviado ocasionalmente láminas de agua de más de 5 m sobre los filtros, esto es, ¡15 veces la carga nominal! (Arias López, 2013);
- **Compacidad relativa del sistema** (0,8 a 1 m²/HE) en relación con otros sistemas extensivos (lagunaje natural: 5 a 6 m²/HE en clima tropical) o incluso en relación con el sistema clásico utilizado en Francia Metropolitana (2 a 2,5 m²/HE);
- **división de los proyectos en fases temporales** (parte 2.3.3 p. 33 y Figura 17 p. 34). Los filtros son divididos en lechos que pueden ser construidos o puestos en servicio a medida que evolucionan las necesidades. Esto resulta particularmente interesante en los DFU, donde el crecimiento demográfico es importante y donde las inversiones se hacen a largo plazo.

Principios de funcionamiento de los HA

En esta primera parte se presentan las generalidades acerca del proceso HA adaptado al clima tropical y sus diferentes variantes. Se describen los procesos depurativos de las diferentes etapas del tratamiento. Se presenta una síntesis del conjunto de seguimientos realizados ilustrando los rendimientos de depuración del sistema. Por último, se aborda el problema de los lodos y su gestión.

Este tipo de sistemas se denominan a menudo de "fitodepuración" ya que utilizan vegetales para el tratamiento de la contaminación. Sin embargo, el papel de los vegetales (Epnac, 2014) en la depuración del agua es insignificante comparado con la acción de las bacterias.

1.1. Filtro de flujo vertical insaturado

Los humedales artificiales se inspiran de la capacidad natural de depuración de los ecosistemas de zonas húmedas (humedales naturales). Iniciada en Alemania entre 1960-1980, la investigación acerca de estos sistemas de tratamiento extensivos por cultivo fijo sobre soporte fino, se extendió en el continente norteamericano y en el norte de Europa (Dinamarca, Reino Unido) en la década de los 70. En 1980, Irstea (en esa época Cemagref) inicia un estudio experimental para establecer las reglas de dimensionamiento de lo que se convertirá en el bien conocido sistema francés. Su originalidad estriba en el tratamiento conjunto de las aguas residuales y los lodos en un mismo sistema, de flujo vertical, aeróbico y que produce un depósito orgánico estable que puede ser valorizado en la agricultura.

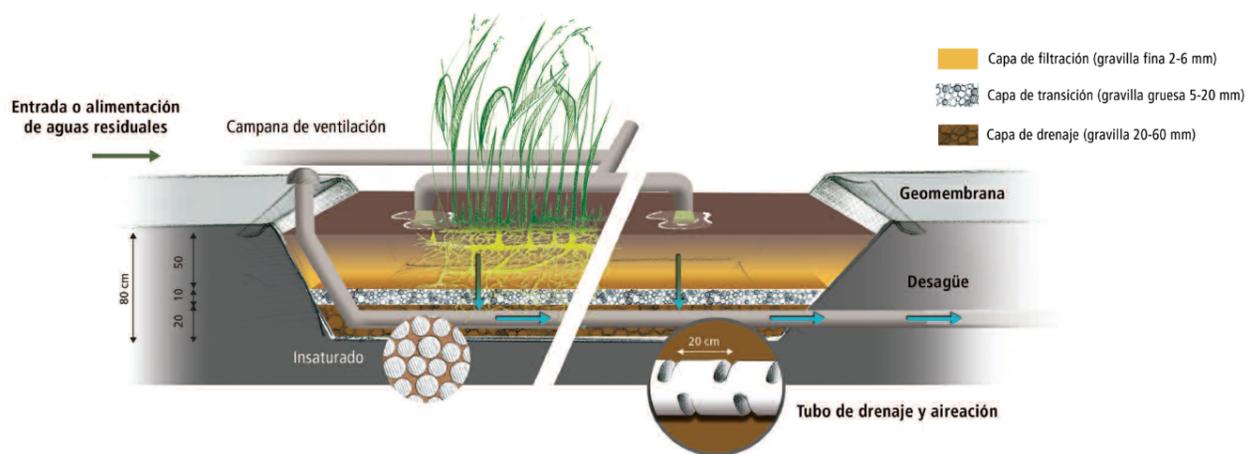


Figura 2. Corte transversal esquemático de un filtro plantado con vegetales (HA) de flujo vertical (Dibujo Saurel para AFB).

Un HA de flujo vertical es un lecho de gravilla aislado artificialmente del suelo, atravesado por una red de aireación-drenaje y sobre el cual se plantan vegetales (Figura 2). Las aguas residuales brutas son alimentadas en discontinuo* (en *batch*) sobre la superficie del filtro (*el volumen alimentado equivale al de una lámina de agua de 2,5 cm repartida sobre toda la superficie del filtro). El agua percola a través del lecho filtrante y es recogida por el sistema de drenaje.

Los sólidos en suspensión (SS) contenidos en el efluente son filtrados por la capa de gravilla más fina y retenidos en la superficie del filtro. Ésta se acumula formando una capa de depósito que refuerza la capacidad de retención física del filtro. Se trata de una capa biológicamente muy activa, que se mineraliza rápidamente.

Los sólidos disueltos son degradados por la biomasa bacteriana que se desarrolla sobre la gravilla que compone el lecho filtrante y sobre el depósito orgánico. El sistema ha sido diseñado para garantizar una buena oxigenación del lecho, favoreciendo así el desarrollo de las bacterias con metabolismo aeróbico. Las plantas presentes en la superficie del filtro facilitan mecánicamente la oxigenación del filtro. El movimiento de los tallos generado por la acción del viento abre anillos en la capa de lodos acumulados en la superficie del filtro (Figura 3). Estos anillos evitan que la superficie del sistema se colmate, facilitando así la infiltración de las aguas residuales y el intercambio de gases.



Figura 3. Ilustración del papel mecánico de los vegetales en los lechos de secado de lodos plantados con carrizos.

La biomasa bacteriana utiliza para su metabolismo el oxígeno del aire presente en el lecho y la materia orgánica disuelta. El desafío en la gestión de los filtros para garantizar la perennidad de la estación, consiste en controlar este crecimiento bacteriano, que tenderá naturalmente a ocupar la porosidad del lecho hasta colmatar el sistema. En ese caso, las aguas residuales ya no podrían infiltrarse y no se produciría el intercambio de gases. Por esta razón los filtros verticales son alimentados en alternancia. El sistema tropical* incluye dos filtros que son alimentados por turnos durante 3,5 días (Figura 4) distinguiéndose, por lo tanto, una fase de alimentación del filtro y una fase de reposo. Durante esta última, en ausencia de aguas residuales, la población bacteriana se autorregulará, controlando, así, la biomasa producida.

*Nota: en el texto se habla de sistema tropical para hacer referencia a los humedales artificiales que incluyen elementos de adaptación al clima tropical, ya sea a nivel de diseño como de gestión del proceso.

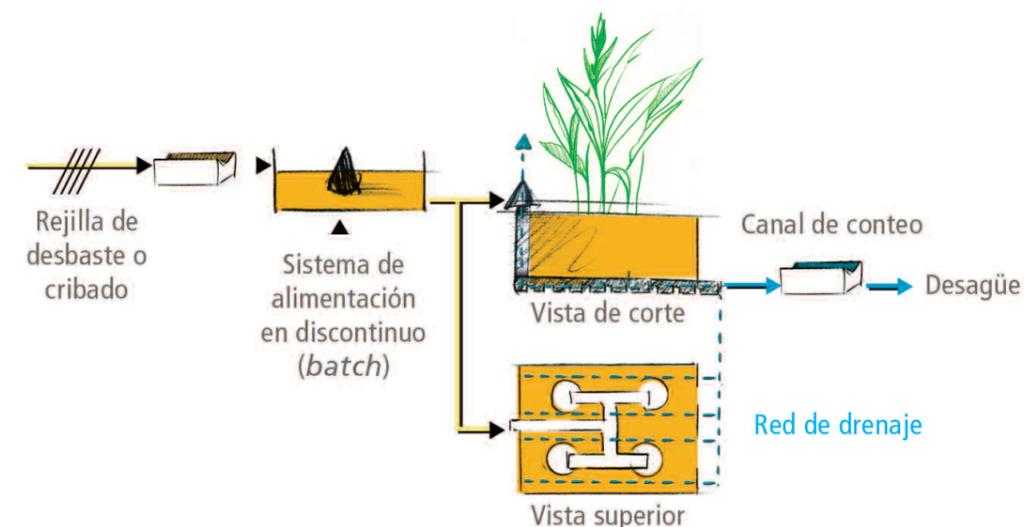


Figura 4. Esquema del sistema tropical (Esquema de un humedal artificial adaptado a la zona tropical)

En comparación con el sistema clásico metropolitano (Figura 5), el sistema tropical simple incluye una única etapa de tratamiento, compuesto por dos filtros que funcionan alternativamente. Las temperaturas medias más altas favorecen la actividad biológica y evitan en muchos casos (de acuerdo con los requisitos de vertido) la necesidad de recurrir a una segunda etapa de tratamiento. La ventaja es consecuente en términos del área ocupada sobre el suelo y simplifica, además, las necesidades de materiales: por ejemplo, una segunda etapa de tratamiento implicaría el uso de arena como material filtrante, materia prima difícil de conseguir en los DFU.

El sistema clásico metropolitano

En Francia Metropolitana, la actividad bacteriana es menor debido a las bajas temperaturas del invierno y, en consecuencia, los períodos de reposo para permitir que la biomasa se reequilibre son más largos. El sistema se compone de tres filtros en paralelo a fin de obtener un período de reposo que sea el doble del período de alimentación.

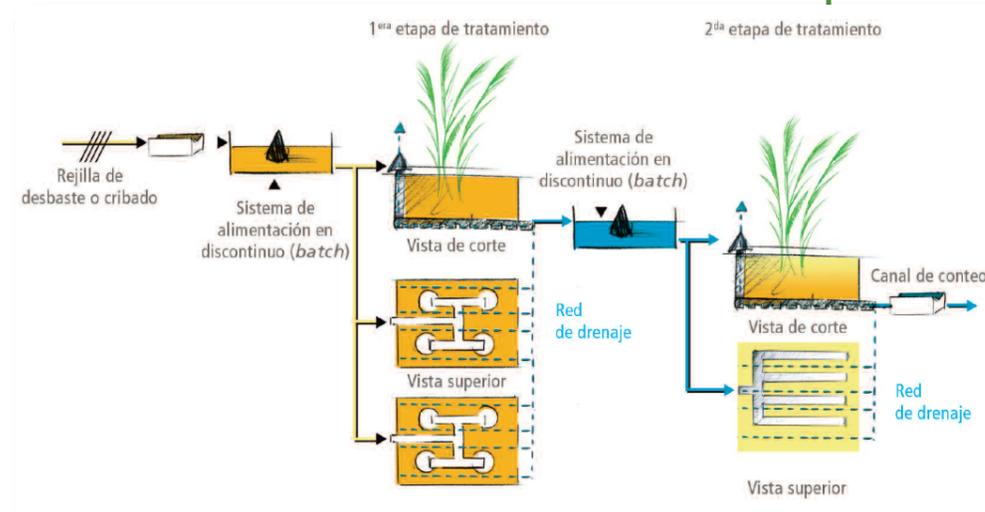


Figura 5. Esquema del sistema clásico metropolitano.

1.2. Diferentes configuraciones del sistema tropical

En función de los requisitos de vertido, pueden modificarse algunos parámetros del sistema para mejorar los rendimientos. Así, es posible incluir:

- un circuito de recirculación;
- un fondo saturado;
- una segunda etapa de tratamiento o un módulo de desinfección.

El párrafo 2.2 p. 29 describe en detalle la elección de la variante a aplicar en función de los objetivos de tratamiento.

1.2.1 Recirculación

Se puede instalar un circuito de recirculación de aguas tratadas en una única etapa de tratamiento. Para ello, se requiere de una trampilla de recirculación y, en algunos casos, de un pozo o estación de bombeo que envía parte de los efluentes a la cabeza de la planta.

Cálculo de la tasa de recirculación

$$\text{Tasa de recirculación (\%)} = (\text{caudal recirculado} / \text{caudal saliente}) \times 100$$

Una tasa de recirculación de 100% significa que hay tanta agua recirculada como agua que sale de la estación; lo que equivale a duplicar la carga hidráulica que recibe el filtro en operación.

La recirculación permite:

- diluir las aguas brutas y así disminuir la producción de H₂S en el pozo de bombeo que es, por lo general, propicio a la emisión de malos olores en los DFU;
- aumentar el tiempo de residencia de las aguas residuales en el sistema y así mejorar una parte del tratamiento (DQO, DBO₅);
- asegurar una hidratación adecuada de los vegetales, cuando la estación opera a baja carga hidráulica; en particular durante la temporada seca.

En contrapartida, la recirculación aumenta la altura de lámina de agua clara aplicada sobre el filtro y amplifica los fenómenos de sobrecarga hidráulica, frecuentes durante la temporada de lluvias. Prost-Boucle y Molle (2012) mostraron que, en clima metropolitano, no interesa aumentar la tasa de recirculación por encima del 100%, ya que puede afectar negativamente la nitrificación (carga hidráulica inferior a 75 cm/d en el filtro en servicio). Este valor límite de la tasa de recirculación no se ha verificado aún en clima tropical. En cualquier caso, la recirculación limita la aceptación de la sobrecarga hidráulica en temporada de lluvia en comparación con un sistema sin recirculación.

La recirculación implica, además, la necesidad de suministrar electricidad a la estación para hacer funcionar el pozo de bombeo, ya sea en cabeza de estación, para enviar la alimentación (la recirculación es entonces por gravedad), o bien a la salida del filtro para controlar la recirculación. Cuando la recirculación se realiza por gravedad, se utiliza una lámina dentada regulable, accesible a nivel de la trampilla de recirculación (Figura 6). En caso de recirculación mediante pozo de bombeo, se aconseja encarecidamente que las aguas tratadas se evacúen por gravedad para evitar la inundación de los filtros en caso de avería o de corte de corriente.

En cuanto al control de los rendimientos de la instalación, la presencia de un circuito de recirculación exige calcular los rendimientos a dos niveles:

- los rendimientos de la estación, entre aguas brutas y aguas tratadas;
- los rendimientos del filtro en operación, entre las aguas aplicadas (aguas brutas + aguas recirculadas) y las aguas tratadas.



Figura 6. Lámina dentada para recirculación manual.

1.2.2 Filtro vertical insaturado/saturado

Los HA de flujo vertical clásicos son sistemas enteramente aeróbicos. En estas condiciones, no pueden producirse los procesos de degradación anóxicos (en particular la desnitrificación). Establecer una zona saturada en el fondo del filtro permite que éste opere en condiciones anóxicas en dicha región del filtro, logrando un tratamiento más intensivo de algunos compuestos (Figura 7). Esto equivaldría a superponer un filtro de flujo vertical insaturado sobre un filtro de flujo horizontal.

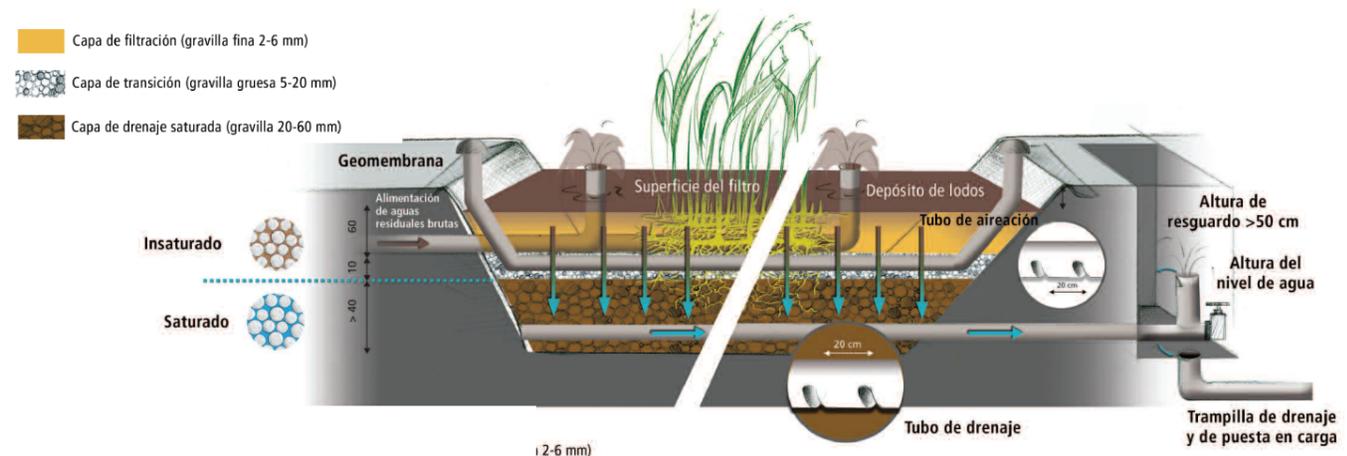


Figura 7. Esquema de un filtro vertical insaturado/saturado (Dibujo Saurel para AFB).

Además de requerir una mayor altura del lecho, un filtro insaturado/saturado requiere:

- una red de aireación intermedia a 5 o 10 cm por encima del nivel alto de la parte saturada, para mantener las condiciones aeróbicas en la parte superior del filtro;
- una trampilla de nivel con la cual pueda ser controlada la altura del nivel de agua de la zona saturada.

La altura del nivel de agua de la zona saturada, influye sobre las condiciones de óxido-reducción, el tiempo de residencia hidráulico del efluente en el sistema y la velocidad de flujo en la porosidad. Además, la zona saturada debe vaciarse parcialmente cada año para evitar la colmatación del filtro. Las aguas de vaciado son enviadas a cabeza de planta para que los depósitos queden retenidos en la superficie de los filtros.

El uso de una zona saturada en el filtro permite, fundamentalmente:

- **potenciar el tratamiento del nitrógeno total** al establecer una zona anóxica, condición indispensable para la desnitrificación;
- mejorar los rendimientos de la **degradación del carbono** gracias a un consumo suplementario asociado a las reacciones de desnitrificación;
- **capturar los SS** residuales y garantizar así una concentración de sólido suspendidos totales (SST) en el efluente inferior a 25 mg/L, condición indispensable para el funcionamiento de módulos UV.

1.2.3 Segunda etapa de tratamiento

El sistema tropical simple está constituido de una única etapa de tratamiento, pero es posible añadir una segunda etapa en aquellos casos en los que los valores límites de emisión de contaminantes son muy exigentes. En estos casos, pueden valorarse diferentes opciones tecnológicas.

■ Filtro de flujo vertical insaturado

En la segunda etapa, el filtro vertical sigue las mismas reglas de dimensionamiento que la primera etapa (parte 3.2 p. 37), pero con las siguientes cargas aplicadas: carga hidráulica 0,37 m/d, 70 gDQO/m²/d, 20 gDBO₅/m²/d, 30 gSST/m²/d y 15 gNTK/m²/d.

La red de alimentación es en cambio diferente: se compone de una red superficial de canalizaciones en carga, perforadas con orificios de más de 8 mm de diámetro (Figura 8).

La alimentación se realiza en discontinuo (en *batch*), como en la primera etapa.



Figura 8. Alimentación de la 2ª etapa de la estación de Mansarde Rancée (Martinica) antes de la plantación, febrero de 2014.

Existen diferencias en la composición de las tres capas de gravilla en comparación con un filtro de la primera etapa de tratamiento (parte 3.5.2 p. 42):

- capa de filtración: 30 cm de arena ($0,25 < d_{10} < 0,4$ mm, $d_{60}/d_{10} < 5$);
- capa de transición: 10–20cm of 3/10mm gravel;
- capa de drenaje: 10–20cm of 20/60mm gravel.

Una segunda etapa vertical **potencia el tratamiento del amonio** (> 90%), así como **garantiza bajos valores límites de emisión en SST** (< 25 mg/L) y en DQO (< 90 mgO₂/L). Sin embargo, la dificultad para encontrar arena en los DFU podría limitar el uso de filtros verticales en la segunda etapa. Esta configuración puede ser interesante para aquellos emplazamientos con suelos poco profundos: se pueden así utilizar dos etapas de filtración con filtros de 60 cm de profundidad. Además, si el desnivel lo permite, con este sistema permite operar por gravedad, permitiendo así un tratamiento aeróbico más intenso.

■ Filtro de flujo horizontal

En los filtros de flujo horizontal, el lecho filtrante está totalmente saturado con agua.

El efluente se reparte por todo lo ancho y alto del filtro gracias a un sistema de distribución ubicado en un extremo del estanque; a continuación, el efluente fluye a través del sustrato en sentido horizontal principalmente. En la mayoría de los casos, la alimentación es continua porque la carga orgánica aportada es baja y la superficie relativamente importante (Figura 9).

La evacuación de las aguas tratadas se realiza con un sistema de drenaje situado en el fondo, en el extremo opuesto del filtro, enterrado bajo una capa de piedras drenantes. Este tubo está conectado a un sumidero de control de nivel que permite regular la altura del rebosadero y, por lo tanto, la del agua en el compartimento* de manera que éste esté saturado. El nivel del agua debe mantenerse aproximadamente 5 cm por debajo de la superficie del material, lo que evita los flujos preferenciales en superficie y asegurar un flujo homogéneo.

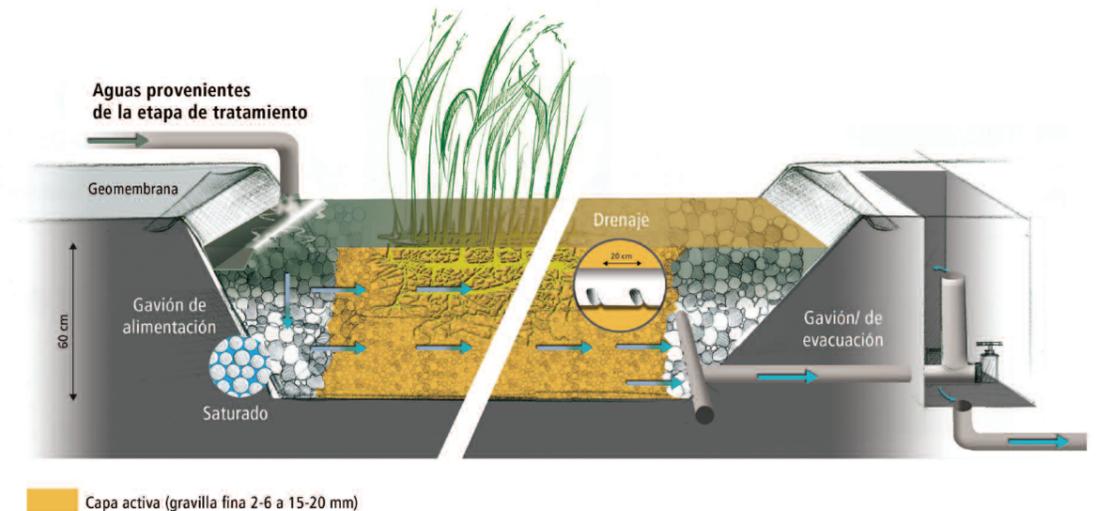


Figura 9. Esquema de un filtro de flujo horizontal (Dibujo Saurel para AFB).

El filtro de flujo horizontal debe estar precedido obligatoriamente por una etapa de tratamiento primario. En Mayotte (estación de Totorossa) se estudió su asociación con un decantador. Sin embargo, el filtro se colmató rápidamente debido a una explotación poco rigurosa del decantador. Esta experiencia muestra claramente la fragilidad de los filtros de flujo horizontal, en particular cuando se sitúan a continuación de un tratamiento primario sensible a las variaciones de carga (episodios lluviosos, en particular). Sin embargo, un segundo nivel horizontal bien dimensionado colocado después de un filtro de flujo vertical, podría ser una solución interesante. Se detallará únicamente esta última combinación, más confiable, especialmente en el contexto tropical en el que las sobrecargas hidráulicas pueden ser consecuencia de episodios lluviosos intensos.

Considerando la saturación del medio, el aporte de oxígeno es relativamente bajo y se hace esencialmente mediante difusión desde la superficie; pero también en menor medida por liberación de oxígeno desde las raíces de las plantas (efecto rizosfera). Estas condiciones conllevan el desarrollo de un medio anóxico y de una flora microbiana adaptada al mismo. Los procesos de degradación anóxica permiten la reducción de los nitratos a nitrógeno gaseoso (desnitrificación).

Una segunda etapa de tipo flujo horizontal permitiría una desnitrificación completa (si el carbono no es limitante) y, por lo tanto, una **reducción del nitrógeno total en las mismas proporciones que el nitrógeno que ha sido nitrificado. Además, completaría el tratamiento del carbono y de los SST (< 25 mg/L).**

■ Lecho bacteriano de muy baja carga

La estación de Taupinière en Martinica incluye un lecho bacteriano de muy baja carga como segunda etapa de tratamiento. Se trata de un lecho de 150 cm de altura constituido por roca volcánica de 20/60 mm. El sistema de alimentación está compuesto por dos redes de canalizaciones perforadas con orificios dispuestos en trespelillo (Figura 10). La alimentación por batch se hace alternando cada una de estas redes, y utilizando un volumen correspondiente al de una lámina de agua de 3 cm, cada 5 minutos. Este modo de alimentación permite despegar el exceso de biopelícula que se desarrolla sobre los bloques. Los compartimentos situados en el fondo del lecho permiten la separación entre las aguas tratadas y los lodos secundarios. Estos últimos son extraídos de 1 a 4 veces al día y se recirculan a cabeza de estación.

El lecho bacteriano se dimensiona con muy baja carga: con una altura de 1,5 m de material y superficie específica de 150 m²/m³, la carga superficial es de 3,5 g DBO₅/m²/d.

En este tipo de sistemas, el aporte de oxígeno es importante para permitir un **tratamiento más intenso del nitrógeno reducido** (NTK < 10 mg/L). Su carácter compacto (en torno a 0,1 m²/HE) y el hecho de que se evita el uso de arena lo convierten en una opción interesante. Pero también presenta inconvenientes. El principal es que, para asegurar una alimentación suficiente, es indispensable un circuito de recirculación. En caso de sobredimensionamiento de la estación (muy frecuente), puede resultar que las aguas sean recirculadas varias decenas de veces antes de salir de la estación. Además, por lo general, es necesario un segundo sistema de bombeo para devolver los lodos extraídos a cabeza de estación.

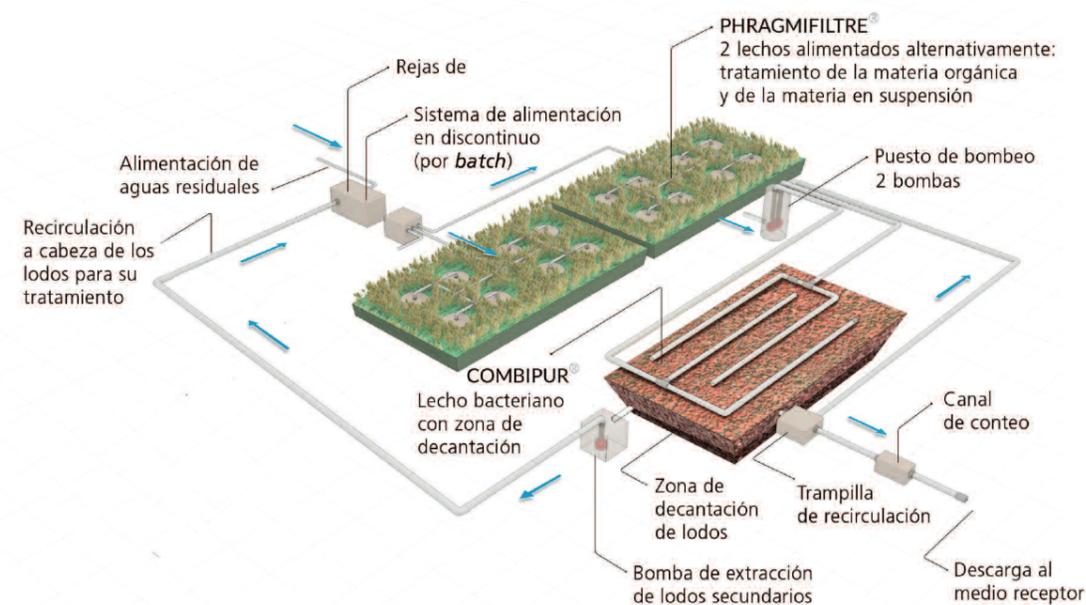


Figura 10. Lecho bacteriano de baja carga como segunda etapa de tratamiento (Fuente: sistema Combipur).

1.3 Procesos depuratorios y control del sistema

En esta parte, se detallan los diferentes mecanismos que participan en el tratamiento de aguas por un HA, así como la manera de conducir el sistema manteniendo las condiciones indispensables para el buen funcionamiento del proceso.

1.3.1 Retención física y gestión de los lodos

Las aguas residuales brutas son vertidas sobre la superficie del filtro. La fracción particulada de la materia orgánica queda retenida en la superficie del filtro a través de un mecanismo físico de filtración. La capa de lodos que se crea, es muy rica en microorganismos que rápidamente van a mineralizar la materia orgánica.

El espesor de la capa aumenta 2,5 cm por año en Francia Metropolitana, lo que contribuye a una mejora del rendimiento del sistema con el tiempo (retención física, actividad biológica). Sin embargo, la acumulación de lodos en la superficie del filtro perturba el flujo de las aguas residuales a través del mismo y los intercambios gaseosos entre la atmósfera y el filtro. Tres componentes del sistema permiten combatir este efecto de colmatación a corto, medio y largo plazo:

- los tallos de las plantas gracias a su acción mecánica sobre la capa de depósitos, mantienen permanentemente la conductividad hidráulica y los intercambios gaseosos del sistema (parte 1.4 p. 19);
- la alternancia entre los diferentes filtros permite respetar los períodos de reposo, indispensables para la mineralización de la materia orgánica acumulada durante la fase de alimentación;
- la capa de lodos acumulada en la superficie del filtro debe retirarse cuando alcanza una veintena de centímetros (en la práctica, en Francia Metropolitana cada 10 a 15 años). En la zona tropical, la velocidad de mineralización de la materia orgánica es mucho mayor, a tal punto que no ha sido posible evaluar con precisión la acumulación de lodos con el tiempo durante los seguimientos realizados hasta el presente. Una cosa es indudable: la acumulación es menor que en Francia Metropolitana, lo que tiene consecuencias sobre las tres operaciones de gestión de los lodos:
 - el papel mecánico de los vegetales sigue siendo fundamental, pero una menor cantidad producida de lodos, debería extender la variedad de especies para incluir plantas con una menor densidad de tallos;
 - la mayor velocidad de mineralización de la materia orgánica implica una reducción del período de reposo entre dos ciclos de alimentación. El período de reposo tiene, así, la misma duración que el período de alimentación, lo que permite reducir a dos el número de filtros en paralelo (en lugar de tres como en el sistema clásico de Francia Metropolitana);



Figura 11. Operación de extracción de lodos en Bois d'Opale 1, Guyana. Estos lodos pueden ser valorizados en agricultura (Epnac, 2014).

- la frecuencia de extracción de los lodos disminuye y, por lo tanto, el periodo de acumulación de lodos podría aumentar por encima de los 15 años.

La retención física en la superficie del filtro es una etapa muy importante del tratamiento. Es el mayor factor responsable de la **reducción de los SST** en el sistema. La fracción particulada de la polución de carbono se retiene en la superficie de los filtros y representa más de un tercio de la carga en DQO. También se eliminan las formas particuladas **nitrogenadas y fosfatadas**. Por último, es en esta capa de lodos donde se encuentran determinados **microcontaminantes** que son retenidos por el sistema (Choubert, 2011).

1.3.2 Tratamiento biológico y aireación

Los HA forman parte de la familia de los tratamientos biológicos por cultivo fijo sobre soporte fino. La biomasa depuradora se desarrolla en la gravilla que compone el lecho filtrante y forma una matriz: la biopelícula. Ésta es un amasijo de materia orgánica compuesta de polisacáridos secretados por las bacterias depuradoras. Sirve de interfase entre las bacterias y el medio externo. La materia orgánica disuelta/nutriente penetra en la biopelícula por simple difusión en función del gradiente de concentración. Los HA son sistemas aeróbicos, esto es, las bacterias utilizan el oxígeno disuelto para su metabolismo. Existen varios tipos de bacterias en el interior del filtro. En los primeros centímetros se encuentra la principal actividad de las bacterias heterótrofas, responsables de la degradación de la materia carbonada. Su metabolismo, muy dinámico, les permite ganar la delantera a las bacterias autótrofas, que degradan el nitrógeno amoniacal en procesos más lentos. Estas últimas se encuentran en un rango más amplio de profundidades.

Es fundamental mantener las condiciones aeróbicas en el interior del filtro. Para hacerlo, las aguas residuales se aportan puntualmente en grandes volúmenes. Este sistema de alimentación en discontinuo permite que el agua se reparta sobre toda la superficie del filtro. La infiltración de esta napa de agua remueve una parte del aire empobrecido en oxígeno que está contenido en el lecho, y permite su renovación por convección. Los fenómenos de difusión desde la superficie o desde el fondo del filtro a través de la red de drenaje conectada a la atmósfera, completan la aireación del lecho. El volumen de los *batch* y la densidad de la red de aireación-drenaje son los parámetros claves del diseño, y determinarán la capacidad de aireación del sistema.

La biopelícula se desarrolla en el espacio intersticial entre los diferentes granos que componen el lecho. Cuando las condiciones son propicias, su crecimiento es continuo conduciendo a la colmatación en el seno del lecho filtrante. Como en el caso de la gestión de los depósitos superficiales, los períodos de reposo son indispensables para regular la materia orgánica de la biopelícula en el interior del filtro.

Los primeros 40 centímetros del filtro (así como la capa de lodos) son el lugar donde se produce el tratamiento de la mayor parte de la materia carbonada aportada al sistema. También es oxidada una parte de la carga nitrogenada. El metabolismo bacteriano consume el fósforo en una proporción del 1 al 2% de la masa de DBO⁵ consumida.

1.3.3 Tratamiento del nitrógeno, filtración y espesor del lecho filtrante

Teniendo en cuenta que la distribución de bacterias autótrofas en el filtro puede alcanzar cotas más profundas, es posible variar la altura de la capa filtrante entre 30 y 80 cm, según los objetivos de nitrificación. Sin embargo, por encima de los 60 cm, se recomienda instalar una red de aireación intermedia, en medio de la capa, que asegure la aireación por difusión en medio del filtro.

La instalación de un fondo saturado (capítulo 1.2.2 p. 13) permite maximizar el tratamiento del nitrógeno global con un sobrecoste modesto, al permitir que se lleve a cabo la desnitrificación. Esto se consigue aumentando la altura de la capa drenante para poder crear una zona saturada utilizando un codo que permita la puesta a nivel del agua en el fondo del filtro (Figura 7). De esta forma, las condiciones anaeróbicas necesarias para que se produzca la desnitrificación, tienen lugar en esta parte saturada. La ausencia de carbono disponible podría limitar, sin embargo, la desnitrificación en este tipo de sistemas.

Existen diversas configuraciones de filtros posibles en función de los requisitos de vertido. La altura de la capa filtrante permite mejorar más o menos la **nitrificación** y también, aunque en menor medida, la retención de las SST. La presencia de una zona saturada permite la **desnitrificación** de las formas oxidadas del nitrógeno, así como asegura la calidad de **los vertidos en términos de SST** (< 25 mg/L) y en DQO. El desafío consistiría entonces, en adaptar la profundidad de las capas no saturadas y saturadas de manera a optimizar el tratamiento, especialmente del nitrógeno global.

Independientemente de la elección, el tiempo de residencia de los efluentes en el sistema es relativamente corto (inferior a un día) y no permite el tratamiento de los gérmenes patógenos (factor de reducción de 2 a 3 unidades log máximo).

Autótrofos y heterótrofos

Esta distinción se basa en la capacidad de los organismos para producir su propia materia orgánica a partir de minerales o de gases (= autótrofos; por ejemplo, las bacterias nitrificantes), o su dependencia frente al carbono orgánico (= heterótrofos). Las bacterias nitrificantes son quimioautótrofas: producen su materia orgánica a partir del carbono presente en el aire, pero utilizan la energía química que recuperan de la oxidación del amonio en nitratos para sintetizar sus compuestos.

Extracción por los vegetales

Dependiendo de la especie, los tejidos vegetales pueden presentar entre 20 y 200 g de nitrógeno por metro cuadrado y por año, y entre 3 y 15 g de fósforo. Un HE corresponde a la producción diaria de 15 g de nitrógeno Kjeldahl y 2,5 g de fósforo total. Con un diseño de 0,8 m²/HE, la participación directa de los vegetales en el tratamiento a través de su metabolismo se limita, por lo tanto, como máximo, a 2,9% para el nitrógeno y 1,3% para el fósforo.

1.4 Papel de los vegetales

El rol que juegan los vegetales se presenta estratégicamente en esta sección, aparte de los procesos depurativos. En efecto, los vegetales tienen como función mantener las condiciones necesarias para que los procesos depurativos se produzcan, pero no participan directamente en la depuración para los sistemas aquí descritos.

El papel principal de los vegetales en los humedales artificiales de flujo vertical alimentados con aguas residuales brutas, es el de la acción mecánica, impidiendo que se colmate el depósito orgánico formado en la superficie de los filtros. Por acción del viento, los tallos de las plantas se mueven dibujando anillos en la capa de lodos (Figura 3 p. 11). Esos anillos permiten la infiltración de las aguas residuales y el intercambio gaseoso entre la atmósfera y el interior del lecho filtrante. El crecimiento homogéneo de los tallos en toda la superficie de los filtros (lo contrario a un desarrollo en manojos densos) y una alta densidad de tallos, son la garantía para asegurar una transferencia óptima de gases con el fin de mantener la capacidad depurativa de los filtros.

Las raíces de las plantas secretan compuestos orgánicos (exudados radiculares*) y pequeñas cantidades de oxígeno. En consecuencia, en la superficie de las raíces se desarrolla una flora bacteriana más variada y más densa que en el resto del lecho. En los sistemas saturados (filtros de flujo horizontal), estas bacterias desempeñan un papel nada despreciable en el tratamiento de los efluentes (Gagnon, 2007).

Las plantas participan en el desarrollo de la biodiversidad microbiana en el interior del filtro, pero en el caso de los filtros de flujo vertical el impacto sobre el tratamiento es de escasa importancia.

El tratamiento de las aguas residuales por los HA descritos aquí es, por lo tanto, efecto de la biomasa microbiana contenida en el lecho y no de los vegetales, cuya extracción con fines metabólicos es insignificante. El término comercial de fitodepuración es, en este caso, considerablemente exagerado.

1.5 Rendimientos depurativos de los HA en zona tropical

Los proyectos iniciados en los DFU con el apoyo de la AFB han permitido estudiar siete estaciones (Cuadro 1). Se realizaron un centenar de balances de materia durante un periodo de 24 horas con un muestreo proporcional al caudal.

Cuadro 1. Presentación de las diferentes estaciones pilotos en zona tropical

Nombre	Departamento	Capacidad	Sistema	Puesta en servicio	Número de balances	Tasa de carga media (% carga nominal)	
						Orgánica	Hidráulica
Hachenoua	Mayotte	110 EH	1 nivel: 2 HA NS capa filtrante de 80 cm	Abril 2006	16	53 %	65 %
Bois d'Opale 1	Guyane	300 EH	1 nivel: 2 HA NS 0 y 100% de recirculación	Mayo 2010	9	33 %	139 %
Bois d'Opale 2	Guyane	480 EH	1 nivel: 2 HA NS 100% de recirculación	Marzo 2012	13	29 %	169 %
Mansarde Rancée	Martinique	1 000 EH	1er nivel: 2 x 3 HA NS/S 2º nivel: 2 x 2 HA NS	Enero 2014	3	10 %	16 %
Taupinière	Martinique	900 EH	1er nivel: 2x2 HA NS/S 2º nivel: LB carga baja	Noviembre 2014	31	84 %	98 %
Les Mangles	Guadeloupe	120 EH	1 nivel: 2 HA NS/S	Octubre 2015	17	4 %	15 %
Champ d'Ylang 2	Mayotte	190 EH	1 nivel: 2 HA NS Capa filtrante de 30 cm	Noviembre 2015	7	81 %	105 %

IS: insaturado; IS/IS: insaturado/saturado; LB: lecho bacteriano.

Las tasas de carga se calculan para cargas aplicadas de 350 g DQO/m²/d y una lámina de agua de 0,37 m/d, lo que corresponde a un factor de dimensionamiento de 0,8 m²/HE

* Los términos señalados con un asterisco* están definidos en el glosario al final del libro.

Estas estaciones han sido dimensionadas con un factor de 0,8 m²/HE, lo que corresponde a una carga aplicada de 350 g DQO/m²/d y una lámina de agua de 0,37m/d en el filtro en funcionamiento. Las tasas de carga orgánica medias son a veces bajas, pero, por lo general, las cargas hidráulicas son altas y hasta muy altas. Las conclusiones del estudio de este panel de estaciones serán representativas de un nivel de carga normal.

En primer lugar, se describirán las características de las aguas residuales brutas observadas en las pequeñas comunidades del medio rural de Francia Metropolitana. Posteriormente, dado el desequilibrio observado entre las cargas orgánicas e hidráulicas recibidas por las estaciones, se desarrollará la problemática de la estación de lluvias y sus consecuencias para los filtros. Por último, se presentarán los rendimientos de los HA a dos niveles: por sistemas (filtro vertical insaturado y filtro vertical insaturado/saturado), y después a nivel del proceso global de tratamiento, a partir de las diferentes configuraciones de los HA observados en los DFU.

1.5.1 Características de las aguas residuales domésticas en los DFU; consideración del impacto de los episodios de lluvia.

El conjunto de los resultados de los análisis de aguas brutas de los DFU se presenta sintetizado en el Cuadro 2. La calidad de los efluentes a la entrada de las estaciones es muy variable, lo que es característico del saneamiento en pequeñas comunidades. En época seca, los efluentes están un poco más concentrados de lo que se ha podido observar en las zonas rurales metropolitanas (Mercoiret, 2010). En cambio, están más diluidos durante los períodos lluviosos. En ambos casos, las **aguas residuales domésticas brutas observadas en los DFU se mantienen en la gama de los estándares metropolitanos y pueden ser tratadas sin problemas por los HA.**

El cuadro confirma que el período de lluvias trae consigo una dilución muy importante de los efluentes a tratar. Se observa un factor de dilución de 2 para el nitrógeno y el fósforo, de sólo 1,5 para el carbono y de 1,2 para las SST. Comúnmente la dilución durante los episodios de lluvia afecta de forma asimétrica a los diferentes contaminantes, esto se explica porque durante la escorrentía, las aguas de lluvia se cargan fundamentalmente con materias minerales y carbonadas (hidrocarburos en las carreteras, etc.).

Cuadro 2. Presentación de las características de las aguas residuales brutas de los DFU en periodo seco y durante los periodos de lluvia, y comparación con los datos de periodos secos de pequeñas comunidades rurales metropolitanas (Mercoiret, 2010)

		DBO ₅ (mg/L)	DQO (mg/L)	SST (mg/L)	NTK (mg/L)	PT (mg/L)	Factor carga hidráulica período lluvioso/seco
Periodo seco (n = 73)	Máx	680	1 394	700	130	23,4	
	Promedio	319	674	281	83	10,7	
	Min ET	32 195	92 340	28 175	33 25	2,7 4,0	
Periodo lluvioso (n = 15)	Máx	580	1 051	519	87	11,2	4,4
	Promedio	209	449	223	40	5,7	2,8
	Min ET	30 178	109 307	49 148	7 27	1,7 2,8	1,9 1,2
Pequeñas comunid. metrop. (n = 10 275)	Máx	1 230	2 930	2 100	223	39,2	
	Promedio	265	646	288	67	9,4	
	Min ET	5 171	30 395	2 226	1 35	0,2 5,3	

La relación de caudales entre los periodos lluviosos y secos indica que, durante los episodios de lluvia, la carga hidráulica a tratar aumenta a más del doble.

Cuáles son la frecuencia y la amplitud de estas sobrecargas hidráulicas? Cómo se comportan los filtros durante estos episodios?

Carga hidráulica nominal aplicada en el filtro en funcionamiento

Se expresa en altura de agua (m), correspondiéndose con un volumen (m³) aplicado sobre una superficie (m²). El factor de dimensionamiento de los HA es de 0,8 m²/HE. Como los dos filtros funcionan alternativamente, la carga aplicada sólo se ejerce en realidad en uno de los dos filtros, es decir, 0,4 m²/HE.

Para la carga hidráulica, eso corresponde a:

$$\frac{0,15 \text{ m}^3/d}{0,4 \text{ m}^2/EH} = 0,37 \text{ m/d}$$

Recordatorio: se considera que el volumen de aguas residuales producido por un HE es de 150 L/d, es decir, 0,15 m³.

En condiciones de carga "normal", es posible que sólo algunos episodios lluviosos a lo largo del año (2%) tengan un impacto sobre el funcionamiento de los filtros en cuanto al nitrógeno se refiere. Bajo ciertas condiciones (sobrecarga orgánica, recirculación), esta proporción puede aumentar hasta un 15% (Figura 12). Dichas proporciones deben modularse en función de la calidad de la red y de la pluviometría local.

Para mayor detalle

La Figura 12 se realizó a partir del registro diario de las cargas hidráulicas recibidas por la estación de Taupinière (Martinica) entre el 1 de enero de 2015 y el 31 de mayo de 2017. Los filtros operan sin recirculación y el sistema colector que lleva el agua hasta la estación es nuevo. Este seguimiento permitió el estudio de las cargas hidráulicas recibidas por la estación, y la frecuencia y amplitud de las sobrecargas provocadas por los episodios lluviosos.

Al comenzar el estudio, la tasa de carga orgánica recibida por la estación era baja (en torno a 30% de la carga orgánica nominal), y aumentó posteriormente.

En ese momento, uno de los filtros se dividió en dos y sólo una mitad se mantuvo en funcionamiento. De esta manera fue posible estudiar el funcionamiento de la estación a baja carga (32%, fase de inicio), en condiciones normales (85% de la carga orgánica nominal, en el filtro completo) y a alta sobrecarga (164% de la carga orgánica, en el filtro dividido).

A partir del registro de los caudales y de la superficie de los filtros en funcionamiento, se calculó la lámina de agua diaria aplicada. Estas láminas de agua son clasificadas en orden creciente. Dado que todas tienen la misma frecuencia de ocurrencia, la curva de frecuencia acumulada permite representar la dispersión de las láminas de agua aplicadas y visualizar con qué frecuencia se superan los valores umbral.

Prost-Boucle y Molle (2012) consideran que cuando la lámina de agua diaria supera 75 cm, los procesos de nitrificación comienzan a disminuir. Las curvas indican que, para una carga normal, el 15% de los episodios son superiores a la carga hidráulica nominal y el 2% de ellos se encuentran por encima del límite a partir del cual la nitrificación puede resultar afectada. En caso de sobrecarga orgánica, las frecuencias son mucho más altas: el 95% de los episodios son superiores a la carga hidráulica nominal y el 15% de ellos se encuentran por encima del límite de impacto sobre la nitrificación. Una tasa de recirculación del 100% implica una duplicación de la carga aplicada sobre el filtro en operación; por lo tanto, en términos hidráulicos, a lo que se observa en el filtro con sobrecarga orgánica.

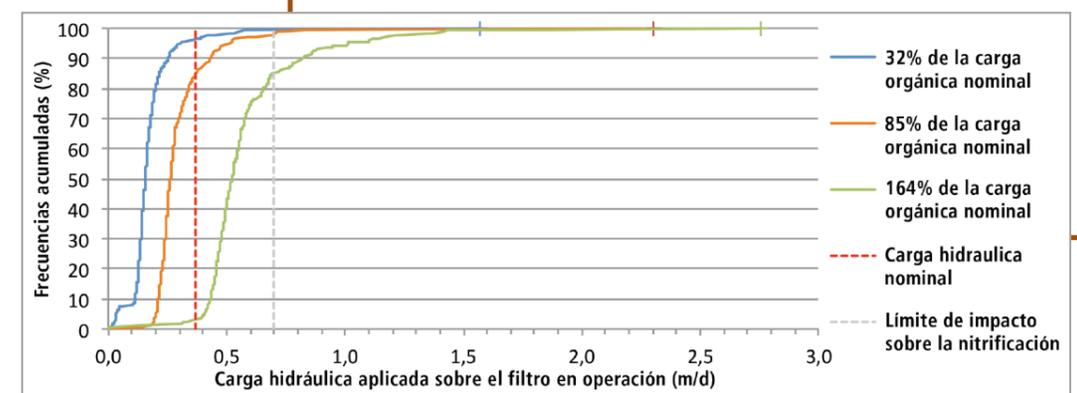


Figura 12. Distribución de las cargas hidráulicas aplicadas en los filtros de la estación de Taupinière (Martinica) entre el 1/01/2015 y el 31/05/2017. Las barras corresponden a los valores máximos registrados en cada serie.

El 28 de septiembre de 2016, la Martinica fue azotada por la tormenta tropical Matthew. Los datos registrados por la estación de Taupinière permitieron hacer un balance sobre el funcionamiento del filtro en condiciones extremas.

Entre el 28 a las 13 horas y el 29 a las 3 horas, el pluviómetro de la estación registró 88,6 mm de lluvia. Se aplicó una lámina de agua de 2,39 m sobre el filtro en servicio ese día, es decir, 7 veces la carga nominal. A la salida del filtro, en períodos normales, las aguas tratadas son bombeadas hacia el lecho bacteriano. Sin embargo, el caudal de las bombas fue insuficiente durante el paso de Matthew y los filtros se inundaron. La altura de agua máxima en el pozo de bombeo alcanzó 3 m, lo que corresponde a una veintena de centímetros de agua en la superficie de los filtros, como se puede observar en la Figura 13. La estación se fue vaciando después paulatinamente para volver a un estado normal tras apenas 24 horas del fin de la tormenta.

Los únicos daños constatados en la estación afectaron a los vegetales (Figura 14).

Los HA tienen, por lo tanto, capacidad para absorber sobrecargas hidráulicas generadas por las tormentas tropicales. Para evitar la inundación de los filtros y favorecer el retorno a un funcionamiento normal apenas terminan las lluvias, se aconseja instalar un by-pass a la salida del filtro para, en caso de que sea necesario, evacuar el agua sin realizar el tratamiento complementario de la segunda etapa.



Figura 13. Inundación de los filtros de la estación de Taupinière durante la tormenta Matthew. Son los filtros de la 2ª línea de la estación que todavía no están en servicio y, por lo tanto, no han sido plantados por falta de carga suficiente.



Figura 14. Vegetales plantados en los filtros en servicio de la estación de Taupinière después del paso de la tormenta Matthew. En primer plano a la izquierda los *Cyperus alternifolius* habían sido segados poco tiempo antes y resistieron bien. Los *Heliconia psittacorum* del fondo sufrieron en particular por el viento, pero pudieron reponerse. A la derecha, los *Costus spiralis* que ya se encontraban en mal estado antes de la tormenta, no pudieron reponerse tras su paso.

La evaluación de las aguas brutas que llegan a los HA de los DFU demuestran que:

- las aguas residuales brutas medidas en los DFU se encuentran dentro de la gama estándar de concentraciones observadas en zona rural metropolitana;
- durante los episodios lluviosos, los caudales de agua a tratar se multiplican en promedio por un factor superior a 2;
- para sistemas correctamente cargados (> 70% de la carga nominal), no es poco frecuente que la carga hidráulica aplicada se encuentre próxima a los límites a partir de los cuales los procesos de nitrificación podrían verse afectados;
- por último, los HA soportan bastante bien el paso de tormentas tropicales a pesar de dar lugar a láminas de agua aplicadas superiores a 7 veces la carga nominal.

1.5.2. Rendimientos de los diferentes sistemas de humedales artificiales en clima tropical

En la parte 1.2 se presentan diferentes configuraciones de HA. Estos incluyen, de hecho, dos categorías de sistemas:

- los filtros plantados de flujo vertical completamente insaturados (HAV IS), en los cuales los procesos de tratamiento son completamente aeróbicos;

- los filtros plantados de flujo vertical insaturados/saturados (HAV IS/S), en los cuales, además de los procesos aeróbicos, tienen también lugar los procesos de tratamiento anaeróbicos gracias a la presencia de una zona anóxica. Esta distinción entre los procesos de tratamiento se conservará a lo largo de toda la exposición de resultados de rendimientos. Éstos se discuten en primer lugar a escala de filtro y posteriormente a nivel de estación.

En el Cuadro 3 se presentan las concentraciones de aguas brutas y tratadas, así como los factores de reducción correspondientes a los principales parámetros de calidad del agua, para los dos sistemas de HA (IS, IS/S). En la Figura 15 se presentan las concentraciones medidas en los balances y la dispersión asociada en forma de percentiles acumulados, por sistema (tipo de filtro).

Cuadro 3. Síntesis de los análisis realizados en las muestras de entrada y salida del filtro (1ª etapa de tratamiento)

	HA IS (n = 45)											
	Aguas brutas (mg/L)				Aguas tratadas (mg/L)				Factor de reducción (%)			
	Máx	Prom	Min	ET	Máx	Prom	Min	ET	Máx	Prom	Min	ET
DBO₅	560	245	30	163	90	17	3	16	98 %	90 %	74 %	6 %
DQO	1240	585	109	296	184	75	23	32	96 %	83 %	50 %	10 %
DQOf	671	244	36	135	114	50	15	22	93 %	75 %	45 %	12 %
SST	648	263	49	165	81	28	3	20	99 %	86 %	35 %	12 %
NTK	123	65	7	32	45	16	2	11	98 %	68 %	12 %	23 %
N-NH₄	120	52	6	31	35	13	0	9	100 %	68 %	4 %	26 %
N-NO₃	1.5	0,7	0,45	0,34	66	21	0,1	16				
NT	124	66	7	33	74	36	11	17	75 %	42 %	2 %	18 %
PT	23,4	10,2	1,7	4,8	11,3	4,9	1,3	2	91 %	46 %	2 %	26 %

	HA IS/S (n = 48)											
	Aguas brutas (mg/L)				Aguas tratadas (mg/L)				Factor de reducción (%)			
	Máx	Prom	Min	ET	Máx	Prom	Min	ET	Máx	Prom	Min	ET
DBO₅	680	344	32	205	60	12	2	10	98 %	93 %	68 %	5 %
DQO	1394	696	92	371	196	85	15	46	94 %	85 %	66 %	7 %
DQOf	558	241	74	116	97	59	9	28	91 %	72 %	12 %	15 %
SST	700	282	28	175	70	15	3	12	98 %	93 %	64 %	5 %
NTK	130	85	31	25	51	18	3	14	96 %	79 %	39 %	15 %
N-NH₄	110	64	21	21	44	16	2	13	97 %	76 %	24 %	19 %
N-NO₃	9,32	0,71	0,01	1,28	75	13	0	17,3				
NT	131	85	31	25	66	29	13	14	86 %	62 %	19 %	16 %
PT	20,7	9,3	2,7	3,6	11	5,6	0,7	3	88 %	42 %	-4 %	26 %

n: número de datos; Máx: valor máximo; Min: valor mínimo; Prom: promedio; ET: desviación típica.

A pesar de la gran variabilidad de calidad de los efluentes a la entrada de las estaciones, el factor de reducción es consecuente y estable para la polución carbonada (83% para los sistemas IS y 85% para los sistemas IS/S), las SST (86% y 93%) y el nitrógeno orgánico (68% y 79%).

Las diferencias entre los dos sistemas son claras: añadir un fondo saturado sólo permite una ligera mejoría en el tratamiento del carbono, en cambio mejora los rendimientos para los SST y especialmente en el caso del nitrógeno (+20% sobre NT).

Durante las campañas de medición, no se ha observado ningún incumplimiento de los requisitos de vertido (rendimientos mínimos del decreto del 21 de julio de 2015 o decisión prefectoral específica).

A la salida del filtro en operación, los vertidos respetan también las concentraciones redhibitorias² para las estaciones de más de 2 000 HE, con excepción de la DBO₅ para la que se obtuvieron tres balances con muy alta carga en Taupinière (antes de la segunda etapa de tratamiento).

2- Concentraciones redhibitorias en el sentido del decreto del 21 de julio de 2015. Las exigencias reglamentarias se recuerdan en el epígrafe 2.1.

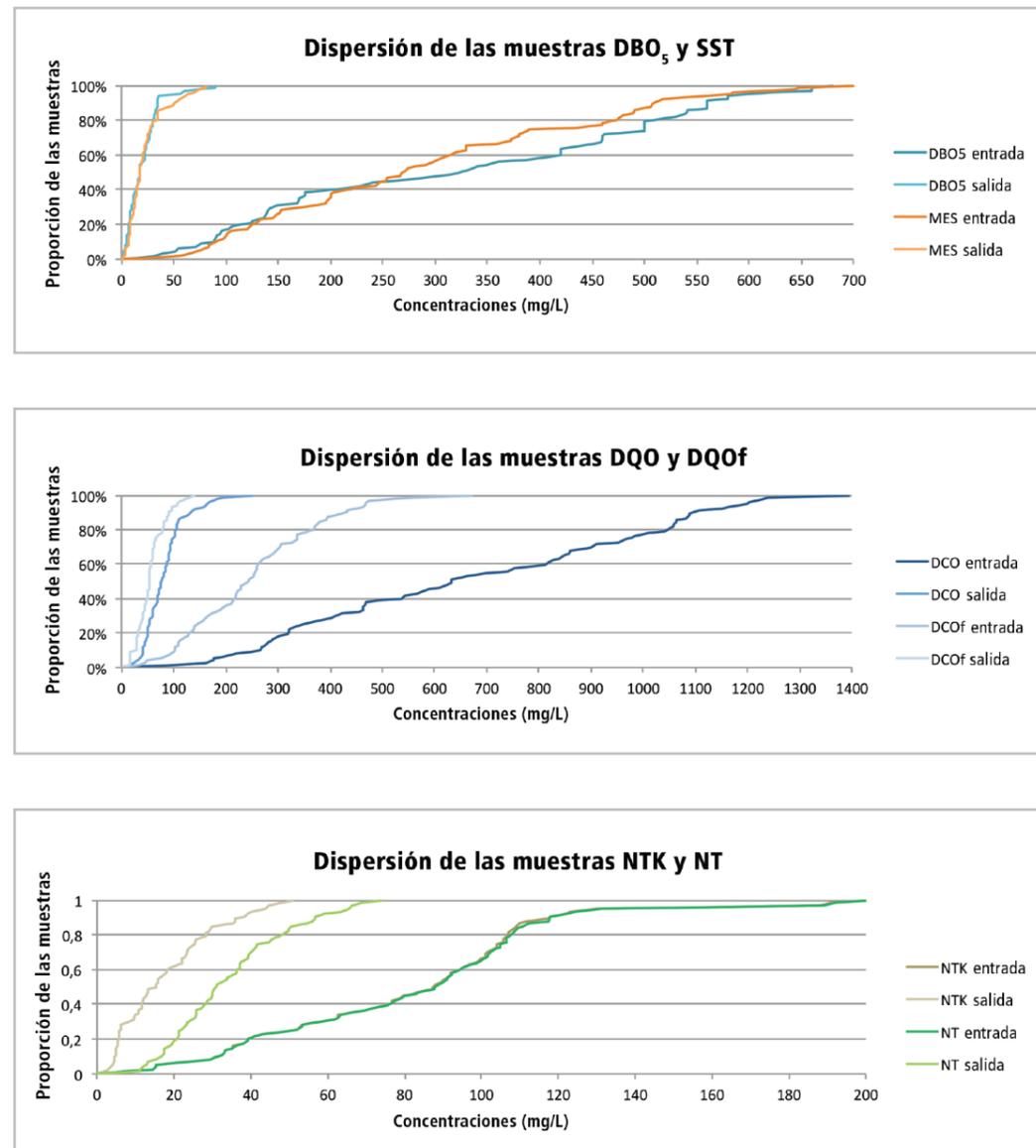


Figura 15. *Dispersión de los valores de las muestras en función de las concentraciones.*

La reducción del factor de dimensionamiento del sistema entre Francia Metropolitana y la zona tropical (parte 1.1 p. 12) plantea el problema de los límites del sistema: esta mejora de la capacidad ¿no se obtiene en detrimento de sus rendimientos o de la robustez del proceso?

En los gráficos de la Figura 16 se presentan las cargas tratadas en función de las cargas aplicadas al filtro en funcionamiento, lo que permite evaluar la calidad del tratamiento en función de las cargas aplicadas.

Para la DQO y las SST, las cargas obtenidas hasta ahora no permiten la apreciación de los límites de los filtros, ya que los rendimientos se mantienen estables incluso para valores por encima de la carga nominal. Para el NTK, en cambio, se observa que los rendimientos comienzan a degradarse a partir de 30 g/m²/d. Hasta 50 g/m²/d, la reducción parece superior a 60%, pero podría llegar a ser inferior por encima de este valor.

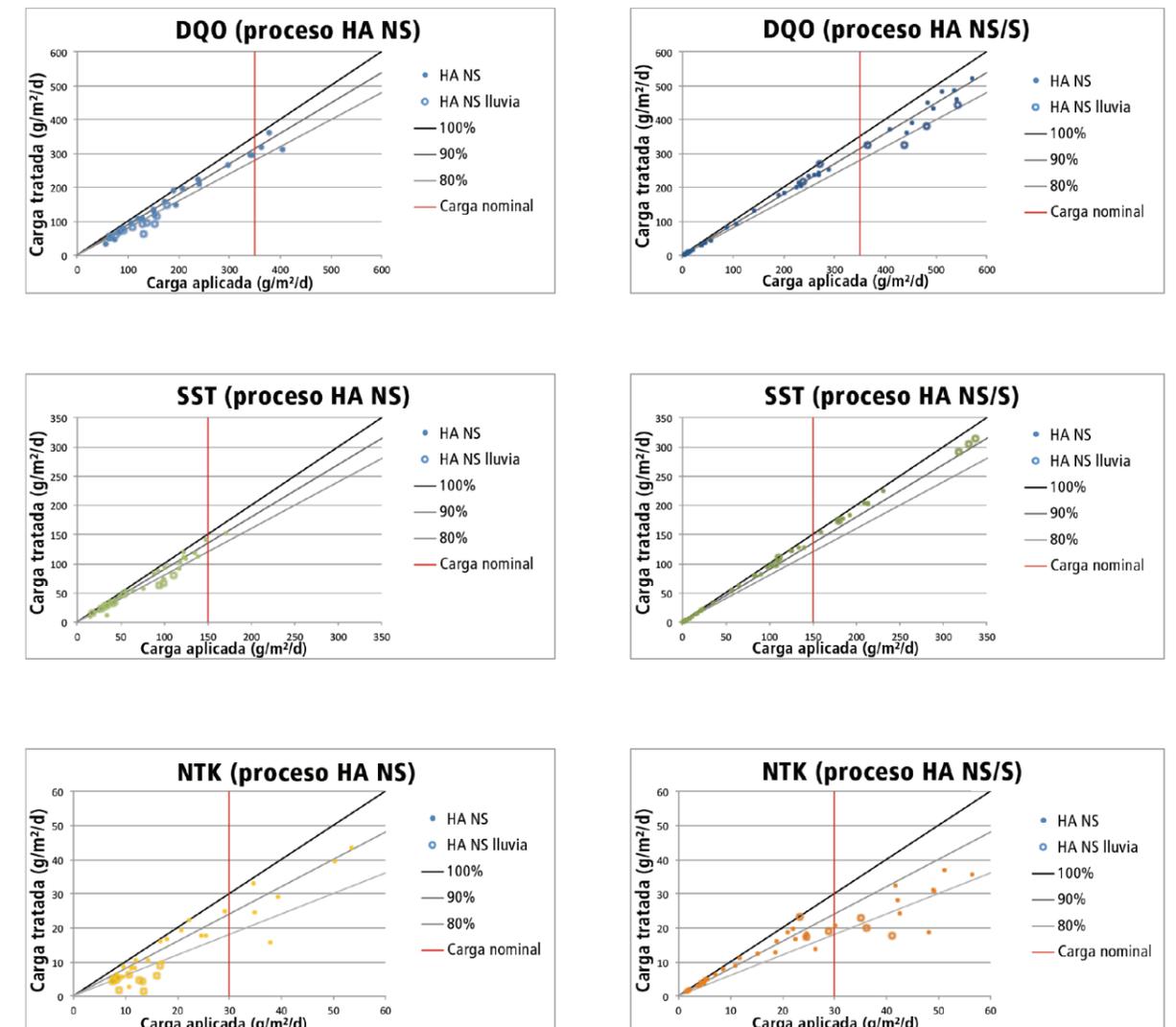


Figura 16. *Cargas tratadas en función de las cargas aplicadas para los parámetros DQO, SST y NTK para los dos tipos de procesos. Las rectas grises representan los valores de referencia para los rendimientos depurativos.*

Estos gráficos permiten, además, evaluar el impacto de los períodos de lluvia y de las sobrecargas hidráulicas correspondientes: independientemente de la carga aplicada, los rendimientos menos buenos se observan en los períodos de lluvia. Esto se explica principalmente por dos razones: primero, como se muestra en el Cuadro 2, durante los episodios lluviosos los efluentes son diluidos. No es posible mantener un tratamiento elevado con efluentes diluidos, ya que esto implicaría descender hasta concentraciones muy bajas, más allá de los límites biológicos o químicos. Así mismo, las sobrecargas hidráulicas traen consigo una disminución de los intercambios gaseosos entre el filtro y la atmósfera (encharcado* prolongado), y a la vez, una reducción del tiempo de residencia de las aguas residuales en el sistema. Las sobrecargas hidráulicas aproximan el sistema a sus límites.

En estos gráficos no se observa diferencia notable entre los sistemas. Las cargas recibidas en las estaciones de flujo vertical insaturado son bajas y se mantienen inferiores a la carga nominal. En esta zona de confort, los rendimientos son muy buenos, independientemente del sistema considerado. Sin duda es fuera de ésta en donde pueden haberse observado diferencias. Por otra parte, en lo que concierne al NTK, los rendimientos de las estaciones de flujo vertical insaturado son heterogéneos. Dado que el número de sistemas estudiados es reducido, cualquier conclusión podría ser aventurada.

Las reglas de dimensionamiento del sistema tropical permiten garantizar un nivel de tratamiento estable, incluso en caso de sobrecarga orgánica del sistema (hasta 165% de la carga nominal en Taupinière). En este caso, hubiera sido posible reducir más la superficie de los filtros. Sin embargo, durante los episodios de lluvia, tal y como ocurre para otros sistemas, los resultados de los HA en cuanto a los rendimientos depurativos, se reducen porque las concentraciones son más bajas. Para garantizar altos rendimientos incluso en caso de sobrecarga hidráulica, se ha determinado que no conviene reducir la superficie por debajo de 0,8 m²/HE.

1.5.3 Rendimientos de los HA a la escala del proceso global

Después de haber descrito los rendimientos de cada uno de los sistemas, resulta interesante evaluar los rendimientos de las estaciones en su globalidad, es decir, para las diferentes configuraciones de HA o en caso de combinación de procesos.

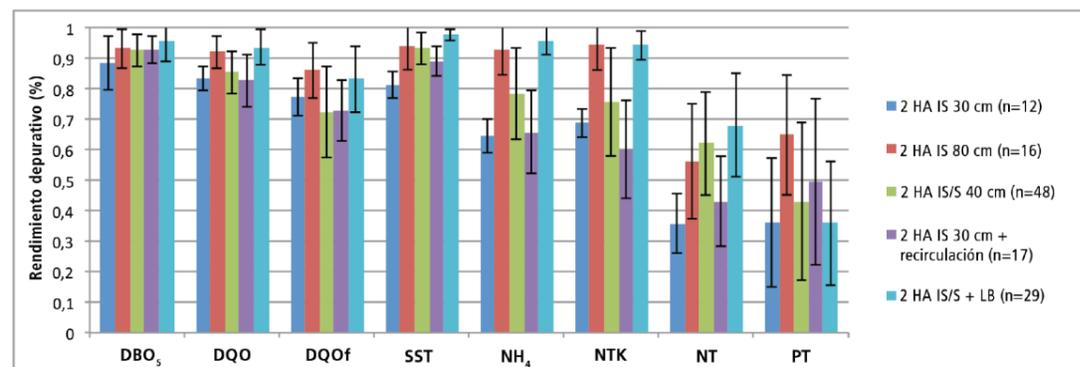


Figura 17. Comparación de los rendimientos de las diferentes configuraciones de los humedales artificiales (HA). Las barras negras verticales representan la incertidumbre (desviaciones típicas). IS: insaturado; IS/S insaturado/saturado; B: lecho bacteriano.

Tratamiento del fósforo

Ninguna de estas configuraciones ha sido diseñada para el tratamiento del fósforo. Sin embargo, la fase particulada quedará atrapada en la capa de lodos, y el tratamiento de la parte disuelta se limita al del metabolismo bacteriano (disminución de aproximadamente 2% de la carga de DBO₅) y a fenómenos de adsorción en los materiales que componen el lecho. La capacidad de adsorción de la gravilla no se regenera y disminuye con el tiempo. Así, los rendimientos sobre el fósforo pueden ser importantes en los primeros meses (incluso años) de vida de la estación (> 70%), para disminuir y estabilizarse posteriormente en torno a un 30-40%.

En la Figura 17 se presenta el factor de reducción de los principales parámetros de calidad de agua para las diferentes configuraciones estudiadas en los DFU. La configuración que incluye dos etapas de tratamiento de filtros verticales en serie (2HA IS/S + 2HA IS en Mansarde Rancée) no ha sido integrada debido a la falta de representatividad de los datos, ya que la tasa de carga de la estación era demasiado baja (10% en promedio).

El tratamiento de la polución carbonada es muy bueno, independientemente de la configuración elegida (factor de reducción superior al 80%).

Los SST son, en cambio, peor retenidos en los filtros verticales insaturados con poca altura de capa filtrante con respecto al resto. Con rendimientos mínimos superiores al 75%, los rendimientos mínimos del decreto de 2015 quedan sólidamente garantizados. La instalación de un fondo saturado o de una altura de materiales de filtración más importante, permite rendimientos muy estables y, por lo general, superiores al 90%.

En lo que se refiere al tratamiento del nitrógeno, con las configuraciones más simples la nitrificación está limitada a un 50-60%. El aumento de la altura de la capa filtrante y la instalación de un sistema de aireación intermedio mejoran significativamente la nitrificación. El fondo saturado permite el desarrollo de procesos anaeróbicos y la desnitrificación, y, en consecuencia, el factor de reducción es más importante para el nitrógeno global.

En cualquier caso, estos resultados deben ser relativizados considerando el escaso número de estaciones o de balances para algunas de las configuraciones (existe una única estación equipada con una capa filtrante de 80 cm).

Las configuraciones con dos etapas de tratamiento permiten mantener requisitos de vertidos importantes: 90% de factor de reducción en DBO₅, DQO, SST y NTK o 20 mg/L DBO₅, 125 mg/L DQO, 30 mg/L SST y 8 mg/L NTK. Los rendimientos de la segunda etapa son menores que en la primera etapa, pero siguen siendo indispensables para alcanzar rendimientos de depuración exigentes.

Para mayor detalle

En relación con lo observado en Francia Metropolitana, los rendimientos alcanzados por un HA IS con 30 cm de capa filtrante son comparables a los de la primera etapa de tratamiento de los FPR, incluyendo todas las alturas de filtración (Molle, et al., 2005, Morvannou, et al., 2015). La configuración a 80 cm, presenta factores de reducción equivalentes e incluso superiores a los de los sistemas metropolitanos de dos etapas, para el NTK.

Por último, la configuración con un nivel IS/S alcanza rendimientos comparables a lo observado en Francia Metropolitana para el carbono y los SST, y niveles levemente superiores para el NTK y NT (Morvannou, et al., 2017).

Diseño: objetivos de tratamiento, cargas a tratar y estrategia

2

Durante el diseño de una estación de tratamiento de aguas residuales, la primera preocupación es la de seleccionar el punto de vertido de la estación, lo que determinará la calidad que deben alcanzar las aguas tratadas. Los valores límites de emisión orientarán la elección del sistema de tratamiento a implementar. Se propondrá, más adelante, un cuadro de toma de decisiones para ayudar a elegir entre las diferentes variantes de HA. El problema de la población que se conectará a la red y el ritmo de la puesta en funcionamiento previsto, condicionarán la capacidad de tratamiento de la obra, su diseño y las eventuales fases del proyecto.

2.1. Requisitos del vertido

2.1.1 Exigencias reglamentarias

Además de las exigencias complementarias que pueden ser impuestas por el medio receptor, los requisitos de vertido han sido fijados por el decreto del 21 de julio de 2015 (según la reglamentación francesa). En el Cuadro 4 se retoma el anexo 3 del decreto, y se presentan los rendimientos mínimos de las estaciones de tratamiento de aguas residuales que deben tratar una carga bruta superior o igual a 1,2 kg/d de DBO₅ (lo que corresponde a una carga de 20 HE).

Los resultados deben alcanzarse en cuanto a concentración o a rendimiento. Sin embargo, más allá de determinadas concentraciones, dichas redhibitorias, el balance es declarado no conforme independientemente de los rendimientos asociados. En caso de balance no conforme, deben realizarse (y validarse) un determinado número de campañas adicionales en el año para eliminar la no conformidad.

Cuadro 4. Rendimientos mínimos de tratamiento esperados para los parámetros DBO₅, DQO y SST definidos por el decreto del 21 de julio de 2015

Parámetro	CARGA BRUTA de polución orgánica recibida por la estación en kg/d de DBO ₅	CONCENTRACION máxima a respetar, promedio diario	RENDIMIENTO MINIMO requerido, promedio diario	CONCENTRACION redhibitoria, promedio diario
DBO ₅	< 120	35 mg (O ₂)/L	60 %	70 mg (O ₂)/L
	≥ 120	25 mg (O ₂)/L	80 %	50 mg (O ₂)/L
DQO	< 120	200 mg (O ₂)/L	60 %	400 mg (O ₂)/L
	≥ 120	125 mg (O ₂)/L	75 %	250 mg (O ₂)/L
SST	< 120	/	50 %	85 mg/L
	≥ 120	35 mg/L	90 %	85 mg/L

La reglamentación no prevé la obligación de tratamiento del nitrógeno y del fósforo en aquellas estaciones con capacidad inferior a 10 000 HE (600 kg/d DBO₅) cuando éstas se encuentran en zona sensible. En función del uso posterior de las aguas tratadas, los servicios de policía del agua (SPE) tienen la posibilidad de definir valores límites de emisión de contaminantes más exigentes en el decreto prefectoral de autorización de la estación de tratamiento.

2.1.2 El medio receptor

El punto de vertido de las aguas tratadas en el medio natural (masa de agua superficial, arroyo, emisario en el mar, infiltración, etc.) será el punto de partida de los trámites de la SPE para definir los requisitos de vertido.

El problema es muy sensible, porque los rendimientos depurativos que debe garantizar la estación provienen de los valores límites de emisión de contaminantes. Son siempre los últimos porcentajes del factor de reducción o mg/L los más difíciles – y los más caros – de alcanzar. Requisitos de vertido muy exigentes tienen repercusiones directas sobre el coste del proyecto.

En los casos en los que se requiere un tratamiento muy ambicioso, puede ser preferible explorar las alternativas de localización de la estación y encontrar así un medio receptor menos sensible, con el fin de tener valores límite de emisión de contaminantes menos exigentes. En determinados casos, es incluso más interesante revisar la zona de saneamiento de la población para recalificar algunas zonas como saneamiento no colectivo (ANC). Para mayor información, se aconseja remitirse a la nota sobre los requisitos de vertido realizados por el grupo de trabajo MEDDE-Epnac (2015).

Algunos requisitos pueden repercutir sobre otros parámetros. En los DFU, considerando la proximidad de playas y la importancia del sector turístico, frecuentemente se demanda un tratamiento complementario para los gérmenes patógenos. Con excepción del lagunaje natural, el factor de reducción de los patógenos necesita con frecuencia recurrir a un tratamiento terciario. Lo que se usa, por lo general, es un tratamiento con UV. Para que sea eficaz, es necesario que las concentraciones de SST en los efluentes sean inferiores a 25 mg/L. Garantizar permanentemente valores límite de emisión tan bajos en SST hace necesario adaptar este sistema (Cuadro 5, página siguiente). Por lo tanto, para el tratamiento de los patógenos, el sobre coste no está sólo vinculado con el módulo UV sino también con una reducción más extrema de los SST.

2.2. Elección del sistema a implementar

En el Cuadro 5 se sintetiza la información que va a orientar la elección entre las diferentes variantes de HA en función de las limitaciones del proyecto. Se presentan esencialmente las variantes que han sido evaluadas en los DFU hasta la fecha.

La configuración mínima es de una sola etapa con dos filtros en paralelo de 30 cm de capa filtrante. Permite alcanzar el mínimo exigido por el decreto de 2015 para las estaciones de menos de 2 000 HE. No es la más adecuada en caso de actividad intermitente (refugio, escuela, etc.), ya que la ausencia de efluentes a tratar sería perjudicial para las plantas. Tampoco permite el tratamiento de los gérmenes patógenos por un módulo UV, dado que no puede garantizar vertidos de concentración inferior a 25 mg/L de SST de manera permanente.

Cuadro 5. Síntesis de la información para la selección de las variantes de humedales artificiales (HA) a implementar.

Variantes de HA	Autonomía eléctrica (salvo limitaciones topográficas)	Red unitaria	Actividad intermitente	Área requerida	Rendimientos de tratamiento garantizados: factor de reducción % (concentraciones límites mg/L)				Tratamiento de gérmenes patógenos (módulo UV)
					DQO	SST	NTK	NT	
2 HA NS capa filtrante 30 cm	✓	✓	✗	0,8 m ² /HE	75 % (125 mg/L)	80 % (50 mg/L)	60 % (40 mg/L)	20 % (60 mg/L)	✗
2 HA NS capa filtrante 30 cm + recirculación	✗	✓ (lámina de agua diaria < 70 cm)	✓ (atención al consumo eléctrico)	0,8 m ² /HE	75 % (125 mg/L)	85 % (30 mg/L)	60 % (40 mg/L)	20 % (60 mg/L)	✗
2 HA NS/S capa filtrante 30 cm	✓	✓	✓	0,8 m ² /HE	85 % (125 mg/L)	90 % (25 mg/L)	60 % (40 mg/L)	50 % (50 mg/L)	✓
2 HA NS capa filtrante 80 cm	✓	✓	✓ posible si hay recirculación	0,8 m ² /HE	90 % (100 mg/L)	90 % (25 mg/L)	80 % (15 mg/L)	20 % (60 mg/L)	✓
2 HA NS/S + 2 HAV	✓	✓	✓ posible si hay recirculación (estrés hídrico en la segunda etapa)	1,6 m ² /HE	90 % (75 mg/L)	95 % (15 mg/L)	90 % (6 mg/L)	70 % (35 mg/L)	✓
2 HA NS/S + LB	✗	✓	✓	0,9 m ² /HE	90 % (75 mg/L)	95 % (15 mg/L)	90 % (6 mg/L)	70 % (35 mg/L)	✓
2 HA NS + HAh	✓	✓	✓	1,8 m ² /HE	85 % (125 mg/L)	90 % (25 mg/L)	70 % (20 mg/L)	70 % (35 mg/L)	✓

✓ = possible ✗ = not possible

Añadir un circuito de recirculación permite asegurar la calidad de los vertidos en cuanto a los SST y alcanzar, así, el mínimo exigido por el decreto de 2015 para las estaciones de más de 2 000 HE (< 35 mg SST/L), sin embargo, requiere la instalación de un pozo de bombeo. Si la red es unitaria, la tasa de recirculación debe poder ajustarse fácilmente en caso de chubascos de manera a no amplificar la sobrecarga hidráulica vinculada a los períodos de lluvia.

El circuito de recirculación garantiza, en cambio, la presencia de agua en la estación incluso en caso de actividad intermitente. La tasa de recirculación debe estar bien ajustada: durante esos períodos de inactividad, los consumos eléctricos no se corresponden ya con los del tratamiento de los efluentes sino al riego de las plantas en los filtros. Incluso mejorados, los rendimientos en los SST no permiten asegurar el buen funcionamiento de un módulo UV.

La implementación de un fondo saturado permitirá superar el límite de 25 mg/L de SST y así asegurar la desinfección a través de un módulo UV. La zona anaeróbica elimina los nitratos y mejora los vertidos con respecto al nitrógeno total. En ausencia de efluentes, las plantas recuperan el agua de la zona saturada y la estación puede entonces quedar completamente detenida.

El aumento de la altura de la capa filtrante hasta 80 cm con la instalación de una red de aireación intermedia a 40 cm permite alcanzar un 90% de factor de reducción y 100 mg/L en DQO, 85% y 15 mg/L en NTK y superar la barrera de los 25 mg/L de SST.

Una segunda etapa de tratamiento puede ser necesaria para garantizar valores límites de emisión de contaminantes muy bajos. Aquí, una vez más, existen múltiples configuraciones posibles. No todas las configuraciones han podido ser estudiadas. Por ejemplo, instalar un fondo saturado bajo un filtro con 80 cm de capa filtrante parece prometedor, y podría llegar a alcanzar excelentes resultados: 90% de factor de reducción en DQO y en SST, 85% en NTK y 60% en NT.

Para mayor detalle

Para esta última configuración (80 cm IS/S), dado que la desnitrificación es consumidora de carbono, es posible que una reducción muy extrema de la carga de carbono debido a la acción de la parte no saturada del filtro, provoque una relación C/N limitante para la desnitrificación.

2.3. Estimación de las cargas a tratar

Las cargas recibidas por las estaciones son, por lo general, inferiores al 50% de la carga nominal, tanto en los DFU como en Francia Metropolitana. Esta constatación se explica por una mala estimación de las cargas a tratar, y por una previsión sobreestimada del crecimiento demográfico de la población.

La estimación de las cargas a tratar es un ejercicio delicado, incluso en los casos de proyectos inmobiliarios con propietario privado donde el número de viviendas está, sin embargo, perfectamente controlado. A menudo el propietario no tiene ningún medio de conocer la carga, porque la red no ha sido todavía construida. Dado que la duración de una estación es de 25 años como mínimo, la estimación se basa en el hábitat construido y en las impactantes proyecciones demográficas del INSEE: el crecimiento demográfico previsto para todos los DFU juntos es de un 34,6% para el periodo comprendido entre 2011 y 2030, contra el 5,1% de toda la población francesa (Richez, 2011). Estas previsiones deben relativizarse, ya que, por ejemplo, en 2016 la población de la Martinica disminuyó en un 1%, mientras que el INSEE prevé un crecimiento de 7,5% para 2030 con respecto a 2011.

Más allá de las proyecciones demográficas y con el objetivo de hacer confiables las estimaciones de las cargas a tratar, sería interesante recordar la diferencia entre habitante y equivalente-habitante, los coeficientes de corrección utilizados para definir las capacidades de los establecimientos colectivos (escuela, hotel, etc.) para, finalmente, recordar la posibilidad que ofrecen los HA de establecer distintas fases en los proyectos.

2.3.1 Definición del HE tropical

La capacidad de tratamiento de una estación se expresa en habitante-equivalente (HE). La directiva europea del 21 de mayo de 1991 define el HE como “la carga orgánica biodegradable que tiene una demanda bioquímica de oxígeno en 5 días (DBO₅) de 60 gramos de oxígeno diarios”.

La polución real emitida por una persona cambia en función del contexto, pero se sitúa más bien entre 40 y 50 g DBO₅/d. La guía ERU del MEDDE (Morin, *et al.*, 2013) considera que “en las pequeñas comunidades sin actividad industrial, un habitante produce 40 g de DBO₅/d”. En esas condiciones, **asimilar el habitante al HE se traduce en la práctica en un sobredimensionamiento de la estación de un 50%**.

La constatación es idéntica en los DFU y ha llevado al Sindicato Intercomunal del Agua y Saneamiento de Mayotte (SIEAM) a definir el HE de Mayotte, 1 HEm = 0,75 HE. Si bien tiene al menos la ventaja de tomar en cuenta la diferencia entre habitante y HE, el HE produce confusión al dar la impresión de que existe una diferencia verificada entre la carga orgánica producida por un habitante de Mayotte y uno de la metrópoli.

Mercoiret (2010) analizó los resultados de más de 10 000 balances de materia de 24 horas realizados en más de 2 700 estaciones de menos de 2 000 HE en Francia Metropolitana. En dicho estudio calculó un cierto número de factores (p. ej., DQO/DBO₅), que presentan la ventaja de ser representativos de las aguas residuales brutas del medio rural, al mismo tiempo que son poco dependientes de la tasa de carga de la estación. Al aplicar esos factores a la definición del HE, se pueden entonces definir las cargas equivalentes a un HE para los diferentes contaminantes (Cuadro 6).

Este mismo trabajo se está realizando actualmente a partir del conjunto de datos de monitoreo generados en los DFU desde 2012. Nuestra base de datos incluye más de 9 500 balances de materia de 24 horas realizados en todo el parque de estaciones de ultramar*. Este estudio permite definir el HE tropical en su globalidad, que puede no ser necesariamente representativo de las aguas residuales brutas en zona rural (los efluentes industriales de las grandes aglomeraciones urbanas están incluidos en la muestra).

También resulta pertinente considerar los modos de vida de determinadas comunidades étnicas.

En Guyana o en Mayotte en particular, algunas comunidades (conectadas con el sistema colector público), por tradición, lavan la ropa o cocinan fuera de la vivienda, lo que representa una fracción de efluentes no recolectados. En estos casos tan específicos, se solicita a la empresa proyectista adaptar, de acuerdo con su conocimiento social del terreno, los coeficientes para que acerquen la estimación de las cargas contaminantes a la realidad.

Cuadro 6. Comparación del HE metropolitano y tropical para pequeñas comunidades (< 2 000 HE). El valor entre paréntesis corresponde al valor calculado; los valores mostrados son valores redondeados (Datos Francia Metropolitana según Mercoiret 2010)

Parámetro	DBO ₅ (gO ₂ /d)	DQO (gO ₂ /d)	NTK (gN/d)	NH ₄ (gN/d)	PT (gP/d)	SST (g/d)
HE rural metropolitano	60	150 (157,2)	15 (15,5)	11 (11,5)	2,5 (2,1)	75 (72)
HE tropical (todos los tamaños)	60	125 (127,5)	15 (13,5)	11 (10,25)	2,5 (1,85)	75 (66,9)

A excepción del valor de la DQO, para el cual la diferencia entre el HE metropolitano y el tropical es superior al 20%, para el resto de parámetros las diferencias son muy bajas y no son significativamente diferentes en cuanto a la dispersión de los valores de la muestra se refiere. Lo que es perfectamente normal: el metabolismo humano es idéntico en todas partes.

En cambio, los hábitos de consumo pueden generar variaciones en la polución de origen químico (DQO, PT). La diferencia constatada en la DQO está, sin duda, subestimada por el hecho de que la evaluación del HE tropical comprende también los balances realizados en estaciones urbanas donde está incluida la polución de origen industrial, rica en contaminantes químicos. Podría decirse entonces que la población de los DFU produce menos polución de origen químico que la zona rural metropolitana.

El diseño de los sistemas de saneamiento se apoya sobre los valores de este cuadro.

2.3.2 Coeficientes de corrección para el dimensionamiento del sistema

La circular del 22 de mayo de 1997 relativa al saneamiento no colectivo, aporta coeficientes correctores en función del tipo de instalación (Cuadro 7). A falta de estudios más recientes, éstos se utilizan todavía en la actualidad para estimar las cargas de pequeños establecimientos colectivos.

Son valores de referencia que deben ser adaptados por el director del proyecto en función de la realidad del terreno.

Cuadro 7. Coeficientes correctores para evaluar la capacidad de pequeños colectivos, según la circular del 22 de mayo de 1997

Parámetro	Coefficiente corrector
Uso permanente	1
Escuela (pensionado), regimiento o casa de reposo	1
Escuela (media pensión) o similar	0,5
Escuela (externado) o similar	0,3
Hospital, clínica, etc. por cama (incluyendo personal de salud y de explotación)	3
Personal de planta industrial (por puesto de 8 hrs.)	0,5
Personal de oficina y tiendas	0,5
Hotel-restaurante, pensión de familia (por habitación)	2
Hotel, pensión de familia sin restaurante, por habitación	1
Terreno de camping	0,75 à 2
Usuarios ocasionales (lugar público)	0,05

A veces se encuentran disponibles referencias interprofesionales de este tipo para determinadas actividades específicas.

2.3.3 Fases temporales de los proyectos

Cuando existen grandes incertidumbres con respecto a la estimación de las cargas a tratar (proyección demográfica, conexiones de red hipotéticas, inicio de una actividad turística), es posible dividir el proyecto en varias fases para ajustar las inversiones a la evolución de las necesidades.

Los HA pueden evolucionar fácilmente (Figura 18):

- creando una segunda línea* de aguas, en paralelo a la primera, lo que requiere una evolución de la capacidad del sistema de alimentación o la instalación de un juego de válvulas automáticas para alimentar las dos filas;
- construyendo sólo uno de los dos filtros inicialmente previstos, y dividiéndolos. La separación puede ser más o menos definitiva (muro, Onduline, etc.); lo importante es que las capas filtrantes de las dos mitades del filtro estén hidráulicamente separadas para respetar estrictamente los períodos de reposo. Hay que prever, asimismo, la división del sistema de alimentación para poder instalar la alternancia.

Independientemente de la solución escogida, es importante prever la extensión de terreno necesaria para la ampliación.

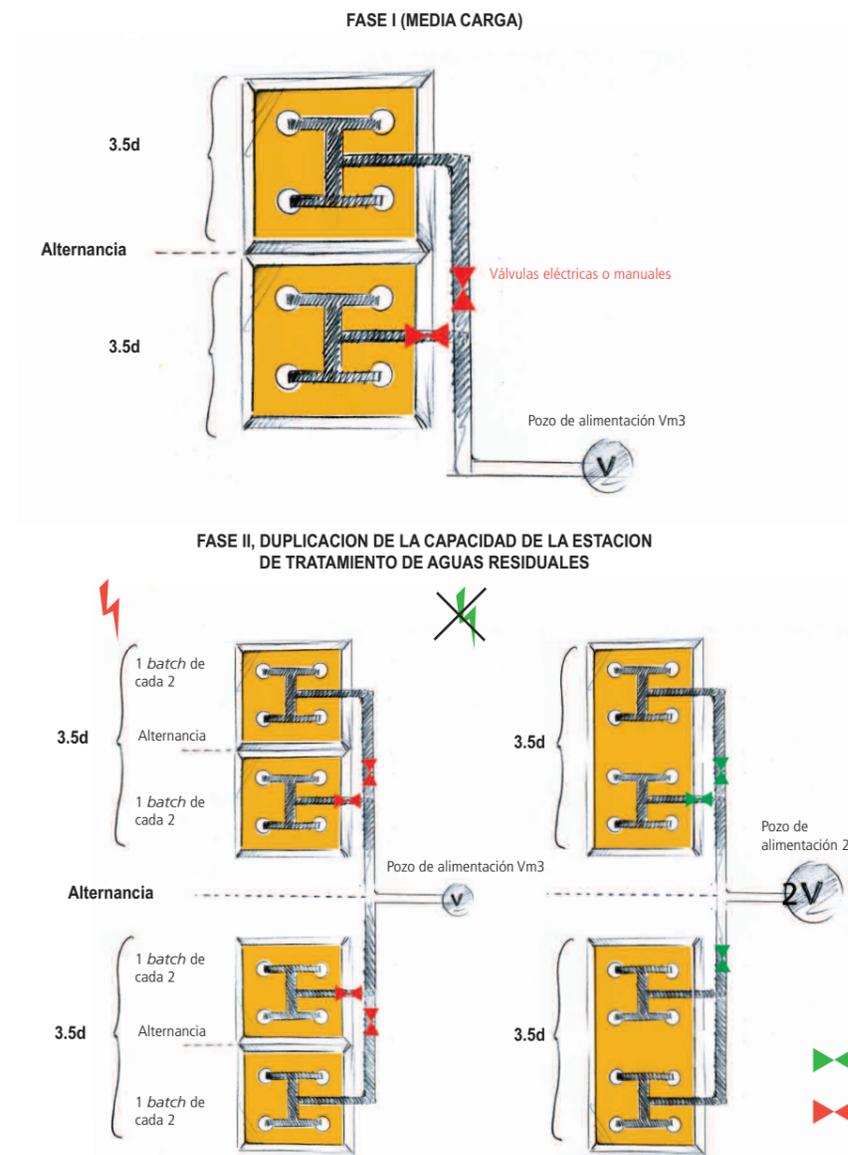


Figura 18. Fases de un proyecto de construcción de un filtro plantado con vegetales (HA) por división o adición de una nueva línea de agua.

Del mismo modo, una vez realizados los filtros es posible poner en servicio una sola parte, lo que permite economizar en gastos de explotación.

Por un coste modesto, es posible dividir cada compartimiento con planchas Onduline y colocar bridas en el sistema de alimentación para aislar los puntos de alimentación no utilizados (Figura 19).

Puede ser útil adoptar disposiciones para controlar el poblamiento vegetal de plantas adventicias* en los filtros no utilizados. En Guyana, un compartimento virgen puede convertirse en un año en un verdadero bosque arbustivo. Incluso si el desarrollo vegetativo es más lento en otros DFU, se recomienda cubrir el filtro no utilizado con un geotextil permeable y asegurar un control y mantenimiento regulares, si así fuera necesario. Permitir un desarrollo vegetal indeseable sería perjudicial para la futura puesta en servicio, creando grandes limitaciones al desarrollo de las plantas del filtro dada la competencia con las plantas adventicias residuales: sus redes radiculares, las semillas dispersadas, etc.



Figura 19. Ejemplo de división en la estación de Taupinière (Martinica).

En primer plano, el filtro se ha dividido utilizando planchas Onduline. Se instaló una brida para aislar los puntos de alimentación que llegan a la mitad del filtro que no está en servicio. Detrás, los compartimentos que forman la segunda línea de aguas de la estación no están en servicio y no han sido plantados.

Reglas de dimensionamiento y materiales

3

Una vez que se ha seleccionado el sistema de tratamiento, se definen las características de las diferentes unidades que lo componen utilizando factores de dimensionamiento. Estos factores permiten obtener la superficie de los filtros que se utilizará a su vez para calcular el volumen del sistema de alimentación, y la configuración de la red de alimentación y drenaje. En este capítulo se presentan también las características de los diferentes materiales utilizados en cada una de las unidades del sistema.

3.1. Protección de las instalaciones

Independientemente de la variante de HA elegida, la alimentación se hace con aguas residuales brutas y, por lo tanto, no se lleva a cabo un pretratamiento de las aguas residuales domésticas. No obstante, es necesario realizar un desbaste o cribado para proteger las instalaciones (canalizaciones y equipos) y para asegurar que no se presentan obstáculos para el flujo de las aguas en la estación. Esto es, además, una obligación reglamentaria³.

Teóricamente, las velocidades de paso a través de las rejillas deben estar comprendidas entre 0,3 y 1,2 m/s, de manera que se evite que las materias más pesadas se depositen en el canal, así como el paso de objetos voluminosos flexibles (p. ej., botellas de plástico).

En la práctica, el cribado puede realizarse en el canal de alimentación, ya sea manual o automático, y en el caso de que la alimentación se haga mediante un pozo de bombeo, puede estar integrado a este último (cesta de desbaste). La elección del equipo electromecánico debe contemplar las exigencias climáticas, puesto que el clima tropical tiende a degradar prematuramente las piezas de desgaste y las partes oxidables. La protección contra el sol y el agua será siempre beneficiosa a largo plazo.

En todos los casos, el sistema de cribado debe cumplir las siguientes condiciones:

- un **entrehierro de 20 a 40 mm** (en el caso de un entrehierro de 20 mm, el desbaste debe ser automático);
- un **canal de derivación, que debe preverse en caso de** obstrucción del enrejado;
- una herramienta de raspado adaptada al entrehierro;
- un **tanque de escurrido** y almacenamiento de residuos del cribado.

³- Artículo 22 del decreto del 21 de junio de 1996.

3.2. Dimensionamiento de los filtros

3.2.1 Factores de dimensionamiento

El dimensionamiento de los HA está basado en las cargas admisibles sobre el filtro en operación. Se utiliza un factor de dimensionamiento de 350 g DQO/m²/d que se aplica sobre el filtro en servicio. Las cargas admisibles están consignadas en el Cuadro 8. Éstas permiten la implementación de filtros de una superficie unitaria cercana a 0,4 m²/HE para aguas residuales domésticas clásicas.

Sin embargo, conviene precisar que el dimensionamiento **se hace sobre la base de las cargas aplicadas y no de la superficie por HE**. El uso de la superficie como parámetro de diseño puede llevar a dimensionamientos erróneos según las características de las aguas a tratar (por ejemplo, la presencia de un sector de actividad concreto en el territorio de la comunidad). Por ello, cuando los datos están disponibles, conviene verificar las superficies obtenidas a partir de estas relaciones para cada uno de los parámetros, especialmente para la carga hidráulica, que puede llegar a ser muy alta en los DFU (parte 1.5.1 p. 21).

Cuadro 8. Cargas de dimensionamiento del filtro en operación para un filtro de flujo vertical de drenaje libre en la primera etapa de tratamiento

Parámetro	SST	DQO	DBO ₅	NTK	CH (m/d)
g/m ² /d	150	350	150	30	< 0,75

El límite de carga hidráulica incluye también las cargas regulares no vinculadas a períodos de lluvia (por ejemplo, las aguas claras parásitas). Prost-Boucle y Molle (2012) indicaron que para valores superiores a 75 cm/d, los rendimientos de la nitrificación disminuyen en invierno. Por esto, incluso en clima tropical, se aconseja ajustar la superficie de los filtros para mantener la lámina de agua clara aportada cada día al filtro por debajo de ese límite. En caso de recirculación, la carga hidráulica admisible del filtro en operación debe tener en cuenta el volumen de agua recirculado.

Ejemplos de dimensionamiento

Ejemplo 1: creación de una urbanización

La promotora de un complejo urbano de 40 viviendas, que teóricamente representan unos 180 habitantes, desea instalar un sistema de saneamiento mediante HA. Como no es posible realizar una campaña de mediciones en la red puesto que todavía no se ha construido, el dimensionamiento se basará en la definición de HE y en los datos teóricos promedio de producción de aguas residuales (parte 2.3.1 p. 32): 45 g DBO₅/hab/d.

180 hab x 45 g DBO₅ hab/d → 8 100 g DBO₅/d

8 100 g DBO₅/d / 60 g DBO₅/HE/d → 135 HE

135 HE x 0,8 m²/HE → 108 m²

En ausencia de datos de campo, el dimensionamiento a partir de valores teóricos resulta en la instalación de dos filtros de 54 m² para una superficie total de 108 m².

Ejemplo 2: rehabilitación de lodos activados

Después de constatar pérdidas de lodos repetidas debido a sobrecargas hidráulicas (episodios lluviosos) en una de las unidades de lodos activados, la comunidad desea reemplazar uno de los tanques por un HA. Los valores promedios de las últimas mediciones son los siguientes: 220,8 m³/d, 344,6 mg DQO/L, 163 mg DBO₅/L.

344,6 mg DQO/L x 220,8 m³/d → 76 088 g DQO/d

76 088 g DQO/d / 350 g DQO/m²/d → 217,5 m²

Sobre la base del flujo de DQO a tratar, son necesarios dos compartimientos de 217,5 m². A continuación, se debe verificar que esta superficie sea suficiente para el tratamiento de los otros parámetros.

163 mg DBO₅/L x 220,8 m³/d → 35 990 g DBO₅/d

35 990 g DBO₅/d / 150 g DBO₅/m²/d → 240 m²

220,8 m³/d / 217,5 m² → 1,02 m/d

220,8 m³/d / 240 m² → 0,92 m/d

220,8 m³/d / 0,75 m/d → 294,5 m²

En este ejemplo, debido a un desequilibrio (DQO/DBO₅) y a una importante dilución de los efluentes (se sospecha de la existencia de aguas claras parásitas), el dimensionamiento obtenido a partir del flujo de DQO no permite tratar la carga de DBO₅ ni aceptar las cargas hidráulicas. Es el parámetro limitante el que impone el dimensionamiento (en este caso, la carga hidráulica). Se aconseja, por tanto, realizar dos filtros de 295 m².

3.2.2 Tipo de construcción

Existen dos tipos principales de construcción: los tanques de hormigón o la zanja enterrada. Por razones de coste se elige a menudo el segundo. La superficie ocupada en el suelo es algo más importante debido al talud. La superficie calculada corresponde a la superficie en el punto más alto del relleno del filtro. En algunas configuraciones (altura de filtración importante, fondo saturado), es preferible aumentar al máximo la pendiente de los taludes, en particular si los filtros son pequeños, lo que permite mantener un volumen adecuado para el desarrollo de las bacterias autótrofas o para la zona anaeróbica.

La pendiente de los taludes es de 3 horizontal por 2 vertical en el caso de colocar una geomembrana; el ideal sería 1 por 1, pero su viabilidad depende de la calidad de los suelos.

Los tanques de hormigón tienen la ventaja de limitar la colonización del filtro por las plantas adventicias que vienen del exterior.

3.2.3 Altura de resguardo

La altura de resguardo, que se define como la distancia entre el nivel alto de la capa superficial del filtro y el punto alto del borde del filtro, debe determinarse para responder a dos objetivos:

- asegurar el almacenamiento de los lodos en la superficie, hasta 20 centímetros;
- contener las láminas de agua aplicadas en períodos de lluvia. En las regiones lluviosas de Francia Metropolitana, los filtros que tratan también el agua de lluvia (redes unitarias), tienen resguardos de 70 cm para limitar el número de sobrevertidos anuales (Arias López, 2013).

En la zona tropical se recomienda una altura de resguardo de 70 cm. Esto limitará el número de sobrevertidos, incluso cuando el sistema sea antiguo, y contará con 20 cm de lodos acumulados en la superficie.

Para economizar costes, se puede realizar una zanja común para los dos filtros en paralelo (Figura 20). En ese caso, se utiliza un tabique para separar ambos filtros. El tabique está anclado en los taludes que forman los bordes del filtro. Debe ser estrictamente impermeable para evitar transferencias de un filtro a otro, de manera que se respeten los períodos de reposo. Idealmente, la parte enterrada debe tener la altura de la capa de filtración, con un mínimo de 70 cm de resguardo en la superficie. Las capas de transición, el drenaje y la red de aireación pueden ser comunes.

La parte superior del tabique debe alcanzar como mínimo el nivel del resguardo.



Figura 20. Tabique de separación de 2 filtros en el mismo compartimento. Se advierte que el tabique podría haber sido un poco más alto (20-30 cm) para establecer una altura de resguardo más importante. Estación de Champ d'Ylang 1, durante su inauguración en noviembre de 2015, comuna de Combaní (Mayotte).

3.3. Unidades del sistema y red de alimentación

Con el fin de asegurar una buena oxigenación del lecho filtrante y una buena repartición de las aguas brutas, la alimentación de los filtros se hace con un caudal bastante superior al caudal que entra en la estación. Esta alimentación en discontinuo (*batch*) se hace desde un pozo que almacena los efluentes durante el tiempo necesario para acumular el volumen del *batch*, para luego ser enviado rápidamente, con un caudal importante, hacia el filtro en funcionamiento a través de la red de alimentación.

3.3.1 Características de la alimentación en discontinuo

De acuerdo con la topografía del lugar y con las decisiones técnicas (Cuadro 5), la alimentación puede ser por gravedad o accionada por una estación de bombeo. En todos los casos, esta alimentación en discontinuo debe presentar las siguientes características:

- enviar un volumen correspondiente a una lámina de agua de 2,5 a 5 cm sobre toda la superficie del filtro que está en alimentación. Si la lámina es inferior a 2,5 cm, no se produce encharcamiento y esto limita la repartición de los efluentes. Por encima de 5 cm, el tiempo de acumulación del *batch* en el pozo aumenta y, en consecuencia, puede generar molestias olfativas. Igualmente, si se crea un camino preferencial al interior del filtro demasiado importante, la velocidad de infiltración aumenta y esto afecta los rendimientos. En el caso de una alimentación mediante estación de bombeo, el volumen de los *batch* debe tener en cuenta el volumen muerto de las canalizaciones, volumen que volverá al pozo cuando se detengan las bombas;
- un caudal instantáneo superior a 0,5 m³/h/m² de filtro en alimentación. Este caudal de alimentación permite asegurar la autolimpieza de los conductos de alimentación y la buena repartición del efluente.

En estaciones de gran capacidad, los filtros tienen superficies importantes, lo que implica

generar *batches* con caudales de alimentación muy altos. En consecuencia, los equipos adecuados son costosos. Una manera de reducir este coste es instalando varias líneas de tratamiento en paralelo, con una sola unidad de alimentación. La superficie de los filtros alimentados es, por lo tanto, menor, y el volumen y el caudal de alimentación del *batch* quedan divididos por el número de líneas. En contrapartida, hay que instalar un sistema de electroválvulas controladas por autómatas, lo que permitirá alternar cada *batch* entre las líneas, o contar con varias bombas en el pozo de bombeo (una por cada línea como mínimo), que funcionarán alternativamente. Las fases de alimentación/reposo no varían (3,5 d/3,5 d).

Las electroválvulas reducen la robustez del sistema. Si el Agente Contratante hace esta elección técnica, deberá entonces contar con el personal competente que sea capaz de intervenir rápidamente en caso de avería.

3.3.2 Alimentación por gravedad

Existen tres tipos de dispositivos: los sifones autocebantes, las descargas de agua mediante válvula y las descargas de agua mediante tanque pendular. Las descargas de agua con válvula deben evitarse para las aguas residuales brutas (pero pueden utilizarse en la segunda etapa).

El dispositivo elegido es instalado en un tanque o pozo de almacenamiento de agua de capacidad igual al volumen deseado. La capacidad está determinada por el caudal instantáneo que puede entregar el dispositivo y que se calcula tomando en consideración las pérdidas de carga en la red de alimentación de la sección posterior. El vaciado del pozo debe ser completo para evitar que se acumulen depósitos en el fondo. En los DFU se han instalado diferentes tipos de pozos de alimentación que operan en discontinuo. Funcionan de manera satisfactoria y las piezas de desgaste son reemplazadas con frecuencias que se corresponden con lo indicado por el fabricante. Existe además la posibilidad de asociar al dispositivo un contador mecánico de *batches* de alimentación, y conocer así el número de *batches* diarios enviados durante un monitoreo.

3.3.3 Alimentación mediante estación de bombeo

Cuando la topografía o la presencia de un circuito de recirculación lo impone, la alimentación de los filtros se realiza a través de una estación o pozo de bombeo.

Este último está equipado con dos bombas que funcionan alternativamente. En caso de avería de una de ellas, puede mantenerse la alternancia de los filtros recurriendo a un juego de válvulas. Las bombas son, por lo general, activadas con flotadores de nivel. El diámetro mínimo de las canalizaciones y de las bombas es DN80. El volumen muerto perdido en las canalizaciones, y que vuelve al puesto después de cada alimentación, debe tomarse en cuenta para ajustar los niveles de activación de las bombas, con el fin de enviar el volumen adecuado al filtro en operación. También podría considerarse la instalación de válvulas anti-retorno; el inconveniente es que los efluentes pueden permanecer largo tiempo en las canalizaciones durante la alternancia.

También puede ser interesante instalar contadores horarios en las bombas, que una vez calibradas, permiten una evaluación bastante precisa de los volúmenes bombeados (una evaluación no es lo mismo que una medición según el decreto del 21 de julio de 2015; parte 5.4.2 p. 63).

3.3.4 Red de alimentación

Para optimizar la repartición de los efluentes en la superficie del filtro alimentado, el número de puntos de alimentación se determina de modo que se cuenta con, como mínimo, un punto cada 50 m² de filtro. Por razones de geometría, son por lo general en pares, incluso en múltiplos de 4. Una placa anti-derrubio* se coloca sobre el filtro verticalmente a cada punto de alimentación, de manera que se divide el flujo de aguas residuales y se protege el lecho (Figura 21).

En función del tipo de sistema de alimentación en discontinuo utilizado, las redes de alimentación son diferentes.

En el caso de una alimentación por gravedad, la red es aérea (Figura 21). Se puede inspeccionar en su totalidad y es desmontable. Debe realizarse en PHED o incluso en acero inoxidable para resistir los UV.

Si la alimentación se hace mediante una estación de bombeo, la red puede estar enterrada. Sólo debe protegerse del sol la parte terminal; el resto puede ser de PVC. La red adopta, por lo general, la forma de una doble H. Las canalizaciones tienen un diámetro decreciente, como mínimo DN100. La red está diseñada para vaciarse enteramente en cada entoldado, evitando así el estancamiento del agua, la acumulación de materias, la proliferación de olores o el riesgo de obstrucción. Las aguas residuales brutas deben circular en todos los puntos de la red con un caudal superior a 0,6 m/s-1 (velocidad de autolimpieza).



Figura 21. Red de alimentación aérea con la placa anti-derrubio (a la izquierda), o enterrada durante un batch de alimentación (a la derecha).

3.4. Red de aireación-drenaje

La red de drenaje está conectada en sus extremos con la atmósfera a través de tubos rectos que forman respiraderos, cubiertos con una campana. Es el camino que utiliza el aire contenido en el lecho y que es expulsado durante un *batch*. Es también gracias a ella que se realizan las transferencias por difusión desde el fondo del filtro (Petitjean, *et al.*, 2011). Por eso se denomina red de aireación-drenaje, ya que cumple ambas funciones.

La red se compone de tubos de PVC (con excepción de los respiraderos y de sus campanas), mínimo DN100, que presentan cortes de 1 cm de ancho cada 10 cm orientados hacia abajo en un tercio de la circunferencia del tubo (Figura 22). Se deben evitar los codos en ángulo recto. La utilización de tubos de una clase de resistencia alta (CR8) limitará los riesgos de deterioro durante las operaciones de mantenimiento pesado (extracción y limpieza del depósito generado en la superficie del filtro). No deben utilizarse canalizaciones de drenaje agrícolas dado que sus orificios son demasiado pequeños.

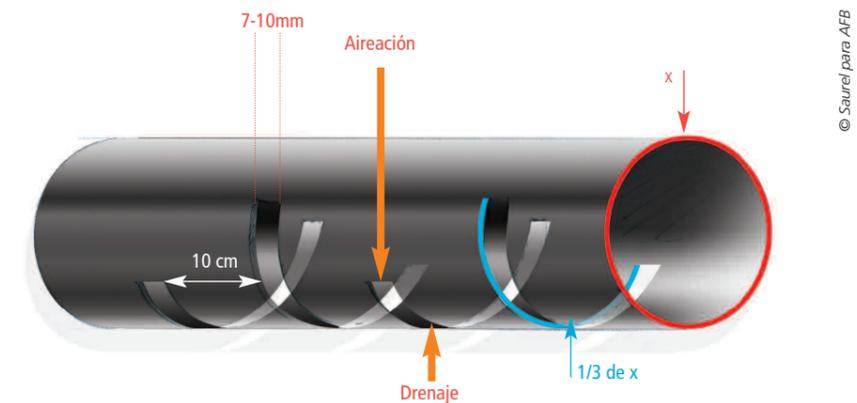
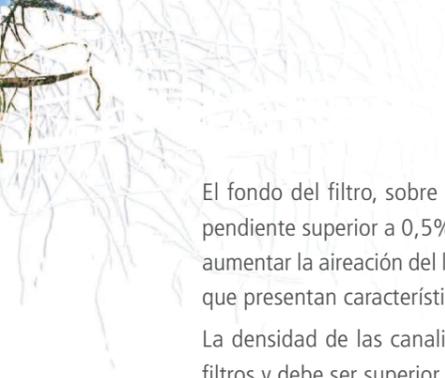


Figura 22. Esquema de las canalizaciones de aireación-drenaje.



El fondo del filtro, sobre el que descansa el colector principal de la red, presenta una pendiente superior a 0,5%. Según las configuraciones (capa filtrante > 50 cm, IS/S), para aumentar la aireación del lecho se instalan canalizaciones de drenaje a niveles intermedios que presentan características idénticas.

La densidad de las canalizaciones de drenaje se calcula a partir de la superficie de los filtros y debe ser superior a 0,25 m lineal por m² de filtro.

3.5. Estanqueidad y materiales

Compuesto de diferentes capas de gravilla, el lecho filtrante es aislado del suelo con un envoltorio artificial (geomembrana) o natural (suelo compactado).

3.5.1 Estanqueidad artificial, natural e infiltración

El fondo de los filtros es estanco gracias a un revestimiento sintético. Debe ser opaco, resistente a los UV y resistente a la perforación (rizomas y materiales), lo que exige añadir un geotextil por debajo y por encima de la geomembrana.

El Comité Francés de Geosintéticos (1991) recomienda para las membranas espesores mínimos en función de su composición. Espesores de 1 mm para el PVC y el PP (polipropileno), de 1,5 mm para el PEAD, y 1,14 mm para el EPDM. Se prohíbe una estanqueidad bituminosa porque es sensible a su perforación por rizomas. Estas recomendaciones fueron completadas por el Laboratorio de Puentes y Caminos/Setra (2000), que precisó las modalidades de ensamblaje, el recubrimiento de las bandas, las obras de ingeniería civil o las canalizaciones. La colocación de la geomembrana debe ser realizada por instaladores con certificación ASQUAL, en particular para la soldadura entre membranas.

La geomembrana debe cubrir las orillas hasta una altura por lo menos igual a la del resguardo y estar anclada en la parte alta. Las partes aéreas de la membrana en la cara interna de los taludes son protegidas de las radiaciones UV con una capa de gravilla de protección. Se recomienda verificar que se ha previsto un dispositivo de drenaje de gases bajo la membrana, así como prever medidas en caso de que suba el nivel de la capa freática, en función del contexto.

3.5.2 Materiales de relleno de los filtros

La calidad de los materiales de relleno de los compartimentos es fundamental para la duración del sistema. Los materiales deben tener una granulometría homogénea y lavarse de manera que presenten un contenido de partículas finas ($d < 63 \mu\text{m}$) inferior a 3% en masa. La presencia en exceso de granos finos puede llevar a una colmatación irreversible del fondo del filtro. La utilización de gravilla triturada o de materiales volcánicos requiere una atención particular para asegurar su homogeneidad y la ausencia de granos finos. El constructor debe suministrar las características (granulometría, dureza del material y contenido de calcáreo [expresado en CaCO_3]), la proveniencia de los materiales y un esquema de aplicación de las capas (según los espesores).

La resistencia a la fragmentación de los materiales debe ser tomada en consideración. Durante el transporte en camiones y el revestimiento del filtro, los materiales chocan entre sí y sufren presiones. Si son demasiado quebradizos, la granulometría va a disminuir y aumentará considerablemente la fracción de granos finos. La calidad del material puede

modificarse significativamente entre el momento de su producción y una vez instalado. Por esa razón se aconseja lavar los materiales antes de instalarlos en el lugar, varias veces si fuera necesario, hasta que el agua de lavado ya no arrastre material fino. Los tests de Los Angeles (NF 1097-2 materiales gruesos) y micro-Deval (NF 1097-1 materiales finos) permiten determinar la resistencia de los materiales a la fragmentación. Su escala va de 0 (muy duro) a 100 (muy quebradizo). Se aconseja no seleccionar materiales con valores superiores a 35.

El agua, en particular cuando es ácida, disuelve el material calcáreo, lo que afecta el comportamiento de los materiales con el tiempo. La nitrificación también puede tener ese efecto. El contenido límite de caliza ha sido fijado en 20% de la masa del material.

Los HA están compuestos de 3 capas de gravilla, de granulometría en orden creciente con la profundidad del lecho:

- **capa filtrante.** Es responsable del tratamiento de las partículas sólidas gracias a su capacidad de retención física y sirve de soporte para el desarrollo de la biomasa depuradora. Tiene un **espesor de 30 a 80 cm** en función de la variante elegida (Cuadro 5 p. 30). A partir de un espesor de 60 cm, conviene colocar en medio de la capa de filtración una canalización de aire intermedio. Ésta se encuentra conectada con el resto de la red de aireación, y sus ranuras se encuentran orientadas hacia abajo. La capa filtrante está compuesta de **gravilla de 2 a 6 mm** que presenta un coeficiente de uniformidad (CU) inferior a 5;

- **capa de transición.** Su papel es impedir el desplazamiento de la gravilla fina desde la capa filtrante a la capa drenante. De 10 a 20 cm de espesor, su granulometría es definida a partir de la granulometría de la capa filtrante y de la siguiente regla de transición granulométrica derivada de las reglas de Terzaghi:

$$d_{15} \text{ capa de transición} \leq 5 \times d_{85} \text{ capa filtrante.}$$

La granulometría de las capas superiores e inferiores es por lo general gravilla de 5/20 mm;

- **capa drenante.** Está recorrida por la red de aireación-drenaje, que recupera y evacúa los efluentes tratados. Es esta capa la que incluye la pendiente de 0,5% en el fondo del filtro. En ausencia de zona saturada, su espesor es de 10 a 20 cm. Para la variante NS/S, su espesor será de 10 a 20 cm más que la altura de saturación. Está compuesta de gravilla gruesa, de **20 a 60 mm**. También debe aplicarse la regla de Terzaghi enunciada más arriba.

3.6. Dimensionamiento de los filtros horizontales

Las reglas de dimensionamiento de los filtros de flujo horizontal en zona tropical se basan en dos nociones: una vinculada con la hidráulica y la otra con la degradación de los contaminantes.

3.6.1 Hidráulica

Si bien parece simple, el dimensionamiento hidráulico de los filtros plantados de flujo horizontal presenta varias dificultades que pueden llevar a cambios drásticos de las condiciones de funcionamiento, e incluso a su mal funcionamiento.

La aparición de flujos de superficie es el ejemplo más característico. Se han observado en la mayoría de los países pioneros en este tipo de obras (EE.UU., Reino Unido, Dinamarca), y en especial cuando se utiliza el suelo del lugar (Alemania).

Aunque no se puede aplicar perfectamente a las condiciones hidráulicas de los filtros, la ecuación de Darcy se utiliza a menudo para determinar la sección hidráulica (ancho y profundidad) del filtro para asegurar que el agua fluya al interior del lecho filtrante.

Se representa como sigue:

$$q = \frac{Q}{As} = -k_s \frac{dH}{dx}$$

donde:

q: caudal de entrada en relación a la sección de paso, m/d

Q: caudal de agua, m³/d

As: sección de paso, m²

dH/dx: gradiente hidráulico, adimensional.

ks: permeabilidad del medio, m/d

Todo filtro de flujo horizontal se colmata con el tiempo por acumulación de materia orgánica refractaria, depósito de SS inertes, precipitados, desarrollo de la biomasa o del sistema radicular, etc. El resultado es una disminución de la porosidad y, por lo tanto, de la permeabilidad del medio. El diseño hidráulico de los filtros debe por lo tanto prever esta colmatación de manera a evitar que con el tiempo se generen flujos de superficie. Lo que implica prever la influencia de esa colmatación sobre la permeabilidad del medio. Cuando el filtro de flujo horizontal se coloca posteriormente a la primera etapa de filtro plantado de flujo vertical, debe considerarse una pérdida de permeabilidad de un factor de 10 en relación con la permeabilidad original. Se insiste en la necesidad de utilizar materiales de una granulometría de tipo 3/6 mm a 15/20 mm.

3.6.2 Degradación de los contaminantes

El dimensionamiento vinculado con los rendimientos depurativos equivale a fijar el tiempo de residencia del efluente dentro del sistema para garantizar la eficacia del tratamiento. Habiendo sido ya fijados el ancho y la altura (dimensionamiento hidráulico), se requiere entonces determinar la longitud del filtro. Para ello se han propuesto diferentes modelos de los cuales el más utilizado es el modelo k-C*. Este modelo se basa en una degradación de primer orden (k) y en una concentración ruido de fondo vinculada a un flujo de retorno de los contaminantes en el agua, y en un flujo pistón. Aunque imperfecto, permite una aproximación del tiempo de residencia a implementar en un filtro para la calidad de depuración requerida.

$$\frac{C - C^*}{C_{in} - C^*} = \exp(-k_v \tau)$$

Donde:

C and C*: concentración (in: entrada) y concentración ruido de fondo (C*) de un contaminante, g/m³

kv: constante volumétrica de degradación de un contaminante J-1: tiempo de residencia, J

Los efectos de la temperatura sobre la constante kv pueden ser expresados conforme a una ley de tipo Arrhenius:

$$k_T = k_{20} \cdot (T-20)$$

Una superficie de 1 m²/HE implementada después de la primera etapa de filtro plantado de flujo vertical insaturado, permite alcanzar concentraciones inferiores a 25 mg DBO₅/L. Esta configuración no ha sido evaluada dentro del marco de los proyectos realizados para los Departamentos de Ultramar. Por lo tanto, no es posible asegurar que ese dimensionamiento esté optimizado.

El lector puede remitirse a otras referencias más detalladas para adaptar el dimensionamiento (Dotro, *et al.*, 2017).

Qué plantas utilizar en los HA de la zona tropical ?

4

Las plantas, debido a su acción mecánica, son indispensables para el funcionamiento de los HA. *Phragmites australis* se utiliza tanto en Francia Metropolitana como en el extranjero. Sin embargo, esta especie no se encuentra de forma natural en la región tropical, donde presenta un marcado riesgo de invasión. La adaptación de los HA pasa, por lo tanto, por seleccionar especies endémicas de los trópicos que puedan sustituir a *Phragmites australis*.

Se llevó a cabo un estudio específico que permitió evaluar un centenar de especies (Lombard-Latune y Molle, 2016). A continuación, se presentan las conclusiones del informe final.

La búsqueda de una planta de sustitución requirió, en un primer momento, explicitar de manera clara las necesidades. A partir de éstas, se definieron los criterios de selección que asegurarían que las plantas se adaptaran al biotopo particular que forman los filtros, al papel mecánico que se busca y a la ecología (en el sentido de equilibrio entre las especies vivas) del medio en el cual se insertan los filtros.

El mismo medio del HA impone:

- el desarrollo en un sustrato areno-graviloso insaturado y bien drenante;
- la resistencia a aportes importantes de materia orgánica poco evolucionada, con la posible instalación transitoria de un medio anóxico;
- la resistencia al estrés hídrico: alternancia marcada entre fases de alimentación (> 400 mm/d durante 3,5 días) y de reposo (3,5 días sin aportes);
- la facultad de crecer a pleno sol (ausencia de sombra).

En relación con el papel que se espera cumplan los vegetales, éstos deben presentar imperativamente las siguientes características intrínsecas:

- plantas perenes no leñosas;
- desarrollo rápido y homogéneo para colonizar rápidamente la superficie del filtro y evitar el desarrollo "en manojos" que limitaría la superficie del filtro realmente activa;
- plantas rizomatosas, idealmente con importantes rizomas en los 50 primeros centímetros del filtro;
- no ser consideradas invasivas, con una baja producción de semillas (para limitar la diseminación);
- altura superior a 60 cm y diámetro de tallos entre 0,5 y 2 cm con el fin de garantizar tanto un efecto mecánico importante como una fácil siega* manual;
- las hojas, brácteas y otros órganos aéreos no deben retener agua de lluvia con el fin de evitar todo riesgo sanitario vinculado en particular con los mosquitos;

Ciclo vegetativo

El ciclo vegetativo se define como la sucesión de etapas en el desarrollo de las plantas. Se distinguen esquemáticamente 4 fases:

• El crecimiento vegetativo, desde que germina una semilla o después de la aparición de un hijuelo en el caso de la multiplicación vegetativa. Dura hasta que la planta ha alcanzado un nivel de desarrollo que le permite producir suficiente energía para reproducirse.

• La floración, que corresponde a la multiplicación sexual de la planta.

• La granazón o fructificación, que lleva a la producción de un huevo (semilla).

• La senescencia: habiendo cumplido su función reproductora, la planta muere paulatinamente.

- la planta no debe presentar riesgo de irritación o intoxicación durante la siega.

También debe tomarse en cuenta el estatuto local de las especies:

- las plantas no deben presentar riesgo invasivo;
- las plantas no deben ser especies protegidas.

4.1 Resultados del estudio

A partir de los criterios ya expuestos, se estudiaron un centenar de especies. Una primera fase bibliográfica permitió descartar la mayor parte de las plantas candidatas. Un estudio a escala piloto comparó los vegetales sobre la base de los principales estreses generados en los HA: estrés hídrico y anóxico. La última fase del estudio permitió evaluar, en un HA de tamaño real, el comportamiento de las especies restantes en cuanto a su competencia con las adventicias ("malezas"), su ciclo vegetativo y su desarrollo, elementos que sirven de base para la discusión sobre las frecuencias de siega.

Los vegetales más interesantes pertenecen a tres grupos botánicos diferentes: las Zingiberales, las Ciperáceas y las Poáceas.

4.1.1 Las Zingiberales

Las Zingiberales pertenecen a un orden botánico relativamente restringido de plantas que se encuentran en estado natural sólo en los trópicos. Este orden incluye ocho familias y sólo algunas decenas de especies. Algunas de estas especies son cultivadas por sus características ornamentales y cuentan con cultivares* muy numerosos. *Heliconia psittacorum* contaría con más de 1 200.

Las cinco especies mejor adaptadas al estrés durante la fase piloto del estudio pertenecen a este orden, que parece, por lo tanto, particularmente interesante. En este sentido y dado el tamaño relativamente pequeño del orden, su estudio se realizó con cierta exhaustividad (Figura 23).

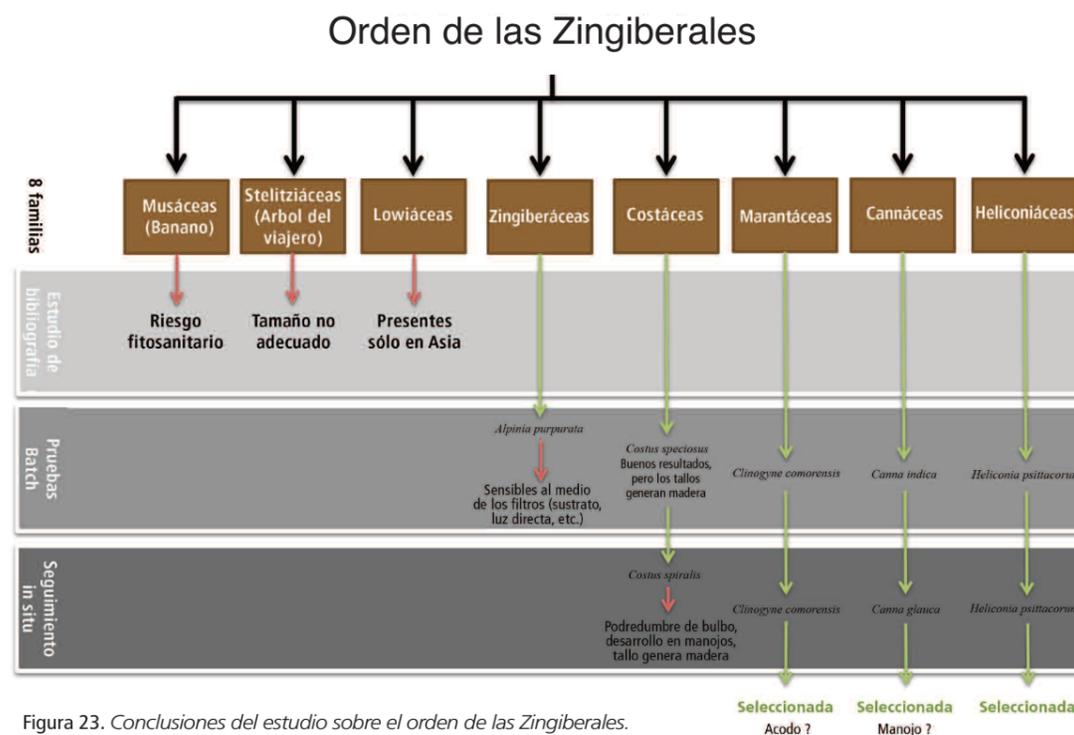


Figura 23. Conclusiones del estudio sobre el orden de las Zingiberales.

Entre las ocho familias que pertenecen al orden de las Zingiberales, tres de ellas no han sido estudiadas por diferentes razones: riesgo fitosanitario (Musáceas: los bananeros), tamaño (Stelitziáceas: el árbol del viajero) o limitaciones geográficas (Lowiáceas: presentes esencialmente en Asia). Se estudiaron, por lo tanto, representantes de las cinco familias restantes y dos de ellas fueron descartadas:

- las Costáceas (*Costus spiralis* et *Costus speciosus*), debido a una competencia demasiado débil en los filtros y a la sensibilidad de los rizomas en caso de aguas estancadas;
- las Zingiberáceas (*Alpinia purpurata*) que no soportaron las condiciones de los filtros (insolación, sustrato).

Al terminar el estudio, los representantes de las tres familias restantes demostraron ser los más interesantes. Se caracterizan por un desarrollo relativamente lento comparado con el de otras especies evaluadas: esto representa una ventaja en cuanto a la limitación del número de siegas anuales, tarea de explotación que demanda mucho tiempo. Su instalación en cambio es más lenta y requiere acompañamiento en el inicio, arrancando las malezas. Una vez instaladas estas familias, su follaje genera una sombra muy densa a nivel del suelo, lo que las convierte en plantas muy competitivas que dejan poco espacio a las adventicias.

Se trata de las familias mencionadas a continuación.

■ *Heliconia psittacorum*, de la familia de las Heliconiáceas (Figura 24).

Su desarrollo es quizás el más lento de las tres, pero se compensa con una mejor repartición en la superficie de los filtros. Actualmente es la mejor alternativa para los HA. Sin embargo, es una familia genéticamente más cercana al banano que a otras familias. Por ello, puede transformarse en un reservorio de patógenos o plagas, acarreado, así, un importante riesgo fitosanitario para los bananos de los alrededores. Según la Fredon (Federación Regional de Defensa contra Organismos Perjudiciales) de la Martinica, las Heliconiáceas podrían representar un riesgo y no deberían plantarse a menos de un kilómetro de una plantación. A la inversa, las Cannáceas suponen un menor riesgo y deben ser privilegiadas en este caso.



Figura 24. Filtro plantado con *Heliconia psittacorum*.

■ *Canna indica* y *Canna glauca*, de la familia de las Cannáceas..

Su desarrollo es muy denso, más cercano a un desarrollo en manojos que las otras. Son menos interesantes que la *Heliconia*, pero son recomendadas para los HA cercanos a plantaciones de bananos (< 1 km). Si bien no existe ningún problema en Mayotte (*Canna indica*) ni en Guyana (*Canna glauca*), en cambio los filtros plantados de *Canna indica* en Martinica y en Guadalupe sufren cada año entre noviembre y enero ataques de orugas (Figura 25). Los ataques no parecen poner en peligro la supervivencia de las plantas en los filtros, pero seguramente afectan su desarrollo.



Figura 25. Ataque de orugas en *Canna indica* en la estación des Mangles, en Guadalupe.

■ *Clinogyne comorensis* de la familia de las Marantáceas.

Se desarrolla bastante rápido, pero el tallo que sostiene las flores tiene tendencia a acodarse (Figura 26), lo que podría implicar un riesgo de formación de un "tapiz" sobre el suelo. Esta planta es endémica de Mayotte, donde se encuentra amenazada de extinción. Su utilización en los filtros permitiría valorizarla.



Figura 26. Acodo en *Clinogyne comorensis*. El acodo* es una propiedad de los tallos de algunas plantas cuyas células epidérmicas tienen la capacidad de diferenciarse en tejidos radiculares en contacto con el suelo.

Estas plantas aportan una robustez extra al sistema porque pueden adaptarse a un amplio espectro de condiciones (resistencia al estrés hídrico y al estrés anóxico) y son poco exigentes en su mantenimiento (baja frecuencia de siega, alrededor de 18 meses).

En cambio, exigirán un acompañamiento durante la fase de inicio para limitar la competencia con las adventicias. Su ciclo vegetativo no ha podido determinarse con precisión, pero es en todo caso superior a 12 meses. Se aconseja realizar una siega cada año, justo antes de la temporada de ciclones o antes de la temporada seca en Guyana. En efecto, una de las consecuencias del paso de la tormenta Matthew fue la caída* de las *Heliconia* presentes en la estación. Una siega preventiva antes de la temporada de ciclones protegería los vegetales de los vientos violentos.

4.1.2 Las Ciperáceas

Las Ciperáceas son una familia botánica ampliamente representada en todo el mundo (más de 5 000 especies), esencialmente en las regiones cálidas. Forman parte del orden de las *Poales*. El comportamiento de las tres especies estudiadas frente al estrés era menos bueno que el de las Zingiberales, pero aun así comparable al de las plantas utilizadas hasta ese momento en los filtros de la zona tropical (cuyo problema era el de un desarrollo heterogéneo "en manojos" y no el de una incompatibilidad con las condiciones de los HA).

■ *Cyperus alternifolius* y *Cyperus involucratus*.

De acuerdo con las clasificaciones botánicas, estas dos especies pueden ser distintas o formar una sola variedad. Sus diferencias son menores. Presentan un desarrollo relativamente rápido. Su follaje cubre rápidamente el conjunto de los filtros, limitando el desarrollo de las adventicias en el suelo. Al cabo de algunos meses, se forma una espesa capa de vegetales muertos en el suelo. Es necesario realizar dos siegas al año para mantener una buena densidad de vegetales y exportar toda la materia vegetal generada.

■ *Cyperus papyrus* es menos denso que *C. alternifolius/involucratus*.

Sus tallos son más altos y parece resistir mejor que sus primas las condiciones anóxicas. En la literatura ha sido utilizada en lechos de secado plantados con vegetales (tratamiento de lodos de depuración y de lodos fecales provenientes de fosas sépticas). Algunos botánicos estiman que presenta un riesgo no despreciable de diseminación fuera de los filtros y que debe ser vigilada. Por el momento no ha sido seleccionada para ser utilizada en los HA.

Las Ciperáceas estudiadas han demostrado ser una alternativa interesante para los HA, incluso ofreciendo menos garantías que las Zingiberales en caso de condiciones extremas. Requieren menos mantenimiento inicial, pero posteriormente una siega más regular. Sus tallos son más resistentes y exigen material adaptado, tipo podadoras de setos, para la siega.

4.1.3 Las Poáceas

Las Poáceas, o gramíneas, forman también parte del orden de las *Poales*. Representan un 20% de la vegetación global del planeta y comprenden más de 12 000 especies, lo que las convierte en la 5ª familia botánica por el número de especies. Las especies evaluadas no parecen disponer de mecanismos eficientes de adaptación al estrés.

Dado que *Phragmites australis* es una Poácea, puede deducirse que hay especies mejor adaptadas que otras. Esta familia botánica se caracteriza por un desarrollo muy rápido, lo que puede ser una ventaja.

■ *Arundo donax* y *Echinochloa polystachia* parecen interesantes por la densidad de sus tallos y su rápido desarrollo. Pero debido a sus ciclos vegetativos muy cortos (3-4 meses), habría que aumentar la frecuencia de las siegas (a 3 veces por año) para mantener una densidad importante. El principal problema que presentan proviene de su excesiva afinidad por el medio de los filtros: desarrollo acelerado, se salen muy rápidamente de los filtros. Se desarrollan por acodo, lo que acelera su velocidad de colonización y provoca la formación de un tapiz muy denso de tallos entrelazados que bloquea cualquier acción mecánica sobre la capa de lodos. Deben prohibirse, porque incluso con mantenimiento, suponen un riesgo invasivo.

■ *Thysanolaena maxima* se desarrolla en manojos, lo que se trata de evitar.

■ *Brachiaria decumbens* es una planta forrajera. Es demasiado pequeña para ejercer una acción mecánica importante si la capa de lodos es gruesa. Es, además, bastante sensible a las diferentes formas de estrés.

Ninguna de las Poáceas estudiadas fue seleccionada finalmente. El orden de las Poáceas es muy amplio y las especies no estudiadas pueden ser indudablemente interesantes, en particular si se diseñan sistemas con valorización agrícola (plantas forrajeras).

4.2 Herbario para los HA en los DFU

Al terminar este estudio, las plantas seleccionadas para los HA en los DFU son las presentadas en el Cuadro 9.

Cuadro 9. Síntesis de las especies seleccionadas para los humedales artificiales (HA) en los DFU

<p>Cyperus alternifolius/involucratus</p> <p>Familia de las Ciperáceas, orden de las Poales</p>		<p>Crecimiento rápido pero muy lenta colonización del conjunto del filtro</p> <p>Desarrollo en manojos</p>	<p>Muy alta densidad: hasta 600 tallos/m²</p> <p>Fuerte competitividad con adventicias</p>	<p>No requiere acompañamiento en la plantación</p> <p>Siega cada 6 meses para eliminar tallos muertos y favorecer la colonización del conjunto del filtro</p>	
<p>Canna indica, canna glauca</p> <p>Familia de las Cannáceas, orden de las Zingiberales</p>		<p>Leve tendencia a desarrollo en manojos</p> <p>Colonización lenta del conjunto del filtro</p>	<p>Densidad promedio: hasta 250 tallos/m²</p> <p>Muy alta competitividad con adventicias</p>	<p>Requiere acompañamiento en la instalación: desmalezado durante 3 meses, 1 a 2 veces al mes</p> <p>Siega anual, antes de la temporada de ciclones</p>	<p>Observación</p> <p>En <i>Canna indica</i> en Guadalupe y Martinica se observan ataques de orugas de diciembre a marzo. No destruyen por completo las plantas, pero las debilitan</p>
<p>Heliconia psittacorum</p> <p>Familia de las Heliconiaceas, orden de las Zingiberales</p>		<p>Desarrollo muy homogéneo, colonización progresiva del conjunto del filtro</p>	<p>Densidad promedio: hasta 250 tallos/m²</p> <p>Muy alta competitividad con adventicias</p>	<p>Requiere acompañamiento en la instalación: desmalezado durante 3 meses 1 a 2 veces al mes</p> <p>Siega anual antes de la temporada de ciclones</p>	<p>Observaciones</p> <p>existen 1 200 cultivares con una alta heterogeneidad (¡incluso al interior de los filtros!). Privilegiar los cultivares más pequeños. Proximidad genética con el banano acarrea riesgos fitosanitarios si el HA se encuentra a menos de 1 km de una plantación de bananos</p>

Implementación y gestión del sistema

5

Esta última parte es una síntesis de los resultados obtenidos en los estudios de campo con respecto a la implementación y gestión de los HA en zona tropical. Se detallarán los incidentes que han llevado a un deterioro más o menos importante de los sistemas. Se presentarán las diferentes fases de la vida de los filtros y también ejemplos de metrología adaptada a este sistema dentro de las tareas de control y seguimiento de la estación.

5.1 Implementación de los HA

5.1.1 Experiencia adquirida en la construcción

El problema de la calidad de los materiales es una cuestión fundamental para la realización de los HA. Si se descarta la inclusión de una segunda etapa de tratamiento se evitan las dificultades derivadas del aprovisionamiento de arena de calidad. No obstante, las características de los materiales que se buscan siguen siendo bastante específicas (parte 3.5.2 p. 42), lo que lleva, por ejemplo, a las canteras a invertir para adaptar su producción. En 2016 se construyó el primer HA en La Reunión. Actualmente hay HA en cada uno de los DFU y, por lo tanto, existen diferentes soluciones para el aprovisionamiento de materiales. Sin embargo, es interesante que el director de proyecto prevea un análisis granulométrico complementario a las informaciones que aportan los proveedores. Si la diferencia con lo recomendado es demasiado importante, se aconseja solicitar a la cantera que produzca un nuevo lote de materiales.

Por último, es indispensable el lavado de los materiales in situ antes de su instalación en los filtros. El transporte de materiales triturados puede producir su deterioro y generar granos finos que deben eliminarse.

La realización de los filtros debe pensarse de manera a garantizar su durabilidad en el tiempo. La llegada de materias minerales al sistema supone un riesgo mayor, que puede acelerar la colmatación en el seno del filtro y reducir considerablemente su vida útil. Por esta razón los filtros deben ser protegidos de la escorrentía (Figura 27).



Figura 27. Colada de lodo en el filtro plantado con vegetales (HA) de Salazie en La Reunión.

Resultaría ventajoso que las geomembranas, incluso si han recibido protección contra los UV, sean protegidas contra los rayos del sol, por ejemplo, con una capa de gravilla. Hay que pensar entonces en el acondicionamiento de uno o varios accesos a la superficie de los filtros para la explotación y el seguimiento.

En función del tamaño de los compartimentos, debe acondicionarse un camino para vehículos al menos en uno de los costados con el fin de permitir el acceso a las máquinas para la limpieza de los filtros.

5.1.2 Lista de los documentos que deben aportarse y las pruebas que debe realizar el constructor

Se propone una lista indicativa y no exhaustiva de los documentos que debe aportar el constructor y de las pruebas que debe realizar durante la construcción y la fase de puesta en marcha de los HA (Cuadro 10). El "Cadre guide pour un CCTP filtres plantés de roseaux" (Pôle d'appui technique aux services déconcentrés du ministère de l'Agriculture, 2007) aporta complementos valiosos para realizar las pruebas.

Cuadro 10. Lista de los documentos a aportar y de las pruebas por realizar por el constructor durante la fase de puesta en marcha de la estación

	Justificativo constructor	Objeto	Prueba asociada
Materiales	Características, esquema y procedimiento de implementación de las capas	Geomembrana: ficha de proveedor, espesor, resistencia (para geotextil: resistencia a la tracción, al alargamiento, a la perforación)	Verificación de las uniones de las membranas, prueba de estanqueidad
		Gravilla: ficha de proveedor, granulometría, dureza, contenido en granos finos, análisis granulométrico complementario	Lavado <i>in situ</i> antes de instalación, verificación de planeidad después de la instalación
Redes	Características, planos de ejecución y procedimiento de implementación, cálculos técnicos e hidráulicos	Red de alimentación: ficha proveedor con características de canalizaciones, planos de ejecución, manual de intervención para la limpieza de la red	Verificación de los sistemas de repartición (flujo equivalente en todos los puntos de alimentación) Control visual de los conductos
		Red de drenaje: ficha de proveedor de las características de las canalizaciones, esquema y fotos de la preparación del drenaje, planos de ejecución	Prueba de drenaje, control visual de la red de drenaje
Material mecánico y electromecánico	Manuales de mantenimiento y operación, plan de pruebas de aceptación de planta, acta de conformidad eléctrica, cálculos técnicos e hidráulicos	Para todos los equipamientos: justificación de su adecuación al proyecto en base a sus características, respeto a exigencias de instalación y empleo, modo operativo en caso de mal funcionamiento	Calibración de bomba/sifón, medición de caudal
		Gravity-flow feeding infrastructure: mode of operation, frequency and form of maintenance	
		Valving and electromechanical valving: frequency and form of maintenance	Prueba de funcionamiento y estanqueidad de válvulas
Vegetales	Layout and planting procedure	Vannes et électrovannes : fréquence et mode d'entretien	Evaluación de la tasa de recuperación a 1 y 3 meses
		Name and source of the species (supplier), rationale for the species chosen, planting density, frequency of thinning–waterweed harvesting, detailed plantation schedule during the bedding-in period (hand-weeding, watering), best window for planting	

5.1.3 Incidentes importantes con impacto sobre las estaciones

A lo largo de los diez años de experiencia de que disponemos, sólo dos incidentes han tenido un fuerte impacto sobre el funcionamiento de los HA.

El primero se produjo por un ingreso de lateritas* a la red de colectores previa a la estación. Por una parte, la red era de mala calidad, con casi un 50% de aguas claras parásitas; por otra parte, los vecinos habían acondicionado las redes de drenaje de sus parcelas directamente conectadas con las cajas de conexión de la red.

Las partículas minerales finas se retienen difícilmente en la superficie de los filtros, sobre todo cuando no existe capa de lodos. En consecuencia, se acumularon en la superficie y penetraron parcialmente en el lecho, produciendo su colmatación (Figura 28). La capa de depósito fue retirada para recuperar una permeabilidad aceptable, pero la acumulación en el seno del filtro requería un lavado o un reemplazo del material.

Esta experiencia muestra la necesidad de mantenerse vigilante con respecto a la llegada potencial de laterita al filtro (a través de la red o por flujo de superficie a nivel de la parcela de la estación); es necesaria una mayor vigilancia en la fase de obras.



Figura 28. Colmatación del filtro de Bois d'Opale 1 con lateritas.

El segundo incidente tuvo consecuencias mucho menos dramáticas para el sistema. Con ocasión de una marea particularmente fuerte en Martinica, entró agua de mar al sistema colector a través de un by-pass (conducto de evacuación hacia un emisario) que no contaba con válvula anti-retorno. Las plantas del filtro en servicio no soportaron la salinidad y murieron algunos días después (Figura 29). A pesar de realizar una siega, las plantas no fueron capaces de brotar nuevamente. No tuvo consecuencias sobre los resultados de los filtros y fue necesario replantar los vegetales.

En cada uno de los dos casos fue la mala calidad de la red la que afectó el buen funcionamiento de la estación. Esta es responsabilidad de la Autoridad Contratante.



Figura 29. Muerte de las *Thysanolaena maxima* a nivel de los puntos de alimentación, estación de Mansarde Rancée en Martinica.

Cabe destacar que determinados animales presentes en los filtros pueden alterar su funcionamiento, como reptiles tipo iguanas que anidan en los filtros y aplastan los vegetales con su peso. Esta problemática requiere una siega de los vegetales para evitar que se pudran en la superficie del filtro.

5.2 Diferentes fases de operación de los filtros

Durante su vida, los HA pueden pasar por hasta cinco fases de operación diferentes: puesta en marcha, funcionamiento normal, funcionamiento degradado, extracción y colmatación definitiva.

5.2.1 Plantación de los vegetales y fase de puesta en marcha de los HA

Los vegetales se plantan con una densidad entre 4 y 8 plantas/m², en función de la velocidad de crecimiento de la especie elegida (Cuadro 9) y de la carga esperada al poner en marcha la estación. Las plantas se colocan con su cepellón, lo que facilita su recuperación. Puede añadirse una capa de compost si se espera una puesta en marcha con carga muy baja: actuará como un acolchado para las plantas jóvenes, manteniendo una buena humedad en el suelo y mejorando la repartición del agua en la superficie de los filtros. En función de la calidad del compost, este puede liberar algo de SS, e incluso colorear levemente el agua (ácidos húmicos). Estos efectos son temporales; pero es importante aplicar un compost que no incluya muchas partículas finas: lo ideal sería realizar un cribado que deje sólo la fracción superior a 1 mm. Durante los primeros seguimientos en Taupinière, donde los vegetales habían sido plantados con un compost, se observó un aumento no despreciable de la DQO. Esto duró sólo algunos meses.

En el caso de que exista un desfase temporal entre la plantación y la puesta en marcha de la estación, es necesario regar regularmente los vegetales para favorecer su crecimiento.

La fase de puesta en marcha, es un período durante el cual el seguimiento del desarrollo vegetal debe ser riguroso. Si la estación está insuficientemente cargada, los vegetales pueden tener problemas para desarrollarse. En caso de estrés hídrico, hay que mantener un regadío con aguas claras (posibilidad de recircular), o, en caso de un proceso NS/S, aumentar al máximo el nivel de saturación. La alternancia de los filtros, con una frecuencia de 3,5 días de alimentación y después reposo, siempre es necesaria. En el caso de que la puesta en marcha de una estación se lleve a cabo a carga nominal, y si el papel mecánico de los vegetales todavía no es efectivo, es posible que tenga lugar un encharcamiento del filtro. Será conveniente asegurar que no se vuelva excesivamente problemático: no debe haber agua en la superficie de los filtros durante las fases de reposo. Si ocurre, escarificar el depósito de lodos facilitará que las aguas puedan infiltrarse.

En todos los casos, los trabajos de desmalezado deben aplicarse como mínimo una vez al mes mientras los vegetales plantados no hayan colonizado densamente el conjunto de los filtros. A partir de una densidad de 100 tallos por m², ya no es necesario intervenir, a menos que aparezcan nuevas plantas invasivas que se vayan imponiendo paulatinamente a las especies plantadas. En cada DFU existen especies indeseables exuberantes que tienen tendencia a "acostar" los vegetales presentes, etapa que es indispensable evitar.

5.2.2 Funcionamiento normal

Durante la fase de funcionamiento normal, los filtros son alimentados alternativamente con una frecuencia 3,5 d/3,5 d. Se aplica entonces el mantenimiento normal de los filtros. Las inmediaciones se limpian cada dos meses y las malezas del interior de los filtros se arrancan con mayor regularidad en función de las necesidades.

La siega de los vegetales tiene como objetivo eliminar los vegetales muertos y mantener una alta densidad en la superficie de los filtros. En el Cuadro 9, p. 51 se proponen frecuencias indicativas en función de las especies. La siega es una tarea que puede demandar mucho tiempo y es indispensable utilizar materiales profesionales como podadoras de setos o desbrozadoras. **Es indispensable retirar la biomasa vegetal que se produce sobre los filtros. Si se dejara sobre los filtros,** puede degradarse muy lentamente y provocar la colmatación de superficie. Una vez que las plantas han brotado nuevamente, es muy complicado intervenir. Por esta razón, algunos operadores prefieren intervenir con un machete y cortar las plantas una por una, retirándolas a medida que sea necesario, en vez de cortar todo y encontrarse con una masa vegetal difícil de retirar.

La siega es una tarea de explotación normal y no exige adaptar el modo de funcionamiento de la estación. El rebrote de los vegetales se produce en pocas semanas.

5.2.3 Funcionamiento degradado

El funcionamiento degradado corresponde a un funcionamiento mínimo de la estación después de una avería (fallo, corte de corriente, etc.). Normalmente ha sido previsto durante el diseño de la estación.

Los HA pueden funcionar enteramente por gravedad si la topografía lo permite, utilizando válvulas manuales, lo que impide problemas graves de funcionamiento. Si fuera indispensable el uso de una estación de bombeo, ésta debe colocarse en cabeza de estación para que no altere el flujo de las aguas en la estación en caso de avería. En funcionamiento degradado, los rendimientos sobre la fracción carbonada (DQO, DBO₅, SST) se mantienen, pero pueden verse afectados los concernientes al nitrógeno.

5.2.4 Extracción de los lodos

Cuando el depósito orgánico alcanza una acumulación de 20 cm, la conductividad hidráulica de los filtros disminuye, provocando una disminución de los intercambios gaseosos. Es necesario proceder a la extracción o limpieza de la capa de depósito. Estos lodos están fuertemente mineralizados y, por lo tanto, estabilizados (no susceptibles de fermentación). El grupo de trabajo Epnac publicó una guía para la extracción, la toma de muestras y el análisis de los lodos de HA con vistas a su valorización como compost agrícola (2014). El documento detalla las diferentes tareas a realizar.

Si el sistema de alimentación es aéreo, debe ser desmontado antes de introducir las máquinas. La extracción puede realizarse con una tracto-pala equipada con un vaso de limpieza de fosa dotado de una cuchilla relativamente cortante (sin dientes). Las máquinas tienen acceso sólo a la periferia de los filtros: en efecto, si entraran en el filtro mismo producirían compactación y deterioro del sistema, en particular de la red de aireación-drenaje. Por lo tanto, debe preverse un camino de acceso en la periferia de los filtros.

Las plantas deben ser segadas antes de esta fase de limpieza. El rebrote de los vegetales se hace directamente desde los rizomas contenidos en la capa de lodo residual y en los primeros centímetros del lecho filtrante. Es por esta razón que se eligen plantas con rizoma.

Con excepción de las operaciones curativas que fueron necesarias tras la aparición de los problemas de intrusión de materias minerales en las redes (ver 5.1.1 y 5.1.3), nunca se ha realizado una limpieza de los lodos en los HA de los DFU. Los elementos aquí mencionados provienen de la experiencia obtenida en Francia Metropolitana. A excepción de la velocidad de acumulación de los lodos, todavía por determinar para la zona tropical, no existen *a priori* diferencias con las condiciones metropolitanas y pueden aplicarse las mismas recomendaciones.

Índice de Protección IP68

El índice de protección (IP68) es un estándar internacional de la Comisión Electrotécnica Internacional relativo a la estanqueidad.

Este índice clasifica el nivel de protección que ofrece un material a las intrusiones de cuerpos sólidos y líquidos (arena, polvo, animales pequeños e insectos voladores o reptantes, agua y otros líquidos, impactos mecánicos y gases corrosivos del ambiente).

El formato del índice, dado por la norma CEI 60529, es IP68, donde la cifra 6 indica que el material está enteramente protegido del polvo, y la cifra 8 indica que se puede sumergir por debajo de 1 m.

5.2.5 Colmatación irreversible

El sistema de los HA tiende naturalmente a colmatarse. Las diferentes tareas de explotación y gestión de las obras permiten retrasar el plazo. Accidentes (intrusión de materias minerales en la red), mala calidad de los materiales (proporción de minerales finos > 3%) o mala explotación (alternancia no respetada) tienden a acelerarlo.

Actualmente, el HA más antiguo de Francia Metropolitana tiene más de 30 años y ha sido limpiado a fondo sólo dos veces...

5.3 Gestión de las obras en la zona tropical

En el sitio web Epnac se encuentra disponible una guía de explotación de los filtros plantados. No es específica de la zona tropical. Como complemento se han compilado aquí los resultados de los operadores en los DFU. Las especificidades de la explotación de los HA en zona tropical se refieren fundamentalmente a la protección del material electromecánico y al mantenimiento de los vegetales.

5.3.1 Tropicalización de las instalaciones

En el marco de la construcción y explotación de los HA en zona tropical, la elección de materias y materiales debe adaptarse del mejor modo posible a condiciones climáticas difíciles. El calor, la insolación y la humedad son todos factores que pueden reducir la vida útil de los aparatos. En estas condiciones los aparatos de medición, vigilancia y control deben ser IP68 (tropicalizados de manera suficiente). Se pueden además añadir protecciones suplementarias con el fin de alargar su vida útil. Algunos ejemplos:

- protección solar para los caudalímetros, los cables de las electroválvulas, los aparatos de medición exteriores, las cajas de mando, etc. (Figura 30A). Las electroválvulas, los reductores de presión y los cables de alimentación son las piezas que deben cambiarse con mayor frecuencia. Las electroválvulas, en particular, plantean serios problemas de explotación. En los tres años del proyecto Attentive, esos aparatos han sido objeto de intervenciones cada 6 meses en promedio. La inestabilidad de la presión en la red de alimentación de agua potable ha sido identificada como la fuente principal del problema;
- se aconseja igualmente instalar aireación en todo espacio cerrado: armario de mando, local técnico, etc. (Figura 30B).

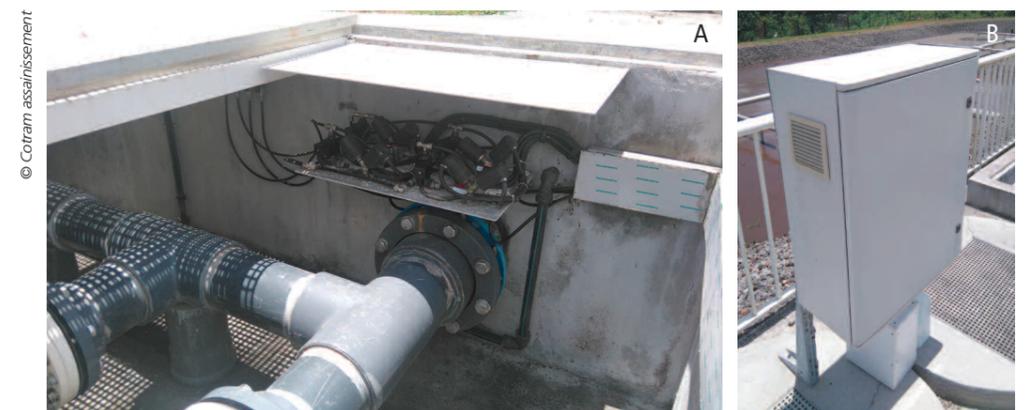


Figura 30. A) Protección de las electroválvulas contra la radiación solar. B) Aireación en un armario eléctrico.

5.3.2 Mantenimiento de los vegetales

■ Interior de los filtros

Las necesidades de mantenimiento del interior de los filtros dependen de la especie vegetal elegida (Cuadro 9, p. 51). Las tareas de explotación vinculadas con el mantenimiento del interior de los filtros se describen a continuación.

■ Después de la plantación o de la extracción del lodo: limitar el desarrollo de las plantas adventicias con un desmalezado manual selectivo. La frecuencia varía entre una vez a la semana y una vez al mes, en función del tipo de planta, de la edad del sistema, etc. A partir de una densidad cercana al centenar de tallos por m², este acompañamiento deja de ser necesario porque las plantas seleccionadas son suficientemente competitivas para establecerse solas.

■ A cada paso por la estación, el operador debe controlar visualmente el estado de la vegetación en los filtros. El desarrollo de plantas adventicias que van imponiéndose paulatinamente sobre el vegetal plantado debe ser interrumpido rápidamente con un desmalezado manual.

■ Se recomienda realizar una siega anual antes de la temporada de ciclones, independientemente del vegetal utilizado. Algunas especies requerirán una segunda siega a lo largo del año.

El uso de material adecuado (podadora de setos mejor que tijeras) permite dividir a la mitad el tiempo de trabajo. Las plantas se cortan a una decena de centímetros por encima de la capa de lodos. La biomasa vegetal debe imperativamente exportarse fuera del filtro y no dejarse descomponer en la superficie de los filtros, donde puede provocar la colmatación de superficie. Algunos operadores siegan las Heliconias con machete formando grandes brazadas. Ganan así tiempo sobre la fase de recogida de la biomasa desde la superficie de los filtros.

El mantenimiento del interior de los filtros es primordial para la duración del sistema. Es una tarea de explotación que puede desconcertar a los operadores acostumbrados a los sistemas convencionales. El mantenimiento de un filtro requiere entender el papel de los vegetales y su desarrollo. Algunas tareas, como la siega, pueden ser fastidiosas si el material no es el adecuado. **Se desaconseja enfáticamente llamar a un prestatario de servicios para el mantenimiento del interior de los filtros; se trata de una tarea de explotación.**

■ Las inmediaciones de la estación

El mantenimiento de la vegetación en toda la estación debe hacerse regularmente (una vez al mes aproximadamente) con el fin de no dejarse sobrepasar: corte de los espacios verdes, mantenimiento de los árboles y evacuación de los residuos verdes hacia una instalación autorizada.

El mantenimiento de las inmediaciones incluye las vías de acceso y los cercos, pero también los diques y los bordes presentes en el sitio. Debe prestarse especial atención a los diques que protegen los filtros y evitar la entrada de agua de escorrentía en estos últimos.

Las plantas adventicias más difíciles de eliminar de los filtros llegan a menudo desde fuera de ellos. El mantenimiento de las inmediaciones forma, por lo tanto, parte de la prevención de los problemas de colonización de los filtros por las malezas.

5.3.3 Síntesis de las tareas a realizar

Cuadro 11. Síntesis de las tareas a realizar en el marco de la explotación de humedales artificiales (HA) de 100 y 800 HE (Datos Cotram)

Lista de las operaciones	Frecuencia	HA 100 HE		HA 800 HE	
		Duración de la operación (min)	Total/año (horas)	Duración de la operación (min)	Total/año (horas)
Control de los bastidores de canaletas, maniobra de las válvulas	2 veces/semana	5	8	5	8
Limpieza de las rejillas	1 vez/semana	10	8	10	8
Control y mantenimiento de los filtros, desmalezado manual	1 vez/semana	60	48	180	144
Completar el cuaderno de vida de la estación	1 vez/semana	15	12	15	12
Mantenimiento de espacios verdes alrededor de los filtros	1 vez/mes	60	12	180	36
Limpieza de las trampillas y bastidores de canaletas	1 vez/mes	60	12	90	18
Vaciado e inspección de las redes de alimentación de la primera (y segunda) etapa de tratamiento	2 veces/año	60	2	150	5
Verificar la altura de los lodos, el estado de las geomembranas	1 vez/año	30	0,5	60	1
Siega y evacuación de los vegetales	1 vez/año*	240	4	960	16
Extracción de lodos de la primera etapa	1 vez/10 años	960	1,5	1440	2,5
Tiempo total anual (horas)			108		250,5

*En función de las especies (parte 4.2 p. 50).

5.3.4 Resultados de la experiencia en Guyana

A esta fecha, Etiage Guyane sigue o explota siete filtros plantados, el más antiguo desde 2010. La tarea principal de explotación es el mantenimiento de los vegetales de los filtros. Después de varios años de seguimiento, la constatación es inequívoca: los filtros plantados construidos en zanja-terraplén con estanqueidad mediante geomembrana presentan muchas más exigencias de mantenimiento que los HA construidos en compartimentos de hormigón, mucho menos sensibles a la aparición e invasión de adventicias. La siega se aconseja al terminar la temporada seca en Guyana. Una segunda siega (incluso parcial) puede resultar necesaria al terminar la temporada de lluvias, de acuerdo con su intensidad y con la tendencia de los vegetales a doblegarse por el peso del agua.

Etiage Guyane recomienda la vigilancia de los pozos de bombeo por telegestión o una frecuencia de paso semanal como mínimo.

Para los HA pequeños (< 100 HE), se privilegia una alternancia de los filtros mediante válvulas manuales con el fin de garantizar el paso de un operador.

En los HA se ha observado poca o ninguna presencia de reptiles. El equipamiento de protección individual (EPI)* necesario está relacionado sobre todo con la presencia de hormigas, a veces agresivas, durante las operaciones de desmalezado o de siega (botas y guantes indispensables cuando se accede a los filtros).

Los filtros plantados no generan olor. Son muy apreciados por los habitantes, incluso al pie de los inmuebles, por ser muy floridos (en el caso de las *Heliconia psittacorum*), y a veces son incluso confundidos con jardines (Figura 31).



Figura 31. Integración paisajística de un HA en una urbanización en Guyana.

5.4 Seguimiento reglamentario

Las tareas de control y seguimiento de procesos tienen como objeto verificar y mantener los rendimientos de los sistemas de tratamiento. En el plano jurídico se rige por el decreto del 21 de julio de 2015 (Legislación francesa). En esta parte presentamos una síntesis que se apoya también en el “comentario técnico del decreto” para los sistemas de saneamiento de capacidad inferior a 10 000 HE.

El seguimiento reglamentario es responsabilidad de la Autoridad Contratante. Conciernen a todo el sistema de saneamiento, es decir, tanto al sistema colector como la estación de tratamiento de aguas residuales (ETAR). En el caso de existir múltiples constructores para el mismo sistema, es el de la ETAR quien se encarga de coordinar, sintetizar y transmitir las informaciones.

5.4.1 Producción de documentos

El seguimiento reglamentario se construye en torno a la preparación de dos documentos que sintetizan los resultados de las campañas de medición y control, cuya frecuencia depende de la capacidad de las estaciones.

El primer documento presenta las características del sistema y la organización del seguimiento.

Se trata del “cuaderno de vida” cuando la capacidad de tratamiento es inferior a 2 000 HE, y del “manual de seguimiento del sistema de saneamiento” cuando la capacidad es superior a esa cifra.

El segundo documento es el “balance de operación del sistema de saneamiento”, que sintetiza los resultados de seguimiento.

En el portal de saneamiento comunal del ministerio se encuentran disponibles modelos de estos documentos⁴.

4- Disponible en el portal de saneamiento comunal del ministerio: <http://assainissement.developpement-durable.gouv.fr/services.php> (consultado el 14/06/2017).

■ Cuaderno de vida (< 2 000 HE)

El o los constructores de los sistemas colectores y de las estaciones de tratamiento concernidas redactan y mantienen al día un cuaderno de vida. El cuaderno de vida, que se divide en tres secciones, incluye como mínimo los elementos que siguen.

1. Descripción, explotación y gestión del sistema de saneamiento:

- 1.1. Un plano y una descripción del sistema de saneamiento, que incluye especialmente la lista de conexiones no domésticas en el sistema colector;
- 1.2. Un programa de explotación del sistema de saneamiento a diez años vista;
- 1.3. La organización interna del o de los gestores del sistema de saneamiento.
2. Organización de la vigilancia del sistema de saneamiento:
 - 2.1. Modalidades de instalación de las tareas de seguimiento y control;
 - 2.2. Reglas de transmisión de datos de monitoreo;
 - 2.3. Lista de los puntos equipados o acondicionados para el monitoreo, y material utilizado;
 - 2.4. Métodos utilizados para el seguimiento puntual regular;
 - 2.5. Organización interna del o de los gestores del sistema de saneamiento.
3. Seguimiento del sistema de saneamiento:
 - 3.1. Conjunto de operaciones efectuadas en el sistema de saneamiento, con fechas;
 - 3.2. Informaciones y resultados de las mediciones de control y seguimiento;
 - 3.3. Resultados de las medidas de seguimiento recibidas en el marco de las autorizaciones de vertido de aguas residuales no domésticas en el sistema colector;
 - 3.4. Lista de los eventos más importantes ocurridos en el sistema de saneamiento (avería, situación excepcional, etc.);

3.5. Síntesis anual del funcionamiento del sistema de saneamiento;

3.6. Síntesis de las alertas;

3.7. Documentos que justifican el destino de los lodos.

El cuaderno de vida y sus eventuales actualizaciones son transmitidos para su información a la Oficina del Agua y al Servicio de Policía del Agua (SPE-DEAL de sus siglas en francés).

■ Manual de seguimiento y control del sistema de saneamiento (≥ 2 000 HE)

Este manual ha sido redactado con vistas a realizar el control y seguimiento de las instalaciones de saneamiento y de la masa de agua receptora de los vertidos. El Autoridad Contratante describe aquí de manera precisa su organización interna, sus métodos de explotación, control y análisis, la ubicación de los puntos de medición y toma de muestras, las modalidades de transmisión de los datos, los organismos externos a quienes confía toda o parte de la vigilancia y la calificación de las personas asociadas a este dispositivo.

El manual especifica:

1. Las normas o métodos de referencia utilizados para la instalación y explotación de los equipos automáticos de control;
2. Las menciones asociadas a la implementación del formato informático de intercambio de datos “SANDRE”;
3. Los rendimientos requeridos en materia de recogida y tratamiento, fijados en el acta prefectural relativa al sistema de saneamiento;
4. Las instalaciones de depuración, y detalla el conjunto de aliviaderos de tormenta (nombre, tamaño, ubicación de la obra y del o de los puntos de vertido asociados, nombre del o de los medios incluidos por el vertido en particular).

Este manual se presenta a la Oficina del Agua, la cual realiza un examen técnico del manual que envía posteriormente al SPE para su validación. El manual se actualiza regularmente y se encuentra a disposición de los servicios del Estado en la estación.

■ Balance de funcionamiento del sistema de saneamiento

El o los constructores del sistema de saneamiento redactan a comienzos de año el balance anual de funcionamiento del año anterior y lo envían a la Oficina del Agua y al SPE antes del 1 de marzo del año en curso.

Para los sistemas de capacidad inferior a 200 HE, no se aplica un control reglamentario. Entre 200 y 500 HE, el balance debe aportarse cada 2 años, correspondiéndose con la frecuencia de los balances de materia de 24 horas, que se realizan dentro de las tareas de seguimiento y control de la estación. A partir de 500 HE, los balances de operación deben generarse todos los años.

Este balance anual es un documento sintético que recopila los datos recogidos en el marco de la del control y seguimiento reglamentarios y que se detallan en las partes que siguen. Incluye:

1. Balance de las descargas y vertidos al medio natural (fecha, frecuencia, duración, volúmenes y, si fuera el caso, flujo de polución descargado);
2. Elementos relativos a la gestión de los residuos provenientes del sistema de saneamiento (residuos provenientes de la limpieza de la red, arenas, grasas, desechos del cribado, lodos producidos, etc.);
3. Información relativa a la cantidad y la gestión de eventuales aportes externos (calidad, cantidad): materiales de vaciado, lodos exógenos, lixiviados*, efluentes industriales, etc.;
4. Consumo de energía y de reactivos;
5. Recapitulativo de los eventos importantes que se han presentado en la estación (operaciones de mantenimiento, averías, situaciones no habituales, etc.);

6. Síntesis anual de los resultados de los balances de materia realizados durante un periodo de 24 horas dentro de las tareas de seguimiento del año precedente;
7. Balance de los controles de los equipos de monitoreo realizados por la Autoridad Contratante;
8. Balance de las nuevas autorizaciones de vertidos al sistema colector entregadas durante el año correspondiente, y seguimiento de las autorizaciones vigentes;
9. Elementos del diagnóstico del sistema de saneamiento (debe ser realizado cada 10 años; ver artículo 12 del decreto del 21 de julio de 2015);
10. Análisis crítico del funcionamiento del sistema de saneamiento;
11. Autoevaluación de los rendimientos del sistema de saneamiento en relación con las exigencias del decreto del 21 de julio de 2015;
12. Lista de obras futuras previstas, así como plazo de realización, cuando se conoce.

El programa anual de seguimiento y control debe organizarse en torno a un calendario provisional de realización de las mediciones, que debe ser representativo de las particularidades del núcleo urbano del saneamiento (actividades estacionales). La Autoridad Contratante debe dirigirlo al SPE y a la Oficina del Agua antes del 1 de diciembre del año precedente.

La Autoridad Contratante envía a esos mismos servicios los resultados de las tareas de control durante el mes que sigue a su producción. La transmisión se hace por vía electrónica de acuerdo con el escenario de intercambio de datos vigente definido por el Servicio de Administración Nacional de Datos y Referencias sobre el Agua (SANDRE por sus siglas en francés).

En caso de rebasarse los valores límites definidos por el decreto del 21 de julio de 2015 o por el prefecto, el servicio encargado del control debe ser informado de inmediato. La promotora aporta los comentarios sobre las causas del rebasamiento y sobre las acciones correctivas aplicadas o consideradas.

5.4.2 Metrología y realización de las mediciones de control y seguimiento

La frecuencia de las mediciones de seguimiento y control de la estación se recapitula en los cuadros 12 y 13.

■ Medición de los caudales

Cuadro 12. Frecuencia y modo de medición de los caudales en el marco del seguimiento y control reglamentarios (decreto del 21 de julio de 2015)

ETAR	Obligaciones
< 500 PE	Estimaciones del caudal a la entrada o salida de la unidad de tratamiento
≥ 500 and < 2 000 HE	Mediciones de los caudales a la entrada o salida de la unidad de tratamiento
≥ 2 000 HE	Mediciones y registros de los caudales a la entrada y a la salida de la unidad de tratamiento

■ Parámetros sobre calidad de las aguas y frecuencia de las mediciones

En los balances de materia de 24 horas realizados en el marco de las tareas de seguimiento y control, se analizan los siguientes parámetros: pH, caudales, T°, SST, DBO₅, DQO, y según la calidad requerida para el vertido: NH₄, NTK, NO₂, NO₃, P_{tot}. Los análisis de las muestras deben ser realizados en un laboratorio autorizado de acuerdo con el Código del Medio Ambiente (con excepción de las medidas sobre caudales, T° y pH).

Cuadro 13. Frecuencia y parámetros de calidad de las aguas a analizar en el marco del control y seguimiento reglamentarios (decreto del 21 de julio de 2015)

Capacidad	Frecuencia de medición
< 200 HE	Ninguna obligación
≥ 200 y < 500 HE	1 cada 2 años
≥ 500 y < 1 000 HE	1 cada año
≥ 1 000 y < 2 000 HE	2 cada año
≥ 2 000 y < 10 000 HE	Diarios: caudales Mensuales pH, SST, DBO ₅ , DQO 4 por año: NTK, NH ₄ , NO ₂ , NO ₃ , P _{tot}

La diferencia entre estimación y medición de los caudales está explicitada en los comentarios técnicos del decreto del 21 de julio de 2015, parte 2: seguimiento de los sistemas de saneamiento colectivos. Una medición corresponde a un dispositivo normalizado cuya instalación ha sido verificada. A la escala de las pequeñas comunidades, se trata de:

- caudalímetro electromagnético instalado en las canalizaciones de acuerdo con las recomendaciones del constructor y convenientemente calibrado;
- caudalímetro de burbuja o de ultrasonidos, asociado con un canal calibrador con o sin umbral (tipo Venturi), adecuadamente instalado y mantenido.

El tiempo de operación de las bombas de un pozo de bombeo, asociado con una calibración de las bombas, solo entrega una estimación del caudal. En efecto: dado que el caudal de la bomba varía con la presión sobre la bomba, hay que asociar esta estimación con la medición de una altura del nivel de agua para pasar de una estimación a una medida. Del mismo modo, un contador mecánico de batchs asociado al volumen de agua alimentado, entrega una estimación sobre caudales y no una medición en el sentido de la reglamentación.



Conclusión

6

Los Departamentos de Ultramar se enfrentan a desafíos de saneamiento particularmente sensibles. Sometidos al mismo marco reglamentario que Francia Metropolitana (DCE, DERU), presentan, sin embargo, un importante retraso en la implementación de sistemas de saneamiento eficaces, aun cuando los desafíos medioambientales (concentración de la mayor parte de la biodiversidad nacional), sanitarios, económicos, de propiedad de la tierra y sociales demandan un rápido desarrollo del sistema de saneamiento.

Una de las principales problemáticas proviene de una mala adecuación de las tecnologías y de su adaptación al contexto particular de los DFU. Esta guía de dimensionamiento de los humedales artificiales en zona tropical recapitula diez años de investigaciones realizadas en los cinco DFU que busca adaptar una tecnología largo tiempo estudiada en clima templado. La experiencia adquirida está basada en los exhaustivos seguimientos realizados en siete estaciones diferentes, así como en un estudio específico sobre la elección de los vegetales.

Estas investigaciones han permitido construir y validar reglas de dimensionamiento adaptadas al contexto tropical. Éstas garantizan el equilibrio entre la eficacia y la robustez de un proceso que ya ha alcanzado éxito en Francia Metropolitana, y una mayor compacidad que es posible gracias a las temperaturas medias más elevadas del clima tropical. Se ha prestado especial atención a la aceptación de los períodos lluviosos, que es una de las debilidades de los procedimientos convencionales con lecho fluidizado en el contexto tropical. Todavía existen ciertas acciones en curso que podrían modificar las recomendaciones de esta guía, tanto sobre la elección de los vegetales como sobre la optimización del sistema.

Durante los seguimientos no se constató ningún rebasamiento de los valores límites de emisión impuestos. La configuración más simple garantiza rendimientos superiores al mínimo reglamentario (75 %, 80 %, 80 % y 60 % de factor de reducción, respectivamente, para DQO, DBO₅, SST y NTK, con concentraciones de salida inferiores a 125 mg DQO/L). En función de las necesidades y de las limitaciones, los HA pueden ser adaptados para garantizar un tratamiento del carbono superior al 95%, una nitrificación total o un tratamiento del nitrógeno total del 70 %.

Los humedales artificiales de flujo vertical presentados aquí son alimentados con aguas brutas. Permiten un tratamiento conjunto de las aguas residuales y de los lodos. Aportan por lo tanto también, una solución al problema de los subproductos de depuración, cuya gestión es problemática en los DFU.

La compacidad del sistema tropical permite, a la vez, competir con los procedimientos convencionales cuando el terreno disponible es limitado; y también ser competitivo económicamente por encima de la capacidad límite definida en Francia Metropolitana (5 000 HE). La gama de utilización de los HA es, por lo tanto, muy amplia, desde la obra semi-colectiva destinada a urbanizaciones o aldeas aisladas hasta aglomeraciones urbanas de tamaño medio.

Una de las claves de éxito de los filtros plantados en Francia Metropolitana es la simplicidad de explotación del sistema. Con poco, incluso sin material electromecánico y, por lo tanto, sin electricidad si la topografía lo permite, las tareas del operador son simples y los riesgos de averías muy bajos. El mantenimiento de los vegetales es más exigente en zona tropical y constituye la principal tarea del gestor de la estación.

Las recomendaciones de esta guía, construida dentro del marco de las investigaciones realizadas en el contexto francés de ultramar, son extensibles a toda la zona tropical.

Glosario

7

Anti-socavón	Que protege de los socavones (excavación causada por la llegada de agua)
Adventicias	Plantas indeseables o especies vegetales diferentes a la seleccionada.
Batch	Volumen de agua, que corresponde a una lámina de 2,5 a 5 cm, repartido en el conjunto de la superficie del filtro. Es enviado sobre el filtro con un caudal superior a la velocidad de infiltración en el lecho, provocando así un encharcamiento; esto garantiza una repartición homogénea de las aguas residuales en la superficie y una renovación óptima del aire contenido en el lecho.
Compartimento	Subdivisión de un filtro como resultado de una partición. En función del contexto, puede tratarse de uno solo de los 2 filtros que componen una etapa de tratamiento.
Cultivar	Al interior de una variedad de plantas, los cultivares se obtienen por cultivo después de seleccionarlos por alguna de sus características.
Exudados radiculares	Líquidos secretados por las raíces de los vegetales (defensa, simbiosis, etc.).
Siega	Tarea de explotación de los HA que consiste en cortar los vegetales presentes sobre los filtros hasta una veintena de cm del suelo, y extraer la biomasa así producida.
Línea	Para grandes unidades de tratamiento, puede resultar más interesante realizar varias pequeñas unidades que funcionan en paralelo en vez de una grande. En ese caso, una línea corresponde a una pequeña unidad.
Encharcamiento	Temporary clogging or plugging at the filter surface, which materializes as ponds or pools.
Laterita	Suelo rojo o marrón, rico en óxidos de hierro, que se forma por alteración de las rocas en climas tropicales.
Lixiviación o percolación	Líquido residual proveniente de la percolación del agua contenida (o aportada por las lluvias) a través de un material parcialmente soluble.
Acodo	Método de multiplicación vegetativa de los vegetales por hipogénesis (desarrollo de raíces) en una parte aérea de la planta madre.
Ultramarino(a)	Relativo a ultramar
Encamado	Accidente de vegetación provocado por la lluvia, el viento o un ataque de parásitos, y que acuesta las partes aéreas de la planta sobre el suelo.

8

Siglas y abreviaciones

AFB	Agence française pour la biodiversité – Agencia francesa de la biodiversidad	H₂S	Sulfuro de hidrógeno
ANC	Saneamiento no colectivo	LB	Lecho bacteriano
C	Carbono	MEDDE	Ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie – Ministerio de ecología, desarrollo sostenible y energía
CANGT	Comunidad de aglomeración del norte de Grande Terre	SST	Sólidos en suspensión totales
DBO₅	Demanda biológica de oxígeno en 5 días	N	Nitrógeno
DCE	Directive cadre sur l'eau – Directiva marco sobre el agua	NH₄	Amonio
DQO	Demanda química de oxígeno	NO₂	Nitrato
COD	Demanda química de oxígeno filtrado	NO₃	Nitrato
CODf	Direction de l'environnement de l'aménagement et du logement – Dirección de medio ambiente, ordenamiento y vivienda	NT	Nitrógeno total
DERU	Directiva relativa a las aguas residuales urbanas	NTK	Nitrógeno kjeldahl
DFU	Département d'outre-mer – Departamento Francés de ultramar	IS/S	Insaturado/saturado
HE	Habitante- Equivalente	ODE	Office de l'eau - Oficina del agua
HE_m	Habitante- Equivalentede Mayotte	Onema	Office national de l'eau et des milieux aquatiques – Oficina nacional del agua y medios acuáticos
EPI	Equipo de protección individual	pH	Potencial de hidrogeniones
Epnac	Evaluación de nuevos procedimientos de saneamiento para comunidades pequeñas y medianas	PP	Polipropileno
Fredon	Fédéfactorn régionale de défense contre les organismes nuisibles – Federación regional de defensa contra organismos perjudiciales	PB	Pozo o estación de bombeo
FPR	Filtro plantado con carrizos	PT/P_{tot}	Fósforo total
HA	Filtro plantado con vegetales	PVC	Policloruro de vinilo
HAv	Filtro plantado con vegetales, de flujo vertical	SANDRE	Service d'administrfactorn nationale des données et référentiels sur l'eau – Servicio de administración nacional de datos y referencias sobre el agua
HAh	Filtro plantado con vegetales, de flujo horizontal	SICSM	Syndicat intercommunal du centre et du sud de la Martinica – Sindicato intercomunal del centro y sur de Martinica
INSEE	Institut national de la statistique et des études économiques – Instituto nacional de estadística y estudios económicos	SIEAM	Syndicat intercommunal d'eau et d'assainissement de Mayotte – Sindicato intercomunal del agua y saneamiento de Mayotte
IP	Indice de protección	ETAR	Estación de tratamiento de aguas residuales
Irstea	Institut national de recherche en sciences et technologies pour l'environnement et l'agriculture – Instituto nacional de investigación en ciencias y tecnologías para el medio ambiente y la agricultura	SPE	Service police de l'eau – Servicio de policía del agua
		T°	Temperatura
		UV	Ultravioletas

Lista de figuras, cuadros y cuadros

9

Figures

- 9 **Figura 1.** Evolución del número de humedales artificiales (HA) en Francia Metropolitana (A) y en Mayotte (B) (Base de datos ERU, SIEAM).
- 10 **Figura 2.** Corte transversal esquemático de un HA de flujo vertical (Dibujo Saurel para AFB).
- 11 **Figura 3.** Ilustración del papel mecánico de los vegetales en los lechos de secado de lodos plantados con carrizos.
- 11 **Figura 4.** Esquema del sistema tropical (Esquema de un humedal artificial adaptado a la zona tropical)
- 12 **Figura 5.** Esquema del proceso clásico metropolitano.
- 13 **Figura 6.** Lámina dentada para recirculación manual.
- 13 **Figura 7.** Esquema de un filtro vertical insaturado/saturado (Dibujo Saurel para AFB).
- 14 **Figura 8.** Alimentación en el 2º nivel de la estación de Mansarde Rancée (Martinica) antes de la plantación, febrero de 2014.
- 15 **Figura 9.** Esquema de un filtro de flujo horizontal (Dibujo Saurel para AFB).
- 16 **Figura 10.** Lecho bacteriano de baja carga como segunda etapa de tratamiento (Fuente: sistema Combipur).
- 17 **Figura 11.** Operación de extracción de lodos en Bois d'Opale 1, Guyana. Estos lodos pueden ser valorizados en agricultura (Epnac, 2014).
- 21 **Figura 12.** Distribución de las cargas hidráulicas aplicadas en los filtros de la estación de Taupinière (Martinica) entre el 1/01/2015 y el 31/05/2017.
- 22 **Figura 13.** Inundación de los filtros de la estación de Taupinière durante la tormenta Matthew.
- 22 **Figura 14.** Vegetales plantados en los filtros en servicio de la estación de Taupinière después del paso de la tormenta Matthew.
- 24 **Figura 15.** Dispersión de los valores de las muestras en función de las concentraciones.
- 25 **Figura 16.** Cargas tratadas en función de las cargas aplicadas para los parámetros DQO, SST y NTK para los dos tipos de procesos.
- 26 **Figura 17.** Comparación de los rendimientos de las diferentes configuraciones de los humedales artificiales (HA).
- 34 **Figura 18.** Fases de un proyecto de construcción de un filtro plantado con vegetales (HA) por división o adición de una nueva línea de agua.
- 35 **Figura 19.** Ejemplo de división en la estación de Taupinière (Martinica).
- 39 **Figura 20.** Tabique de separación de dos filtros en el mismo compartimento.
- 41 **Figura 21.** Red de alimentación aérea con la placa anti-derrubio (a la izquierda) o enterrada durante un entoldado con agua (a la derecha).
- 41 **Figura 22.** Esquema de las canalizaciones de aireación-drenaje.
- 47 **Figura 23.** Conclusiones del estudio sobre el orden de las Zingiberales.
- 48 **Figura 24.** Filtro plantado con *Heliconia psittacorum*.
- 49 **Figura 25.** Ataque de orugas en *Canna indica* en la estación des Mangles en Guadalupe.
- 49 **Figura 26.** Acodo en *Clinogyne comorensis*.
- 52 **Figura 27.** Colada de lodo en el filtro plantado con vegetales (HA) de Salazie en La Reunión.
- 54 **Figura 28.** Colmatación del filtro de Bois d'Opale 1 con lateritas.
- 54 **Figura 29.** Muerte de las *Thysanolaena maxima* a nivel de los puntos de alimentación, estación de Mansarde Rancée en Martinica.
- 57 **Figura 30.** A) Protección de las electroválvulas contra la radiación solar. B) Aireación en un armario eléctrico.
- 59 **Figura 31.** Integración paisajística de un HA en una urbanización en Guyana.

Cuadros

- 19 **Cuadro 1.** Presentación de las diferentes estaciones pilotos en la zona tropical
- 20 **Cuadro 2.** Presentación de las características de las aguas residuales brutas de los DFU en periodo seco y durante los periodos de lluvia, y comparación con los datos de periodos secos de pequeñas comunidades rurales metropolitanas (Mercoiret, 2010)
- 23 **Cuadro 3.** Síntesis de los análisis realizados en las muestras de entrada y salida del filtro (1era etapa de tratamiento)
- 28 **Cuadro 4.** Rendimientos mínimos de tratamiento esperados para los parámetros DBO5, DQO y SST definidos por el decreto del 21 de julio de 2015
- 30 **Cuadro 5.** Síntesis de la información para la selección de las variantes de humedales artificiales (HA) a implementar.
- 32 **Cuadro 6.** Comparación del HE metropolitano y tropical para pequeñas comunidades (< 2 000 HE)
- 33 **Cuadro 7.** Coeficientes correctores para evaluar la capacidad de pequeños colectivos, según la circular del 22 de mayo de 1997
- 37 **Cuadro 8.** Cargas de dimensionamiento del filtro en operación para un filtro de flujo vertical de drenaje libre en la primera etapa de tratamiento
- 51 **Cuadro 9.** Síntesis de las especies seleccionadas para los humedales artificiales (HA) en los DFU
- 53 **Cuadro 10.** Lista de los documentos por aportar y de las pruebas por realizar por el constructor durante la fase de puesta en marcha de la estación
- 59 **Cuadro 11.** Síntesis de las tareas por efectuar en el marco de la explotación de HA de 100 y 800 HE
- 62 **Cuadro 12.** Frecuencia y modo de medición de los caudales en el marco del seguimiento y control reglamentarios (decreto del 21 de julio de 2015)
- 63 **Cuadro 13.** Frecuencia y parámetros de calidad de las aguas a analizar en el marco del control y seguimiento reglamentarios (decreto del 21 de julio de 2015)

Encuadres

- 4 FPR y HA
- 8 Habitante-Equivalente (HE)
- 12 El sistema clásico metropolitano
- 13 Cálculo de la tasa de recirculación
- 18 Autótrofos y heterótrofos
- 19 Extracción por los vegetales
- 20 Carga hidráulica nominal aplicada en el filtro en operación
- 27 Tratamiento del fósforo
- 37 Ejemplos de dimensionamiento
- 47 Ciclo vegetativo
- 57 Índice de protección IP68

Titres des figures et tableaux vérifiés. J'ai remis les mêmes que dans le texte lorsqu'ils étaient différent (dans le word)

Bibliografía 10

- AFNOR. Station d'épuration. Partie 1 : Principes généraux de construction. Norme française NF EN 12255-1, Avril 2002 : indice de classement P 16-700-1. 18 p.
- AFNOR. Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats – Partie 1 : détermination de la résistance à l'usure (micro-Deval). Norme française NF EN 1097-1, Août 2011, indice de classement P18-650-1. 14 p.
- AFNOR. Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats – Partie 2 : méthode pour la détermination de la résistance à la fragmentation. Norme française NF EN 1097-2, 2 juin 2010, indice de classement P18-650-2. 32 p.
- Arias Lopez, José Luis. Vertical-flow constructed wetlands for the treatment of wastewater and stormwater from combined sewer systems. Thèse de doctorat en génie civil. Lyon : INSA, 2013, 234 p. Disponible en : <http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0102/these.pdf> (consultado el 25/07/2017).
- Choubert, J-M., Martin-Ruel, S., Budzinsky, H., Miège, C., Esperanza, M., Soulier, C., Lagarrigue, C., Coquery, M. « Évaluer les rendements des stations d'épuration. Apports méthodologiques et résultats pour les micropolluants en filières conventionnelles et avancées », Techniques Sciences Méthodes, 2011, vol. 1/2, pp. 44-62.
- Comité Français des Géosynthétiques. Recommandations générales pour la réalisation d'étanchéités par géomembranes. Edition 2017. Rueil-Malmaison : Comité français des géosynthétiques, 2017, 81 p. Disponible en : <http://www.cfg.asso.fr/publications/guides-de-recommandations/n10-recommandations-generales-realisation-etancheite-par-geomembranes> (consultado el 25/05/2017).
- Conseil des Communautés Européennes. Directive du conseil du 21 mai 1991 relative au traitement des eaux urbaines résiduaires (91/271/CEE). Journal officiel n° L 135 du 30/05/1991, pp. 0040–0052.
- Conservatoire botanique national de Mascarin (Boullet V. coord.) 2011. Index de la flore vasculaire de Mayotte (Trachéophytes) : statuts, menaces et protections. Version 2011.1 (mise à jour du 01 août 2011).
- Conservatoire botanique national de Mascarin, Antenne de Mayotte - Coconi - Disponible en <http://floremaore.cbnm.org> (consultado el 17/12/2016).
- Conservatoire botanique national de Mascarin (Boullet V. coord. et auteur principal) version 2012 - Index de la flore vasculaire de la Réunion (Trachéophytes) : statuts, menaces et protections. Disponible en <http://floremaore.cbnm.org> (consultado el 17/12/2016).
- Dotro, G., Langergraber, G., Molle, P., Nivala, J., Puigagut, J., Stein, O., von Sperling, M. « Treatment wetlands. Biological Wastewater Treatment Series », Treatment Wetlands, vol 7: IWA publishing, 2017, 184 p. Disponible en : <https://www.iwapublishing.com/books/9781780408767/treatment-wetlands>.
- Eme, C. Traitement des eaux usées domestiques par filtres plantés de macrophytes. Adaptation de la filière au contexte tropical : état de l'art. Rapport de recherche Irstea Lyon-Villeurbanne. Paris : Onema, 2012, 76 p. Disponible en : https://epnac.irstea.fr/wp-content/uploads/2016/10/DOM_Tt-eaux-us%C3%A9es-par-FP-macrophytes_C.Eme_.pdf (consultado el 25/07/2017).
- Epnac. Eléments de méthode pour la définition des niveaux de rejets du petit collectif. Guide technique atelier de travail du groupe Evaluation des procédés nouveaux d'assainissement des petites et moyennes collectivités. Paris : Onema, 2016, 53 p. Disponible en : https://epnac.irstea.fr/wp-content/uploads/2016/05/Element-de-methode-pour-la-definition-des-niveaux-derejet-du-petit-collectif_vf.pdf (Consultado el 25/05/2017).
- Epnac. Guide d'exploitation de la filière Filtres Plantés de Roseaux. Guide technique atelier de travail du groupe Évaluation des procédés nouveaux d'assainissement des petites et moyennes collectivités. Paris : Onema, 2014, 30 p. Disponible en : https://epnac.irstea.fr/wp-content/uploads/2012/08/Guide-exploitation-FPR_EPNAC_2014.pdf (Consultado el 25/05/2017).
- Epnac. Le véritable rôle des végétaux dans le traitement des eaux usées. Paris : Onema, 2014, 4 p. Disponible en : <https://epnac.irstea.fr/role-des-vegetaux-dans-l-assainissement/> (Consultado el 14/09/2017).
- Epnac. Protocole de prélèvement, d'échantillonnage et d'analyse des boues de FPR en vue de leur valorisation par épandage agricole. Guide technique atelier de travail du groupe Évaluation des procédés nouveaux d'assainissement des petites et moyennes collectivités. Paris : Onema, 2014, 32 p. Disponible en : https://epnac.irstea.fr/wp-content/uploads/2014/07/Onema-Irstea_Protocole-pr%C3%A9levement-FPR_Final.pdf (Consultado el 25/05/2017).
- Fournet, J. Flore illustrée des phanérogames de Guadeloupe et de Martinique : Clefs générales "Cycadaceae-Avicenniaceae". Paris : CIRAD, Gondwana Éditions, 2002, vol. 1, 1324 p.
- Fournet, J. Flore illustrée des phanérogames de Guadeloupe et de Martinique : « Lamiacea-Orchidaceae ». Paris : CIRAD, Gondwana Éditions, 2002, vol. 2, 1 213 p.
- Funk, V., Hollowell, T., Berry, P., Kelloff, C., Alexander, S.N. Checklist of the Plants of the Guiana Shield (Venezuela: Amazonas, Bolivar, Delta Amacuro; Guyana, Surinam, French Guiana). Contributions from the United States National Herbarium, 2007, vol. 55, 584 p.
- Gagnon, V., Chazarenc, F., Comeau, Y., Brisson, J. « Influence of macrophyte species on microbial density and activity in constructed wetlands », Water Science & Technology, 2007, vol.56 (3), pp. 249–254.
- Groupe macrophytes et traitement des eaux. Épuration des eaux usées par filtres plantés de macrophytes. Recommandations techniques pour la conception et la réalisation. Guide technique. Lyon : Agence de l'eau RMC, 2005, 45 p. Disponible en : <https://epnac.irstea.fr/wp-content/uploads/2012/08/Guide-Macrophytes.pdf> (Consultado el 25/07/2017).
- Lombard Latune, R., Eme, C., Riegel, C., Molle, P. Suivi des stations expérimentales FPR à Mayotte. Bilan des campagnes de 2008 à 2013. Rapport de recherche Irstea Lyon-Villeurbanne. Paris : Onema, 2014, 52 p. Disponible en : https://epnac.irstea.fr/wp-content/uploads/2016/10/DOM_Retour_exp_Mayotte_2014.pdf (Consultado el 25/07/2017).
- Lombard Latune, R., Lacombe, G., Molle, P. Retours d'expérience sur les premiers suivis expérimentaux des FPR en Guyane. Suivi des performances de Bois d'Opale 1 et 2. Rapport de recherche Irstea Lyon-Villeurbanne. Paris : Onema, 2014, 36 p. Disponible en : https://epnac.irstea.fr/wp-content/uploads/2016/10/DOM_Retour_exp_Guyane_2014.pdf (Consultado el 25/07/2017).
- Lombard Latune, R., Laporte-Daube, O., Fina, N., Peyrat, S., Pelus, L., Molle, P. « Which plants are needed for a vertical-flow constructed wetland under tropical climate ? », Water Science & Technology, 2017, vol. 75 (8), pp. 1873-1881.
- Lombard Latune, R., Molle, P. Quelles plantes pour les filtres plantés de végétaux dans les DOM ? Rapport de recherche Irstea Lyon-Villeurbanne. Paris : Onema, 2016, 76 p. Disponible en : https://epnac.irstea.fr/wp-content/uploads/2016/10/Rapport_plantes_FPV_DOM_2016.pdf (Consultado el 25/05/2017).

- Mercoiret, L. Qualité des eaux usées domestiques produites par les petites collectivités. Application aux agglomérations d'assainissement inférieures à 2 000 Équivalents-Habitants. Rapport scientifique. Paris : Onema, 2010, 55 p. Disponible en : <https://epnac.irstea.fr/wp-content/uploads/2012/05/Qualit%C3%A9-des-eaux-us%C3%A9es-domestiques-produites-par-les-petites-collectivit%C3%A9s.pdf> (Consultado el 25/07/2017).
- Ministère de l'Écologie du Développement durable et de l'Énergie. Arrêté du 21 juillet 2015 relatif aux systèmes d'assainissement collectif et aux installations d'assainissement non collectif, à l'exception des installations d'assainissement non collectif recevant une charge brute de pollution organique inférieure ou égale à 1,2 kg/j de DBO5. JORF n°0190 du 19 août 2015 p. 14457 texte 2.
- Ministère de l'Équipement, du Logement, des Transports et du Tourisme. Circulaire du 22 mai 1997 relative à l'assainissement non collectif. Bulletin Officiel n°649-97 du 22 mai 1997 du ministère de l'Équipement, 16 p.
- Molle, P., Liénard, A., Boutin, C., Merlin, G., Iwema, A. « How to treat raw sewage with constructed wetlands: an overview of the French systems », *Water Science & Technology*, 2005, vol. 51 (9), pp. 11-21.
- Morvannou, A., Forquet, N., Michel, S., Troesh, S., Molle, P. « Treatment performances of French constructed wetlands : results from a database collected over the last 30 years », *Water Science & Technology*, 2015, vol. 71 (9), pp. 1333-1339.
- Morvannou, A., Troesch, S., Esser, D., Forquet, N., Petitjean, A., Molle, P. « Using one filter stage of unsaturated/saturated vertical flow filters for nitrogen removal and footprint reduction of constructed wetlands », *Water Science & Technology*, 2017, vol. 76 (1), pp. 124-133.
- Morin E., Dimastromatteo, N., Rakedjian, B. Application de la directive 91/271/CEE relative au traitement des eaux résiduaires urbaines, Guide de définitions à l'attention des services en charge de la police de l'eau pour le renseignement de la base de données ROSEAU. Paris : MEDDE, 2013, 119 p. Disponible en : http://assainissement.developpement-durable.gouv.fr/documents/2013_06_G_def_ERU_version_2-0-1.pdf (Consultado el 25/07/2017).
- Petitjean, A., Wanko, A., Forquet, N., Mosé, R., Lawniczak, F., Sadowski, A. « Diphasic transfer of oxygen in vertical flow filter: A modelling approach », *Water Science & Technology*, 2011, vol. 64 (1) : pp. 109-116.
- Prost-Boucle, S., Molle, P. « Recirculation on a single stage of vertical flow constructed wetland: treatment limits and operation modes », *Ecological Engineering*, 2012, vol. 43, pp. 81-84.
- Pôle d'appui technique aux services déconcentrés du ministère de l'Agriculture. Cadre guide pour un cahier des clauses techniques particulières (CCTP), filtres plantés de roseaux. Paris : ministère de l'Agriculture et de la Pêche, avril 2007, 76 p. Disponible en : https://epnac.irstea.fr/wp-content/uploads/2012/08/CadreguideCCTP_FPR1.pdf (consultado el 25/05/2017).
- Richez, N. Comment développer un assainissement durable dans les DOM ? État des lieux de l'assainissement des départements d'outre-mer et proposition d'actions pour le développer. Thèse professionnelle de Mastère d'action publique. Paris : École des Ponts, 2011, 102 p. Disponible en : https://epnac.irstea.fr/wp-content/uploads/2016/10/DOM_Th%C3%A8se-NRichez-2011.pdf (consultado el 25/05/2017).

Citas

Lombard Latune R & Molle P, 2017. Humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales domésticas en zona tropical. Guía de dimensionamiento para zonas tropicales. Agencia Francesa de la Biodiversidad, colección *Guías y protocolos*, 72 páginas

ISBN web-pdf: 978-2-37785-091-4

Traducción

Laura Delgado-González, a partir de la versión francesa © AFB, octubre de 2017

Edición

Véronique Barre, Béatrice Gentil-Salasc

Creación y diseño gráficos

Béatrice Saurel

Impresión

IME by Estimprim
© AFB, octubre de 2019

