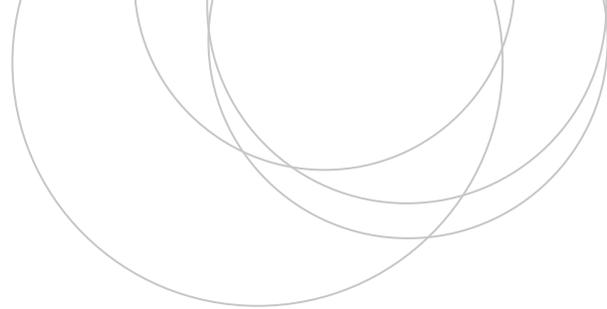




Universidad
del País Vasco

Euskal Herriko
Unibertsitatea

ZIENTZIA
ETA TEKNOLOGIA
FAKULTATEA
FACULTAD
DE CIENCIA
Y TECNOLOGÍA



Trabajo Fin de Grado
Grado en Ingeniería Química

Ajuste de los parámetros del modelo integral de una biojardinera con trampa de grasas bioactiva

Autora:

Onintze Parra Ipiña

Director:

Roberto Aguado Zarraga

Codirector:

Federico Mijangos Antón

ÍNDICE

| | |
|--|-----------|
| 1. INTRODUCCIÓN | 1 |
| 1.1. EL SALVADOR | 1 |
| 1.2. BIOJARDINERA | 5 |
| 1.3. TRAMPA DE GRASAS | 9 |
| 1.4. MODELADO INTEGRAL | 12 |
| 2. OBJETIVOS | 16 |
| 3. METODOLOGÍA | 17 |
| 3.1. DESCRIPCIÓN DE LA PLANTA | 17 |
| 3.2. MEDICIÓN DE PARÁMETROS | 18 |
| 4. RESULTADOS | 24 |
| 4.1. BIOJARDINERA SITUADA EN LA UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR . . | 24 |
| 4.2. BIOJARDINERA SITUADA EN COSTA RICA | 33 |
| 5. CONCLUSIONES | 47 |
| 6. NOMENCLATURA | 49 |
| 7. BIBLIOGRAFÍA | 51 |

1. INTRODUCCIÓN

El agua limpia, potable y accesible es imprescindible para construir un mundo justo. En el planeta hay suficiente agua dulce como para cumplir con el objetivo, pero este recurso no se está distribuyendo de forma adecuada, derivando así en sequías, escasez y falta de acceso a fuentes de agua fiables (Moran, s.f.), agravándose este problema en países del Sur Global.

Si bien es cierto que a día de hoy más del 90% de la población mundial tiene acceso a fuentes de agua, debido a la mala calidad y a la escasez de recursos hídricos, la seguridad de las personas queda vulnerada en muchos lugares. Y es que 3 de cada 10 personas carecen de acceso a servicios de agua potable seguros y, en cuanto a saneamiento, 6 de cada 10 carecen de instalaciones seguras. También hay que tener en cuenta que en el 80% de los hogares sin acceso a agua corriente, son mujeres y niñas las encargadas de recolectar el agua. En África y Asia, la mujer camina 6 km de media al día para recoger agua (iAgua, 2013).

La escasez afecta a más del 40% de la población mundial, esperándose que este número aumente en las próximas décadas. Las consecuencias no las sufren solo las personas: más del 80% de aguas residuales resultantes de la actividad humana se vierten sin ningún tipo de tratamiento en los ríos o el mar, generando la contaminación de los mismos (Moran, s.f.).

Es evidente que en relación al abastecimiento y saneamiento de aguas es necesario el desarrollo de tecnologías de bajo coste y accesibles, también llamadas tecnologías para el Desarrollo Humano o tecnologías apropiadas. Entre las tecnologías de bajo coste relacionadas con el acceso al agua y al saneamiento se encuentran la biojardinera y la trampa de grasas, que se utilizan en la depuración de aguas grises, es decir, las aguas residuales de ducha, bañera, lavamanos, lavadora y de la cocina, pero no incluyen los residuos del inodoro (Li y cols., 2009). La cantidad de aguas grises producida por persona y por día depende del estilo de vida, de la población y de las costumbres, pero se estima que varía entre 90 y 120 litros. Aun así, en comunidades con sequía y acceso limitado al agua, esta cantidad desciende hasta los 20 l/día persona (Li y cols., 2009).

En la composición de este tipo de aguas residuales se encuentran nutrientes (principalmente nitrógeno, fósforo, azufre, calcio y potasio), restos de materia orgánica, sólidos en suspensión y grasas y aceites. Por lo tanto, las tecnologías de tratamiento de aguas grises incluyen sistemas físicos, químicos y biológicos (Li y cols., 2009). Además, se requiere de pretratamientos como tanques de homogenización o filtros para reducir la cantidad de partículas y de grasas y aceites. Para el tratamiento de estas últimas, la trampa de grasa es uno de los sistemas más utilizados en comunidades del Sur Global.

1.1. EL SALVADOR

En este trabajo se pretende abordar el análisis de la eficiencia de un sistema de tratamiento de aguas grises instalado en el cantón El Rodeo (municipio de Victoria, en el departamento de Cabañas, El Salvador). El proyecto se realiza en colaboración con ADES Santa Marta (Asociación de Desarrollo Económico Social), Ingeniería Sin Fronteras - Mugarik Gabeko Ingeniaritza y el Ayuntamiento de Bilbao. El Salvador es un país situado al sudoeste de América Central. Limita al norte y noreste con Honduras y al oeste con Guatemala, como se muestra en la Figura 1.



Figura 1. Ubicación geográfica de la República de El Salvador.

En cuanto a la situación socioeconómica, más de un cuarto de la población vive en situación de pobreza (Rodríguez de Zuniga y cols., 2018), encontrándose la mayoría en áreas rurales. Esto conlleva la vulneración del derecho humano al agua en la mayoría de poblaciones, entre las que se encuentran las comunidades de Cabañas. Como se muestra en la Figura 2, más de la mitad de hogares no tienen sistema de abastecimiento. Las comunidades que sí reciben agua potable lo hacen además con una frecuencia muy reducida: en la comunidad de Santa Marta, por ejemplo, reciben agua una vez al mes, lo que supone un gran coste en sistemas de almacenamiento para evitar que se formen charcos y contraer enfermedades gastrointestinales o infecciones como el dengue por la acumulación de mosquitos alrededor del agua estancada.

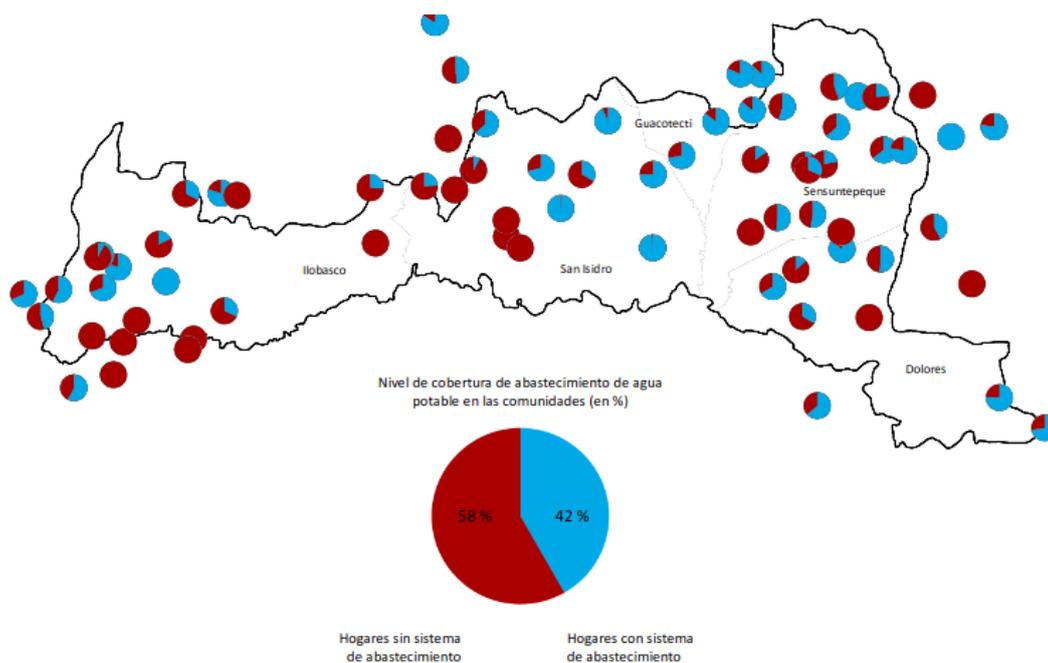


Figura 2. Nivel de cobertura de abastecimiento de agua en comunidades de Cabañas. Fuente: ADES (2020)

La falta de abastecimiento supone grandes consecuencias para las comunidades rurales más allá de la necesidad de desplazamiento a fuentes cercanas, tarea que recae en la mayoría de casos en las mujeres, aumentando el trabajo reproductivo que realizan e intensificando la división de roles de género ya existente. La falta de agua trae también como consecuencia la dificultad de riego de la cosecha, originando escasez de alimentos en las familias y enfermedades relacionadas con la malnutrición. Además de las relacionadas con la alimentación, la falta de abastecimiento trae consigo enfermedades causadas por los kilómetros recorridos y el peso cargado para obtener agua o patologías relacionadas con el consumo de agua contaminada (Perez-Pons, 2019).

Lo mismo ocurre con la gestión de las aguas residuales: en el área rural el 91.7% de aguas residuales se vierten a la calle o al aire libre, el 3.1% a quebradas o ríos y el 2% a fosas sépticas (Rodríguez de Zuniga y cols., 2018). Esto supone un foco de infección debido a la falta de saneamiento, y es que en la mayoría de hogares se utilizan letrinas sin ningún tipo de tratamiento de aguas negras o excretas. Por estos motivos, el agua de los ríos de El Salvador es mala o pésima en la mayoría de casos, poniendo en peligro tanto la salud humana como el medioambiente. Por todo esto, se cree necesaria la implementación de sistemas y tecnologías apropiadas de abastecimiento y saneamiento de agua, como la trampa de grasas y la biojardinera.

Estos sistemas están considerablemente condicionados por la climatología salvadoreña. Como se observa en la Figura 3, la temperatura no varía mucho durante el año: en la temporada calurosa la máxima alcanza 31 °C y la mínima se mantiene alrededor de 20 °C, mientras que en la temporada fresca la temperatura máxima ronda los 28 °C y las mínimas son de 19 °C aproximadamente (Weather Spark, 2020).

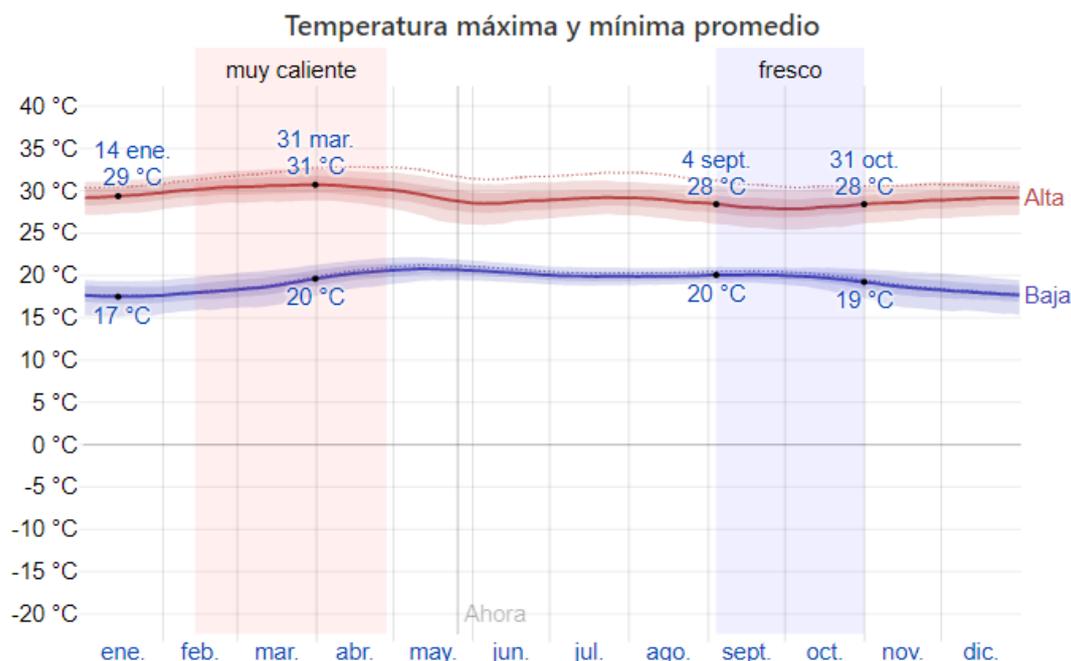


Figura 3. Temperatura máxima (línea roja) y mínima (línea azul) promedio en El Salvador. Fuente: Weather Spark (2020).

Considerando prácticamente estable la temperatura promedio a lo largo del año, la problemática recae principalmente en las precipitaciones. El clima salvadoreño está dividido en dos estaciones muy marcadas: la época lluviosa (entre mayo y octubre) y la época seca (entre noviembre y abril). Como muestra la Figura 4, hay una diferencia descomunal en la precipitación de lluvia. En la época lluviosa el promedio ronda los 140 mm acumulados, cayendo la mayoría de lluvia durante los 31 días centrados alrededor del 19 de septiembre, con una acumulación de 146 mm. En la época seca, en cambio, el promedio no supera los 10 mm, siendo la fecha con menor cantidad de lluvia los 31 días centrados alrededor del 15 de febrero, con una acumulación de 2 mm (Weather Spark, 2020).

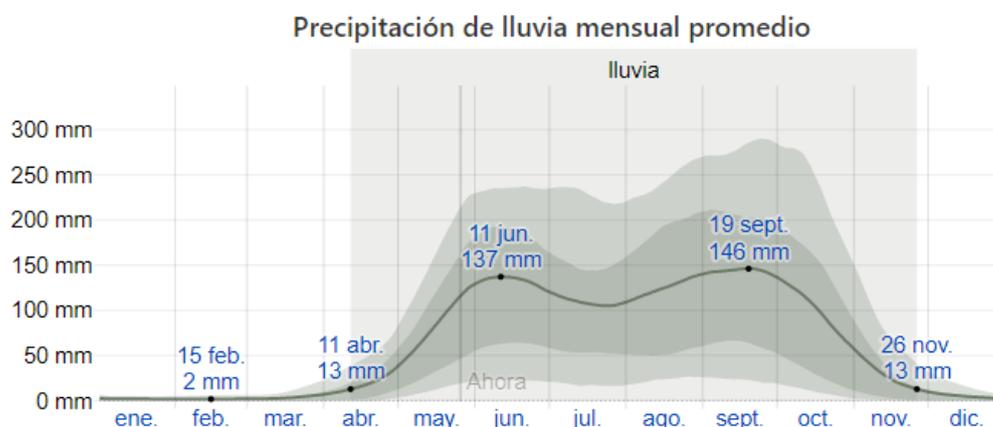


Figura 4. Lluvia promedio (línea sólida) acumulada en un periodo móvil de 31 días centrado en el día en cuestión en El Salvador. Fuente: Weather Spark (2020).

La escasez durante la época seca dificulta la tarea de recolección de agua, incrementando las consecuencias mencionadas previamente. En cuanto a los sistemas de saneamiento, la sequía

aumenta la concentración de contaminantes en ríos y quebradas y puede afectar a los sistemas como la biojardinera. En la época lluviosa, en cambio, los contaminantes se diluyen con el agua de lluvia, lo que puede dar lugar a obtener una idea equivocada a la hora de medir la calidad. Por otro lado, amplía las posibilidades de que sistemas como la biojardinera se desborden, por lo que es un parámetro a tener en cuenta a la hora de realizar el diseño de los equipos de saneamiento.

1.2. BIOJARDINERA

La biojardinera, también conocida como humedal artificial, es un sistema de tratamiento de aguas utilizado principalmente para aguas de origen doméstico e industrial. Estas tecnologías se basan en los principios de los humedales naturales, llevándose a cabo la depuración mediante procesos físicos, químicos y biológicos (Salgado y cols., 2009).

En cuanto a las ventajas de este sistema, además de tener un coste reducido, hacen uso de muy pocos recursos energéticos y son sostenibles medioambientalmente. A su vez, tienen una gran capacidad de eliminación de contaminantes, por lo que resultan una opción muy adecuada para la depuración de aguas grises en zonas rurales y especialmente en comunidades pequeñas. Las biojardineras están compuestas de agua, sustratos, plantas y microorganismos, siendo la selección de los dos últimos fundamental en la eliminación de materia orgánica. La vegetación facilita la filtración y adsorción, permite la transferencia de oxígeno y controla el crecimiento de las algas debido a que limita la penetración de la luz solar (Salgado y cols., 2009).

Las plantas utilizadas en una biojardinera deben ser seleccionadas correctamente para que el sistema funcione de manera eficaz. La vegetación que suele utilizarse en las biojardineras son especies que colonizan los humedales naturales, en general plantas acuáticas emergentes (Ortega de Miguel y cols., 2013). También llamadas macrófitas, se desarrollan en aguas no muy profundas, se arraigan al subsuelo y sobresalen hasta 2-3 metros por encima del agua. Estas plantas son capaces de aguantar situaciones de falta de oxígeno, condición que se da en suelos encharcados. Las más utilizadas son las siguientes, Figura 5 (Bolaños y González, 2020):

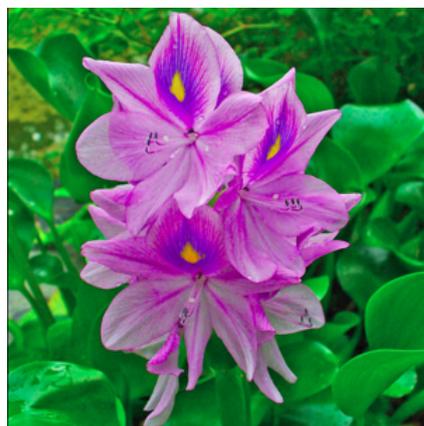
- *Typha dominguensis Pers.* Comúnmente llamada tule o espadaña (Figura 5a), es una especie con un crecimiento rápido y una elevada biomasa, convirtiéndose así en una de las plantas más competitivas. Tiene gran resistencia a los contaminantes y tolera condiciones severas como pH=10 o salinidad de hasta 8000 mg/L, por lo que es ampliamente utilizada para efluentes industriales (Bolaños y González, 2020).
- *Eichornia crassipes.* Conocida como jacinto de agua (Figura 5b), abunda en la región tropical de América del Sur. Resiste un rango de pH entre 6.0 y 8.0 y tolera las fluctuaciones del nivel del agua, de la temperatura y de las sustancias tóxicas. Crece fácilmente en aguas ricas en nutrientes como el nitrógeno, el fósforo y el potasio, y su uso principal es el de la eliminación de estos compuestos y de metales pesados de las aguas residuales.
- *Zantedeschia aethiopica.* También denominada cala, esta planta de follaje perenne destaca por sus singulares flores (Figura 5c). Puede ser cultivada en tierra o en medios acuáticos y tanto en interiores como en exteriores. Si bien es cierto que es una planta resistente y fácil de reproducir, requiere de algunos cuidados. Es preferente que se cultive en zonas sombreadas y, a ser posible, lejos de corrientes de aire. En la temporada de floración, se le deben aplicar fertilizantes ricos en potasio para cuidar la salinidad, ya que

es poco resistente a ella.

- *Phragmites australis*. Comúnmente llamada carrizo, caña o cañavera, es de las más utilizadas en las regiones europeas. Sus tallos o cañas flexibles pueden alcanzar hasta los 3 metros de altura. Soportan niveles de salinidad moderados y rangos de pH entre 4.5 y 7.5. Requiere de cuidados simples como calor moderado y abundante agua, por lo que es una planta muy adecuada para humedales artificiales.



(a) *Typha dominguensis* Pers (espadaña).



(b) *Eichornia crassipes* (jacinto de agua).



(c) *Zantedeschia aethiópica* (cala).



(d) *Phragmites australis* (cañavera).

Figura 5. Vegetación más utilizada en las biojardineras.

Las biojardineras se clasifican en función del tipo de flujo como superficiales y subsuperficiales. En las primeras, el agua mantiene continuamente contacto con la atmósfera. La profundidad de la biojardinera ronda los 0.4 m y el agua, por lo general, circula a través de los tallos de las plantas. Normalmente se utilizan para efluentes que han sido previamente pretatados (Bolaños y González, 2020). En la Figura 6 se muestra una biojardinera de flujo superficial:

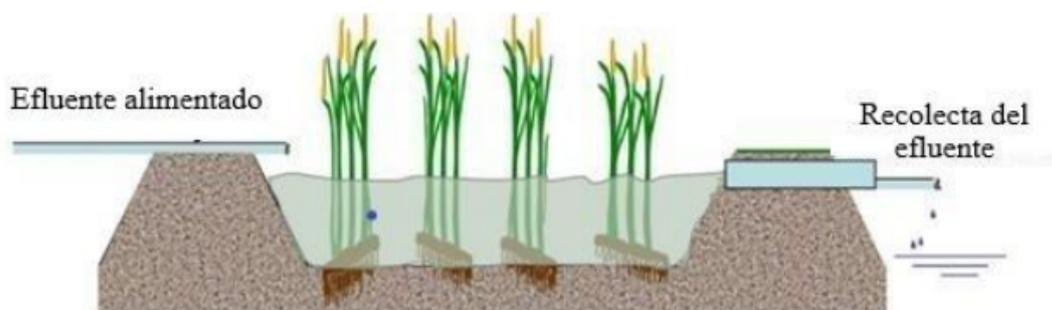


Figura 6. Vista esquemática de una biojardinera de flujo superficial. Fuente: Urkijo (2019).

En las biojardineras de flujo subsuperficial el efluente circula únicamente a través de un material granular como la arena o la grava, con permeabilidad adecuada y confinado en un recinto impermeabilizado. Normalmente emplean cañavera como vegetación. Por lo general, son sistemas de tamaño más reducido que los de flujo superficial y suelen utilizarse en poblaciones con menos de 2000 habitantes (Bolaños y González, 2020). Pueden ser de dos tipos: de flujo horizontal o vertical. En las primeras las aguas residuales realizan una trayectoria más o menos horizontal. La profundidad del lecho es de entre 0.3 y 0.9 m y se coloca entre 0.05 y 0.1 m por debajo de la superficie (Urkijo, 2019). Las paredes y el fondo deben estar impermeabilizados para un funcionamiento correcto. En la Figura 7 se muestra un esquema típico del sistema:

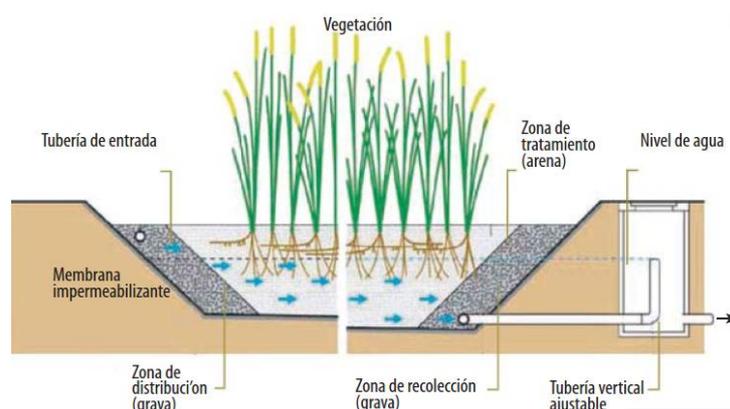


Figura 7. Vista esquemática de una biojardinera de flujo subsuperficial horizontal. Fuente: Bolaños y González (2020).

En las biojardineras de flujo vertical las aguas residuales se introducen en la parte superior del sistema, se filtran mediante un lecho de arena o grava y se recogen a través de una red situada en la base de la instalación. La alimentación se vierte de manera intermitente y en grandes cantidades con el objetivo de inundar la superficie y que el líquido drene hacia la base. Se muestra el sistema en la Figura 8:

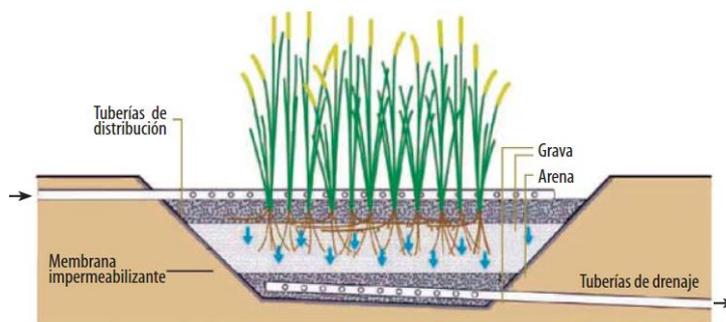


Figura 8. Vista esquemática de una biojardinera de flujo subsuperficial vertical. Fuente: Bolaños y González (2020).

Las biojardineras pueden eliminar la mayoría de contaminantes presentes en las aguas grises. Los sólidos en suspensión que no han sido eliminados en tratamientos previos como la trampa de grasas sedimentan en la biojardinera, quedando fuera del efluente tratado. La materia orgánica, en cambio, es degradada mediante los microorganismos contenidos en la biojardinera a través de procesos aeróbicos y anaeróbicos. La degradación aeróbica sucede gracias a los microorganismos quimioheterotróficos, que oxidan la materia orgánica liberando amonio; y los quimioautótrofos, que oxidan el nitrógeno amoniacal a nitrato y nitrito mediante la nitrificación. La degradación anaeróbica, como su nombre indica, se da en ausencia de oxígeno mediante bacterias herotróficas de tipo anaeróbico. Estas convierten primero la materia orgánica en ácidos y alcoholes, y en metano y dióxido de carbono en un paso posterior (Bolaños y González, 2020). El nitrógeno de las aguas grises es eliminado mediante mecanismos de volatilización, amonificación, nitrificación/desnitrificación y absorción, mientras que los metales se remueven a través de procesos de sedimentación, filtración, adsorción o intercambio catiónico.

En 2011, en Zapote, Costa Rica, Moncada (Moncada, 2011) realizó una evaluación del diseño de una biojardinera de flujo subsuperficial. Las dimensiones de la misma fueron de 5 m de largo, 1 m de ancho y 0.7 m de profundidad (Figura 9) y empleaba dos tipos de piedra en el lecho filtrante y cinco especies diferentes de vegetación (Moncada, 2011). Las aguas grises eran pretratadas mediante tres sistemas antes de entrar en la biojardinera.

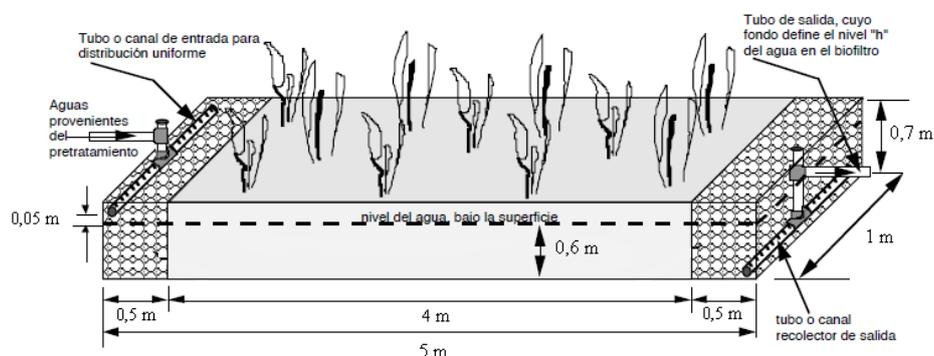


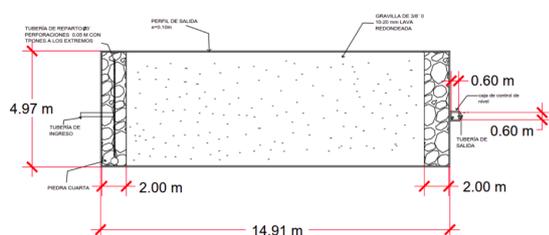
Figura 9. Dimensiones de la biojardinera construida en Zapote, Costa Rica. Fuente: Moncada (2011).

A la hora de realizar el diseño, se tuvo en cuenta que, por lo general, el caudal generado por

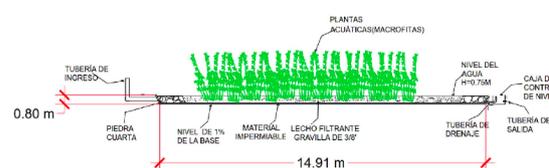
una vivienda es de 165 l: 100 l provenientes de la ducha, 15 l del lavamanos, 20 l del lavaplayos y 30 l del lavado de ropa (Moncada, 2011). En este caso particular, la biojardinera únicamente trata las aguas del lavaplatos, por lo que el caudal escogido para realizar el diseño es de 20 l/día.

Para analizar los resultados del tratamiento, la autora realizó mediciones del caudal, del nivel del agua, de la temperatura y el pH y del oxígeno disuelto. Se observó así que la biojardinera dispone de una gran capacidad para remover DQO y sólidos suspendidos. En cambio, no resulta adecuada a la hora de eliminar grasas y aceites de acuerdo con el Reglamento de Vertido de Costa Rica. También se observó que la biojardinera estaba sobredimensionada debido a que el caudal de entrada era menor que el supuesto para el diseño (Moncada, 2011).

En 2020 Bolaños y González (Bolaños y González, 2020) analizaron el funcionamiento de una biojardinera instalada en los comedores de la Universidad de El Salvador. Para abordar el diseño se obtuvo a través de metodologías experimentales el caudal medio del comedor (14.48 m³/día). Utilizando este dato mediante mediciones de temperatura y de carga orgánica, se dimensionó la biojardinera a escala real (Figura 10):



(a) Vista aérea de la biojardinera.



(b) Vista frontal de la biojardinera.

Figura 10. Dimensiones de la biojardinera construida en la Universidad de El Salvador.

La eficiencia de eliminación de obtenida con la biojardinera fue del 90% aproximadamente en el caso de la DQO y de la DBO₅, mientras que superó el 94% en la eliminación de aceites y grasas mediante la vegetación. Este sistema en particular utiliza la especie *Phragmites Australis*.

1.3. TRAMPA DE GRASAS

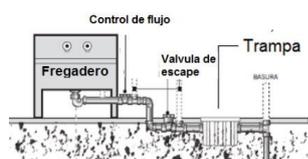
Las aguas grises provenientes de cocinas contienen cantidades notables de grasas y aceites. Existen diversos métodos y sistemas de eliminación (An y cols., 2017):

- Separación por gravedad
- Hidrociclones
- Sorción
- Precipitación química
- Flotación
- Filtración por membranas
- Oxidación química

- Biodegradación
- Electrocoagulación

En ocasiones se construyen sistemas complejos que aúnan varias de estas tecnologías. En lugares en los que no es viable la implementación de sistemas avanzados debido a su coste, su dificultad de mantenimiento y el requerimiento de personas cualificadas, el método más utilizado es la flotación, cuyo equipo más característico es la trampa de grasas (Manso, 2018), un sistema cuyo funcionamiento se basa en reducir la velocidad de las aguas residuales en un depósito de geometría habitualmente rectangular para favorecer la separación por flotación del agua y las grasas en base a las diferencias de densidad (Solís y Ricardo, 2015). Además, los sólidos en suspensión sedimentan por su propio peso (Cruz y Sierra, 2016). El objetivo principal de la trampa de grasa es, por lo tanto, la eliminación de los productos que podrían afectar en las siguientes etapas de la depuración.

En cuanto a su estructura, es un sistema rectangular que funciona, como se ha explicado previamente, gracias a la flotación. Se basa en el método de separación por gravedad, aprovechando la disminución de la velocidad de las aguas residuales y la diferencia de densidades entre el agua y los hidrocarburos a separar (Solís y Ricardo, 2015). Debido a su bajo coste y su relativa facilidad de implantación, este sistema se ha utilizado, tanto en el tratamiento de aguas domésticas como industriales (restauración e industria alimentaria). Existen varios tipos de trampas de grasa en el mercado, como se muestra en la Figura 11 (Arellano y Sánchez, 2017). El interceptor hidromecánico de grasas se fabrica en acero y se emplea principalmente en interiores, cerca del punto de descarga. Son tecnologías compactas y utilizan el arrastre de aire y la diferencia de gravedad entre el agua y las grasas como método de separación. Pueden instalarse sobre el suelo o bajo tierra, como se muestra en la Figura 11a. El interceptor de grasa gravitatorio se construye habitualmente en hormigón (Figura 11b) y suele encontrarse en el exterior debido a su tamaño. Utiliza el tiempo de retención como principio de separación. Existen además otros dispositivos similares a los interceptores hidromecánicos que incorporan elementos para eliminar automáticamente la grasa acumulada (Figura 11c).



(a) Interceptor de grasa hidromecánico instalado bajo tierra. Fuente: Arellano y Sánchez (2017).



(b) Interceptor de grasa por gravedad. Fuente: Arellano y Sánchez (2017).



(c) Dispositivo de eliminación de grasa. Fuente: Arellano y Sánchez (2017).

Figura 11. Tipos de trampa de grasa.

A día de hoy son muchos los países en los que se utiliza esta tecnología, principalmente en América Central y América Latina. Así por ejemplo en 2017 se publicó una propuesta de diseño de trampa de grasas para restaurantes en México, que consideraba los distintos residuos que se generaban. Consta de cuatro sistemas, Figura 12 (Arellano y Sánchez, 2017):

- Admisión: Tubería que recibe las aguas grises del restaurante.
- Sedimentación: Lugar geométrico dentro de la trampa en el que, mediante una sedimentación, son depositados los residuos.
- Separación: Procedimiento mediante el que los residuos quedan atrapados a lo largo de la trampa.
- Escape: Tubería que desaloja el líquido hacia las siguientes etapas del sistema de depuración.

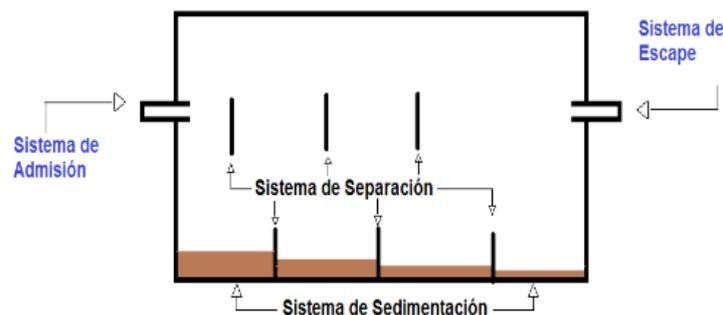


Figura 12. Sistemas que componen la trampa de grasa. Fuente: Arellano y Sánchez (2017).

Esta trampa se puede clasificar como interceptor de grasa hidromecánico. Es de tamaño reducido debido a su bajo tiempo de separación (aproximadamente un minuto). La separación se realiza mediante la acción del flujo hidráulico, el arrastre de aire, la diferencia de gravedad específica entre el agua y las grasas y el tamaño del interceptor (Arellano y Sánchez, 2017). Cuanto mayor sea la diferencia de gravedad específica entre el agua y la grasa, mayor será la velocidad de separación. Esta velocidad aumenta también cuando menor es la viscosidad del fluido portador de grasas. Además, el sistema se beneficia cuando la temperatura aumenta, debido a la disminución de la resistencia que opone la grasa y la disminución de su densidad, facilitando así la separación del agua (Arellano y Sánchez, 2017). Una vez separadas las grasas del flujo de agua residual, es necesaria la eliminación de las mismas, ya que de lo contrario se generan obstrucciones, malos olores y acumulaciones en los desagües. Arellano y Sánchez (2017) proponen dos métodos biotecnológicos, uno basado en bacterias y otro en enzimas. Las bacterias ayudan en el mantenimiento de las trampas de grasa descomponiendo los desechos orgánicos, digiriendo biológicamente los residuos y liberando dióxido de carbono y agua. La forma más habitual de aplicar el tratamiento bacteriano es como cultivo en líquido, que puede incluirse en el afluente o directamente en la trampa. También se emplea en ocasiones la aplicación de bacterias en bloques o incluso en polvo (Arellano y Sánchez, 2017). Las enzimas pueden aportar mejoras en la eficiencia de la eliminación de grasas, ya que actúan como catalizadores biológicos, altamente eficaces y capaces de actuar en condiciones suaves. Además, son sostenibles medioambientalmente y reducen la cantidad de residuos, ya que son naturalmente biodegradables (Arellano y Sánchez, 2017).

1.4. MODELADO INTEGRAL DE LA BIOJARDINERA CON TRAMPA DE GRASAS BIOACTIVA

Este TFG pretende dar continuidad al trabajo iniciado en 2018 por Leire García (García, 2018) y Mikel Manso (Manso, 2018) y continuado por Leire Urkijo (Urkijo, 2019) un año más tarde. El sistema instalado se muestra en la Figura 13.

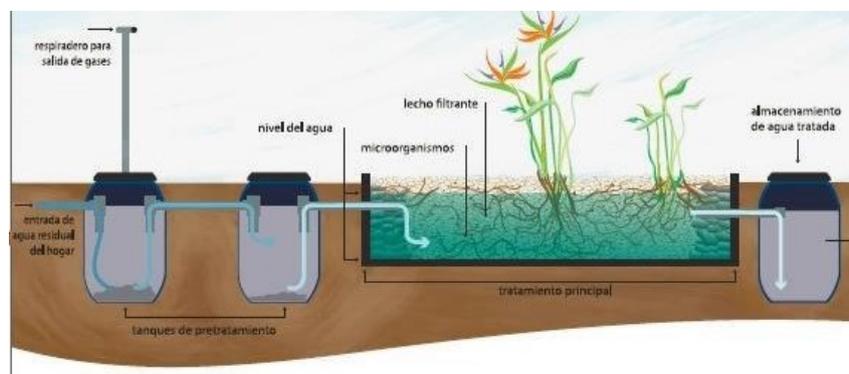


Figura 13. Esquema general del sistema. Fuente: ADES (2020).

Está compuesto por tres fases: el tratamiento primario o pretratamiento, el tratamiento secundario o biojardinera y el almacenamiento del agua tratada. El pretratamiento o trampa de grasas consiste en un bidón de 300 l de capacidad. El efluente contiene tanto sedimentos sólidos como grasas y aceites. Mediante un proceso de decantación los sólidos ligeros o flotantes suben a la superficie mientras que los pesados sedimentan en el fondo del tanque. Las grasas y aceites se separan mediante el proceso de flotación. Por lo general, se instalan dos trampas de grasas en serie con el objetivo de aumentar la efectividad. Los contaminantes separados pueden producir malos olores, por lo que es necesaria la instalación de un tubo de ventilación para la eliminación de los mismos. En la Figura 14 se muestran de manera más detallada los componentes de la trampa de grasas.



Figura 14. Esquema del tratamiento primario o trampa de grasas. Fuente: Urkijo (2019).

La corriente que sale de la etapa de pretratamiento se introduce en el tratamiento secundario o biojardinera. Esta etapa es considerada la más importante del proceso. Las piedras y la grava

situadas en la biojardinería funcionan como filtro para eliminar las partículas que no se han podido suprimir en la etapa previa. Por otro lado, las plantas se alimentan de los nutrientes contenidos en las aguas grises, mientras que los microorganismos que crecen de forma natural sobre la grava degradan la materia orgánica y los nutrientes restantes. Por último, el efluente tratado se dirige a un tanque de almacenamiento. Esta agua puede ser utilizada para el riego o bien vertida a un medio receptor, siempre que cumpla con la calidad impuesta por las leyes medioambientales.

Con el objetivo de conseguir una herramienta de diseño para el sistema considerando todas las etapas, fue necesaria la realización de un modelado integral, llevado a cabo por Leire Urkijo (Urkijo, 2019) y teniendo como referencia los modelados individuales de la trampa de grasas (Manso, 2018) y de la biojardinería (García, 2018).

Para realizar el modelado de la trampa de grasas, es necesario experimentar previamente con la tierra en la que se cultivan las plantas de la biojardinería, la cual es capaz de crear microorganismos al ser activada biológicamente y que se introduce de manera líquida a las aguas grises provenientes de los hogares (Manso, 2018). Al contener enzimas conocidas como lipasas, el producto activado tiene la capacidad de disolver las grasas, facilitando la depuración. El depósito de la trampa de grasas es tratado como un reactor de mezcla perfecta, con el fin de simplificar el proceso de realizar simulaciones.

Se plantean los siguientes balances de materia en estado no estacionario para analizar el cambio sufrido por las propiedades del caudal de agua respecto al tiempo (Manso, 2018):

$$\frac{dS_{out}}{dt}V_r = Q(S_{in} - S_{out}) - V_r r_s \quad (1)$$

$$\frac{dAG_{out}}{dt}V_r = -QAG_{out} + V_r r_s \quad (2)$$

$$\frac{dE_{out}}{dt}V_r = Q(E_{in} - E_{out}) \quad (3)$$

Considerando la trampa de grasas como un biorreactor bifásico (Figura 15), se proponen los siguientes balances de materia (Manso, 2018):

$$\frac{dm_{aceite}}{dt} = Q_{aceite}\rho_{aceite} - r_{s1}a \quad (4)$$

$$\frac{dX_b}{dt}V_l = Q_{agua}X_{in} - k_{sal}Q_{agua}X_b + X_b\mu - k_dX_b \quad (5)$$

$$\frac{dy}{dx}V_l = -Q_{agua}S_2 + r_{s2}a - Y_{XS}\frac{dX_b}{dt}V_l \quad (6)$$

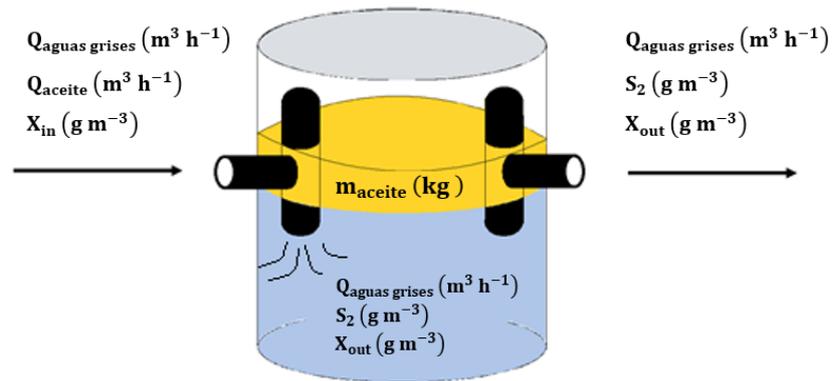


Figura 15. Diagrama del biorreactor bifásico. Fuente: Manso (2018).

En cuanto a la biojardinera, se alimenta a través del efluente de la trampa de grasas. El caudal es trasladado mediante un tubo horizontal por el fondo del lecho distribuido de manera uniforme. El flujo de agua recorre las piedras de diferente granulometría, que actúan como filtros reteniendo las partículas que no han sido eliminadas en la etapa anterior, hasta alcanzar las plantas. Estas últimas se alimentan de la materia orgánica y los nutrientes contenidos en las aguas grises, realizando la depuración y generando oxígeno. Este compuesto es inyectado en el agua a través de las raíces de las plantas haciendo que aumente la concentración de microorganismos y de sustrato (Urkijo, 2019). Se plantean los siguientes balances de materia en estado no estacionario para el sustrato y los microorganismos (García, 2018):

$$\frac{dS}{dt} \Delta V = QS_{in} - QS - r_s \Delta V \quad (7)$$

$$\frac{dX}{dt} \Delta V = QX_{in} - QX - r_x \Delta V \quad (8)$$

Una vez planteados los balances de las Ecuaciones 7 y 8, el volumen total de la biojardinera es dividido en nodos (Figura 16).

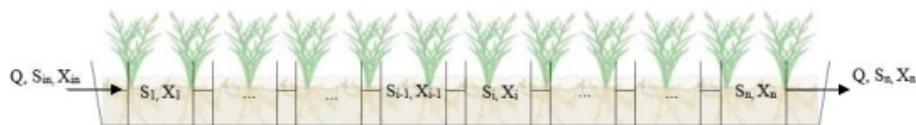


Figura 16. Esquema de una biojardinera dividida en n nodos. Fuente: Urkijo (2019).

El caudal de aguas grises proveniente de la trampa de grasas accede a la biojardinera por el primer nodo con una concentración inicial de sustrato y microorganismos. Para mantener la concentración de estos últimos y que no se produzca un exceso en el crecimiento de biomasa, se tiene en cuenta la fracción de microorganismos que es transportada, dejando que solo sedimente una pequeña parte en cada nodo y se forme una capa de lodo. La altura de esta capa es mayor en los primeros nodos e incrementa con el paso del tiempo, haciendo que el caudal que pasa por estos nodos sea menor. En los últimos nodos, en cambio, la capa de lodo se estabiliza

conseguiendo los resultados esperados (Urkijo, 2019). García y Urkijo aseguran que con 20 nodos la simulación permite obtener unos resultados acordes con las evidencias experimentales.

Cada nodo tiene una longitud de Δz . Siendo la longitud total del humedal L y dividiéndose en n nodos, se obtienen los siguientes balances de materia del sustrato (S) y de los microorganismos (X) a lo largo de los nodos (García, 2018):

$$\frac{dS}{dt}A\Delta z\epsilon = QS_{i-1} + QS_i - \frac{1}{Y_{XS}} \frac{\mu_m S_i}{K_s + S_i} X_i A\Delta z\epsilon \quad (9)$$

$$\frac{dX}{dt}A\Delta z\epsilon = QX_{i-1}f_h - QX_i f_h + \left(\frac{\mu_m S_i}{K_s + S_i} - K_d \right) X_i A\Delta z\epsilon \quad (10)$$

A su vez se plantean los balances de materia del lodo para calcular la altura de las aguas grises utilizables en cada nodo para los microorganismos y para el sustrato (Urkijo, 2019):

$$WA\Delta z\epsilon \frac{d(y_i S_i)}{dt} = QS_{i-1} - QS_i - \frac{1}{Y_{XS}} \frac{\mu_m S_i}{K_s + S_i} X_i y_i WA\Delta z\epsilon \quad (11)$$

$$WA\Delta z\epsilon \frac{d(y_i X_i)}{dt} = QX_{i-1}f_h - QX_i f_v + \left(\frac{\mu_m S_i}{K_s + S_i} - K_d \right) X_i y_i WA\Delta z\epsilon \quad (12)$$

Además, mediante la siguiente ecuación se puede obtener la capa de lodo que genera la sedimentación de la biomasa:

$$WA\Delta z\epsilon X_\infty \frac{dh_i}{dt} = QX_i f_v \quad (13)$$

Por último se plantean las siguientes expresiones con el objetivo de calcular la eficiencia y el tiempo espacial del proceso:

$$\eta = \frac{S_{in} - S_n}{S_{in}} \quad (14)$$

$$\tau = \frac{WHL\epsilon}{Q} \quad (15)$$

El conjunto de estas expresiones matemáticas conforma la base para formular el algoritmo que define el proceso completo.

2. OBJETIVOS

El objetivo principal de este Trabajo de Fin de Grado es realizar una aportación al cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible de Naciones Unidas, en concreto al objetivo 6, referido a la garantía de la disponibilidad y la gestión sostenible del agua y el saneamiento para todas las personas. Para ello, Ingeniería Sin Fronteras - Mugarik Gabeko Ingeniaritza pretende incidir en la situación socioeconómica de El Salvador, fomentando la participación ciudadana y tratando de buscar el punto de encuentro entre ciencia, ingeniería y sociedad. En concreto en este TFG se trata de mejorar la gestión de las aguas residuales de la comunidad de El Rodeo, dando lugar a una mejora en la calidad de vida y reduciendo las enfermedades y riesgos asociados a la falta de saneamiento.

Para ello, siguiendo los objetivos de la línea de investigación y apostando por la biojardinera como sistema de tratamiento, se proponen los siguientes hitos en este trabajo:

- Optimizar el modelado integral del sistema compuesto por una biojardinera con trampa de grasas bioactiva.
- Ajustar los parámetros del modelo teniendo en cuenta diferentes condiciones de temperatura, cantidad del sustrato o época del año.
- Desarrollar una herramienta de diseño para el sistema y validar el programa en una planta real.
- Comprobar la eficiencia del sistema completo.
- Entender cómo afectan los cambios en los parámetros en la herramienta de modelización.

3. METODOLOGÍA

3.1. DESCRIPCIÓN DE LA PLANTA

La planta que se va a analizar en este TFG se ha dimensionado basándose en los estudios elaborados por ADES (Asociación de Desarrollo Económico Social) y por Ingeniería Sin Fronteras - Mugarik Gabeko Ingeniaritza. El equipo de Ingeniería Civil que ha realizado el dimensionamiento ha tomado como base una familia compuesta por 4 personas con un caudal retorno de 5 l/día por persona, lo que equivale a un caudal total de aguas grises de 20 l/día por cada familia. En una comunidad de 50 familias, el sistema recibiría 1 m³/día. Teniendo en cuenta la climatología de El Salvador, la temperatura utilizada para los cálculos es de 30 °C. El dimensionamiento depende tanto del consumo de agua y de la cantidad de contaminantes y materia orgánica que contenga, como del tiempo de retención que se estipule para cada etapa del sistema. El equipo de ADES estima que el tiempo de sedimentación en la trampa de grasas, referido al tiempo necesario de las partículas para decantar una altura concreta a la velocidad de sedimentación (dependiente del tamaño) o de las grasas para flotar a la superficie (dependiente de la densidad) será de 0.1 días. También estiman que el tiempo de biodigestión en la biojardinera y el de almacenamiento en los tanques será de 43.79 días y 54.75 días respectivamente. En cuanto a los contaminantes, teniendo en cuenta los hábitos de consumo de El Rodeo, se estima que la concentración de entrada de Coliformes fecales es de 10000 NMP/100 ml, mientras que la DBO₅ es de 90 mg/l. La estimación del tiempo de retención hidráulico, tiempo que permanecerá el agua en el sistema, varía entre 3 y 5 días teniendo en cuenta que el valor de la conductividad hidráulica, es decir, la facilidad con la que el sistema deja pasar el agua, es de 0.0012 m/s. Como condición se ha determinado que la carga orgánica de la salida debe ser menor que 15 g_{DBO}/m³ día. El terreno en el que se sitúa el sistema tiene una pendiente de 1% aproximadamente y la profundidad útil de la biojardinera es de 0.6 m.

Utilizando estos parámetros de diseño, se han dimensionado tanto las trampas de grasas del pretratamiento como la biojardinera. Para el cálculo del volumen de los tanques de pretratamiento, el equipo de ADES ha obtenido el volumen que ocupan los sólidos sedimentados, las grasas y aceites y el agua. Con la suma de los tres volúmenes se concluye que, con el tiempo de sedimentación estimado, el caudal de aguas grises proveniente de las casas ocupa alrededor de 100 litros. Para evitar riesgos, el tamaño de los tanques debe ser mayor que el estimado, por lo que, teniendo en cuenta los recipientes disponibles en el mercado, el equipo de Ingeniería Civil ha optado por tanques de PVC con tapa de 300 litros. Para dimensionar la biojardinera se han aplicado procedimientos típicos de obra civil, que incluyen correlaciones en las que se supone una cinética de primer orden. Las medidas obtenidas para la biojardinera tras los cálculos son de 0.7 m de alto, 4 m de ancho y 7 m de largo, como se muestra en la Figura 17:

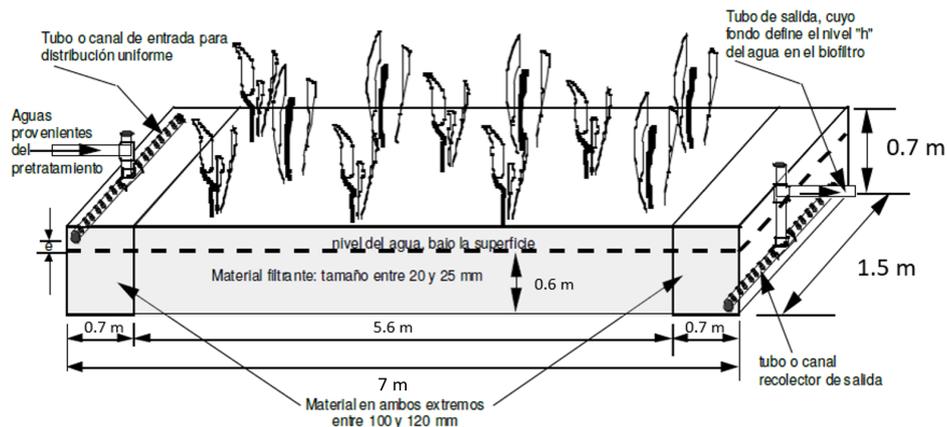


Figura 17. Dimensionamiento de la biojardinera realizado por el equipo de diseño de Obra Civil de ADES. Fuente: ADES (2020).

3.2. MEDICIÓN DE PARÁMETROS

Una vez realizados el diseño y la construcción de las biojardineras es necesaria la medición de indicadores de calidad tanto para asegurar su correcto funcionamiento como para adecuar la herramienta de modelización. Los parámetros seleccionados para determinar la eficiencia del sistema son el caudal, la temperatura, la concentración de materia orgánica (DQO y DBO₅), de sólidos, de grasas y aceites y de coliformes, todos ellos medidos a la entrada y a la salida del sistema. Para una mejor conclusión se puede realizar un muestreo del color, olor y turbidez del agua tratada.

La temperatura se medirá con un termómetro según el procedimiento Standar Methods 2550B y realizando mediciones durante 4 horas en intervalos de una hora para obtener un promedio. Para la medición del caudal se utilizará el método volumétrico. Se requerirá de un recipiente de volumen conocido para la recolección del agua y de un cronómetro. Teniendo en cuenta la Ecuación 16, se medirá el tiempo que necesita el recipiente para llenarse, repitiendo el proceso mínimo 3 veces con el fin de obtener un promedio y asegurar una mayor exactitud.

$$Q = \frac{V}{t} \quad (16)$$

En cuanto a los sólidos totales, se definen como los residuos restantes en un recipiente después de la evaporación de una muestra y su secado a una temperatura concreta. Incluyen los Sólidos Suspendidos Totales y los Sólidos Disueltos totales. El procedimiento para medir la cantidad total de sólidos será el incluido en los métodos normalizados para el análisis de aguas con Número de Referencia Standard Methods 2540B (APHA, 1992). El material y los equipos necesarios para realizar el ensayo son los siguientes:

- Placa de evaporación de 100 ml de capacidad
- Desecador
- Horno de secado para operaciones a 103-105 °C

- Balanza analítica de cuatro cifras decimales

El ensayo consiste en la evaporación de la muestra con el fin de medir la cantidad de sólidos que contiene. Para ello se calentará la placa de evaporación a 103-105 °C durante una hora, manteniéndose en el desecador hasta que sea necesario, y se pesará inmediatamente antes de usarse. Se transferirá un volumen conocido de la muestra bien mezclada a la placa y se evaporará por completo en el horno de secado. Por último, se dejará enfriar la placa en el desecador y se pesará. El proceso se repetirá hasta obtener un peso constante. Para calcular la concentración de sólidos totales se utilizará la siguiente ecuación (APHA, 1992):

$$\text{Sólidos Totales, mg/l} = \frac{(A - B) \cdot 1000}{\text{vol. muestra, ml}} \quad (17)$$

donde A corresponde al peso del residuo seco más la placa y B al peso inicial de la placa, medidos en miligramos.

Para obtener la concentración total de sólidos suspendidos se utilizará el procedimiento con Número de Referencia Standard Methods 2540D. Los materiales y equipos a utilizar son los siguientes (Carpio y cols., 2007):

- Mufla para operar a 550 ± 50 °C
- Horno de secado para operaciones a 103-105 °C
- Equipo de filtrado compuesto por un embudo Büchner, un portafiltro y un frasco de succión
- Bomba de vacío
- Desecador
- Balanza analítica de cuatro cifras decimales
- Filtros Gooch con fibra de vidrio
- Crisol de Gooch

Para realizar la medida se insertará el filtro de peso conocido en el portafiltro del embudo Büchner, conectado al frasco de succión y al sistema de vacío. Una vez humedecido el filtro con agua destilada, se procederá a filtrar un volumen previamente medido (10 ml aproximadamente) de la muestra de agua. A continuación se insertará el filtro en un crisol y se introducirá en el horno de secado a 103-105 °C durante mínimo una hora. Se colocará en el desecador para estabilizar la temperatura y se pesará el crisol con el filtro en la balanza analítica. Para determinar adicionalmente la concentración de sólidos suspendidos fijos y volátiles se secará el filtro dentro del crisol en la mufla a 550 °C, se enfriará en el desecador y se pesará. El proceso completo se repetirá hasta que el cambio en el peso sea menor al 4%. Los cálculos necesarios para obtener la concentración de los sólidos suspendidos totales y los sólidos suspendidos fijos se realizan mediante las siguientes ecuaciones (Menéndez, 2017):

$$\text{Sólidos Suspendidos Totales, mg/l} = \frac{(P_2 - P_1) \cdot 1000}{\text{vol. muestra, ml}} \quad (18)$$

$$\text{Sólidos Suspendidos Fijos, mg/l} = \frac{(P_3 - P_1) \cdot 1000}{\text{vol. muestra, ml}} \quad (19)$$

donde P_1 corresponde al peso inicial del filtro y el crisol, P_2 al peso del filtro y el crisol más el residuo seco después del secado en el horno y P_3 al peso del filtro y el crisol más el residuo seco después del incinerado en mufla, medidos en miligramos.

La cantidad de Sólidos Suspendidos Volátiles se obtiene mediante la diferencia de Sólidos Suspendidos Totales y Sólidos Suspendidos Fijos. Es un valor útil al poder relacionarse con la cantidad de materia orgánica de la muestra. Por otro lado, la cantidad de Sólidos Disueltos Totales se calcula a través de la diferencia de Sólidos Totales y Sólidos Suspendidos Totales.

Como muestra la Ecuación 14, para obtener la eficiencia del sistema es necesario medir la concentración de sustrato que contienen tanto las aguas residuales como el efluente tratado. La manera más extendida para obtener la carga orgánica de una muestra de agua es mediante la determinación de la Demanda Biológica de Oxígeno de 5 días (DBO_5), ensayo que permite calcular los requerimientos de oxígeno de las aguas residuales contaminadas y tratadas con el objetivo, por lo general, de evaluar la eficiencia de extracción de materia orgánica de un sistema de tratamiento (APHA, 1992). Considerando los materiales y equipos disponibles, se llevará a cabo el método respirométrico para la determinación de la Demanda Biológica de Oxígeno. La respirometría es una técnica basada en la medición del consumo de oxígeno mediante microorganismos que degradan la materia orgánica oxidándola a CO_2 en una botella respirométrica. Se utilizará el procedimiento desarrollado por Dr. Calderón Labs (Calderón y Pavlova, 2001), que utiliza la variación de la presión en la botella respirométrica mediante un manómetro lo suficientemente sensible. Es decir, consiste en medir el vacío causado en la botella por el consumo de oxígeno que produce la muestra de agua. Para ello es necesaria la absorción de CO_2 , ya que de lo contrario no habría prácticamente cambio de presión al ser igual o casi igual el volumen de CO_2 producido al volumen de de oxígeno consumido. Además de una botella respirométrica, Figura 18, serán necesarios los siguientes reactivos:

- A. Solución tampón de fosfato modificada. Disolviendo 43.5 g de K_2HPO_4 , 66.8 g de $Na_2HPO_4 \cdot 7H_2O$ y 3.4 g de NH_4Cl en 1 l de agua destilada.
- B. Solución de sulfato de magnesio. Disolviendo 22.5 g de $MgSO_4 \cdot 7H_2O$ en 1 l de agua destilada.
- C. Solución de cloruro de calcio. Disolviendo 27.5 g de $CaCl_2$ anhidro en 1 l de agua destilada.
- D. Solución de cloruro férrico. Disolviendo 2.5 g de $FeCl_3 \cdot 6H_2O$ en 1 l de agua destilada.

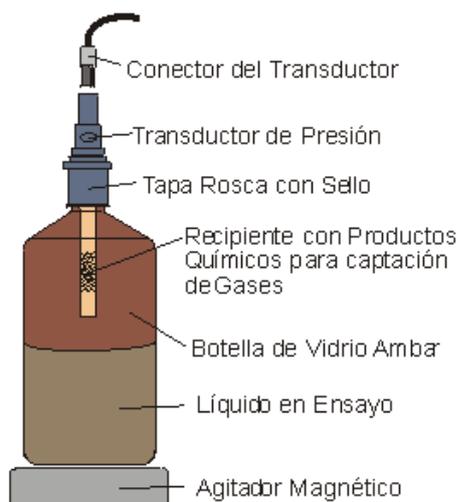


Figura 18. Esquema de una botella respirométrica.

Para botellas respirométricas de 1 l de capacidad, la suma de la muestra más el agua de dilución será de 500 a 800 ml. El volumen de la muestra a recoger está condicionado por la DBO₅ esperada, Tabla 1:

Tabla 1. Volumen necesario de la muestra de agua en base a la DBO₅ esperada.

| DBO ₅ esperada (g m ⁻³) | Muestra / aforamiento (ml ml ⁻¹) |
|--|--|
| 2000 | 50/500 |
| 1000 | 100/500 |
| 500 | 200/500 |
| 250 | 400/500 |
| 100 | 400/800 |
| 50 | 800/800 |

Una vez recogida la muestra de agua necesaria, se colocará en una probeta de aforamiento y se le agregará agua destilada hasta el, aproximadamente, 80% del aforo. Se le añadirán a continuación 10 ml de la solución A, 0.5 ml de la solución B (10 gotas), 0.5 ml de la solución C (10 gotas) y 0.05 ml de la solución D (1 gota). Se completará el aforamiento con agua destilada y se transferirá a la botella respirométrica. Una vez cerrada y con el transductor conectado, se colocará en una cámara de incubación sobre un agitador magnético. Cuando la mezcla se homogenice, se tomará la primera lectura. Se tomará una lectura cada 24 h durante los siguientes 5 días y se anotará simultáneamente la temperatura. Paralelamente se deberá realizar un blanco y restar el valor a los resultados de las muestras. Estos datos se introducirán en un software proporcionado por Dr. Calderón Labs que, utilizando la temperatura y presión, calculará el oxígeno disuelto en el agua y con ello la Demanda Biológica de Oxígeno.

Por otro lado, también resulta interesante el cálculo de la Demanda Química de Oxígeno (DQO), parámetro utilizado para medir la cantidad de oxígeno necesaria para oxidar químicamente la materia orgánica mediante un oxidante químico fuerte como el permanganato potásico. El ensayo de oxidabilidad al permanganato consiste en tratar las sustancias orgánicas presentes en el agua con un reactivo oxidante como el KMnO₄, produciéndose una oxidación que origina un

gasto de reactivo mediante el que se deduce la cantidad de materia orgánica que contiene el agua (Fernández y cols., 1986). Los materiales y equipos a utilizar en el ensayo son los siguientes:

- 2 matraces Erlenmeyer de 250 ml
- 2 probetas de 100 ml
- Perlas de vidrio
- 1 pipeta de 5 ml
- 2 pipetas de 1 ml
- 1 bureta
- Placa calefactora

Se emplearán los siguientes reactivos:

- Solución de permanganato potásico 0.1 N, disolviendo 3.1608 g de KMnO_4 en 1000 ml de agua destilada.
- Solución de permanganato potásico 0.01 N, por dilución de la solución de KMnO_4 0.1 N, tomando 100 ml de la disolución anterior y llevándola hasta 1000 ml.
- Solución de ácido oxálico 0.1 N, disolviendo 6.3035 g de ácido oxálico en agua destilada hasta llevarlo a 1000 ml.
- Solución de ácido oxálico 0.01 N, por dilución de la solución de ácido oxálico 0.1 N, tomando 100 ml de la disolución anterior y llevándola hasta 1000 ml.
- Solución de sulfúrico diluido 1:3, compuesta por 100 ml de H_2SO_4 + 200 ml de agua destilada.

Es preferible realizar el ensayo inmediatamente después de tomar la muestra de agua, no obstante, es posible conservarla cierto tiempo si se acidifica con H_2SO_4 a $\text{pH}=2-3$. El procedimiento consiste en oxidar las sustancias de origen orgánico. Para ello colocarán en un matraz Erlenmeyer 100 ml del agua a tratar, se añadirán 5 ml de H_2SO_4 diluido 1:3 y de 1 a 2 g de perlas de vidrio, con el fin de evitar que las burbujas de aire formadas en la ebullición salgan a la superficie y salpiquen, y se calentará hasta ebullición. Se añadirán 20 ml de KMnO_4 0.01 N y se dejará hervir durante 10 minutos. Pasado este tiempo se adicionarán 20 ml de ácido oxálico 0.01 N, con lo que se producirá una decoloración completa de la mezcla. Por último se valorará con KMnO_4 0.01 N hasta obtener una coloración rosada. Paralelamente se realizará una valoración del blanco para estimar el error de la valoración. Para garantizar la exactitud del método, el KMnO_4 gastado en la valoración debe estar entre 2-6 ml. En el caso de que sea menor a 2 ml, se utilizarán 200 ml de agua de muestra, mientras que si es mayor a 6 ml, se utilizarán 50 ml de muestra enrasándola hasta 100 ml. La DQO se calculará con la siguiente ecuación, simplificada para 100 ml de muestra y KMnO_4 0.01 N:

$$\text{mg O}_2/\text{l} = \frac{(A - B) \cdot N \cdot 8000}{\text{vol. muestra, ml}} = (A - B) \cdot 0,8 \quad (20)$$

donde A es el volumen de KMnO_4 gastado en la valoración de la muestra (ml), B el volumen de KMnO_4 gastado en la valoración del blanco (ml) y N la normalidad del valorante.

La concentración de grasas y aceites y los coliformes serán determinadas a través de un laboratorio de control de calidad especializado. Con el objetivo de no contaminar las muestras es necesario seguir un procedimiento riguroso de recolección. El volumen de agua a analizar debe ser agitado para homogeneizar la mezcla antes de ser separado en recipientes graduados para su envío al laboratorio. Las muestras tienen que ser etiquetadas y almacenadas en contenedores refrigeradores que permitan mantener la temperatura durante su transporte hasta el laboratorio.

Además de los parámetros químicos y biológicos, el agua tratada debe cumplir ciertas medidas de calidad en cuanto a parámetros físicos como la turbidez o el olor. La turbidez del agua es producida por partículas en suspensión, materias orgánicas e inorgánicas o por compuestos coloreados como los microorganismos. Se define como la medida del grado de transparencia que pierde el agua por la presencia de las sustancias mencionadas previamente que origina que la luz se disperse en vez de transmitirse en línea recta a través de la muestra y se expresa en NTU (Nefelometric Turbidity Unit). La prueba se deberá realizar mediante un turbidímetro el mismo día en el que se tome la muestra, manteniéndola no más de 24 horas en ambiente oscuro si esto no es posible. En cuanto al olor, debido a la subjetividad de la respuesta sensorial, no se ha encontrado por el momento un procedimiento exacto, por lo que se determina mediante la prueba del umbral de olor. Este ensayo consiste en la dilución de la muestra con agua inodora hasta eliminar por completo el olor perceptible (APHA, 1992).

4. RESULTADOS

Este Trabajo de Fin de Grado se ha visto afectado por la situación excepcional provocada por la Covid-19, dando lugar a un cambio en los objetivos y resultados. Dada la imposibilidad de viajar a terreno, no ha sido posible analizar el funcionamiento de las biojardineras instaladas en El Rodeo, por lo que se ha optado por comprobar la adecuación de la herramienta de modelización utilizando datos bibliográficos de investigaciones realizadas en condiciones similares a las planteadas inicialmente en este TFG. Las simulaciones se han llevado a cabo utilizando los datos del trabajo realizado por Bolaños y González (Bolaños y González, 2020) relativo a la eficiencia de tratamiento de aguas grises mediante biojardineras en los comedores de la Universidad de El Salvador (UES) y del trabajo efectuado por Moncada sobre la evaluación del diseño de una biojardineras en Zapote, Costa Rica (Moncada, 2011). Para ello se han ajustado las especificaciones del modelo, estableciendo los datos de las investigaciones mencionadas como valores nominales y se han realizado simulaciones mediante el programa Scilab, comparando los resultados obtenidos con el programa con los de las investigaciones. Por último se ha realizado una búsqueda paramétrica para adecuar el modelo a los sistemas.

4.1. BIOJARDINERA SITUADA EN LA UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR

La investigación llevada a cabo por Bolaños y González especifica únicamente el dimensionamiento de la biojardineras, sin detallar las magnitudes de los sistemas de pretratamiento, por lo que se ha utilizado el programa realizado por García que simula el comportamiento de la biojardineras sin trampa de grasas (García, 2018). La Tabla 2 muestra las dimensiones y los parámetros iniciales establecidos por García para realizar el modelado de la biojardineras y los datos contenidos en la investigación de Bolaños y González:

Tabla 2. Parámetros establecidos inicialmente para el modelado de la biojardineras situada en El Rodeo y parámetros de la biojardineras situada en la UES. Fuente: García (2018) y Bolaños y González (2020).

| | Parámetros modelo | Parámetros UES |
|-------------------------------------|-------------------|----------------|
| W (m) | 1 | 4.97 |
| H (m) | 0.6 | 0.8 |
| L (m) | 4.5 | 14.91 |
| T (°C) | 30 | 31 |
| r_{20} (h ⁻¹) | 0.28/24 | - |
| Q (m ³ h ⁻¹) | 0.25/24 | 14.48/24 |
| K_d (h ⁻¹) | 0.045/24 | - |
| K_s (g m ⁻³) | 120 | - |
| S_{in} (g m ⁻³) | 90 | 695.8 |
| X_{in} (g m ⁻³) | 0 | - |
| ϵ (%) | 40 | 35 |
| Y_{XS} (%) | 50 | - |
| S_0 (g m ⁻³) | 90 | - |
| X_0 (g m ⁻³) | 100 | - |

Una vez sustituidos en el programa de Scilab los datos disponibles, se ha procedido a realizar

una simulación con el fin de comprobar si los parámetros supuestos por García se amoldan al sistema de la UES y a los resultados experimentales. Las Figuras 19 y 20 muestran la concentración de sustrato a la salida y la eficiencia a lo largo del tiempo, respectivamente.

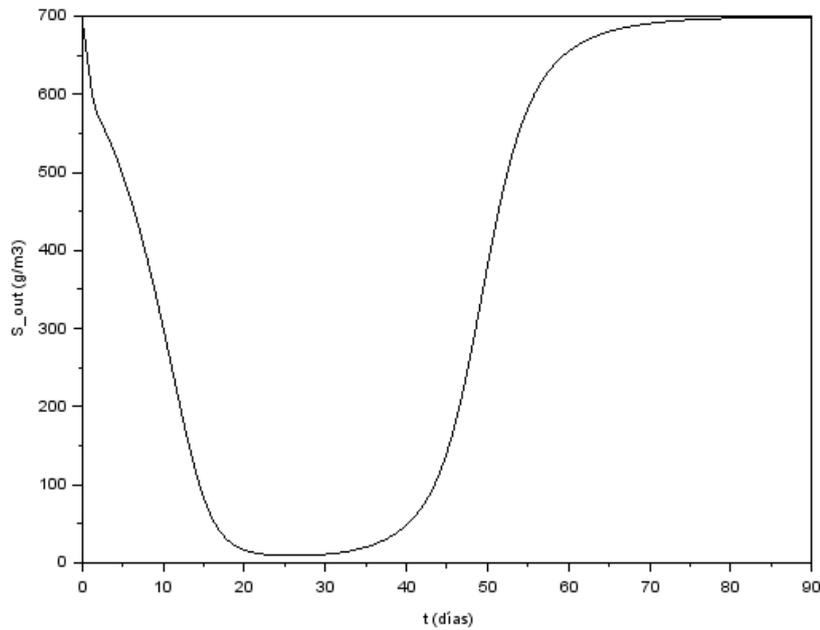


Figura 19. Evolución de la concentración de sustrato en 90 días.

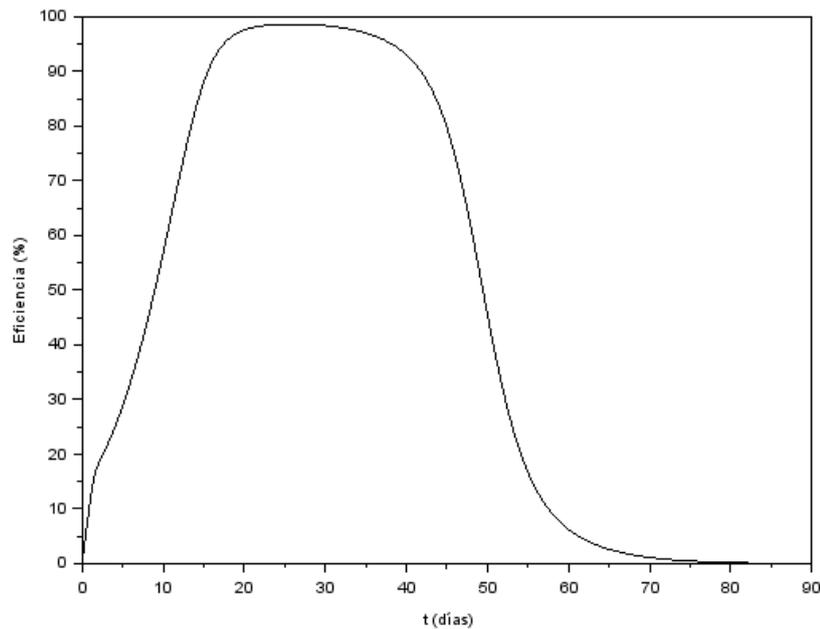


Figura 20. Evolución de la eficiencia en 90 días.

La Figura 19 muestra la evolución del sustrato a la salida de la biojardinera con el tiempo.

Para comprobar si los parámetros estimados se corresponden con los datos reales, se ha tenido en cuenta el valor medido por Bolaños y González en el sistema real. Las autoras realizaron los análisis del agua tratada aproximadamente 3 meses después de la puesta en marcha de la biojardínera, es por eso que las simulaciones se han realizado con un tiempo de 90 días. La cantidad de materia orgánica a la salida del tratamiento en la planta real fue de $34.8 \text{ g}_{\text{DBO}_5}/\text{m}^3$ (Bolaños y González, 2020). En la Figura 19 se puede observar que, con los parámetros seleccionados, el sistema necesitaría alrededor de 20 días para estabilizarse y comenzar a dar resultados y que, a partir del día 40, debido probablemente a la sedimentación producida por los lodos, la eficiencia comenzaría a disminuir hasta dejar de dar resultados por completo. Además, el valor medio del sustrato que muestra el modelo durante los días de funcionamiento es de $17 \text{ g}_{\text{DBO}_5}/\text{m}^3$, valor que difiere del obtenido experimentalmente. En cuanto a la eficiencia, la Figura 20 se corresponde con la tendencia mostrada en la Figura 19, obteniendo valores altos cuando el sistema está estable y descendiendo hasta ser nula a medida que la biojardínera se colma. Se concluye, por tanto, que los parámetros estimados inicialmente por García no se corresponden con el sistema implantado en la UES. Como explica García, a la hora de seleccionar los parámetros del modelado no se tuvieron en cuenta datos bibliográficos debido a la inexistencia de los mismos en sistemas similares. Es por esto que se ha realizado una búsqueda paramétrica hasta obtener un resultado de la simulación que se asemeja al sistema real implantado en la UES.

Para dar con los parámetros que más se adaptan al sistema real, se ha observado la influencia que tienen la velocidad de reacción de $20 \text{ }^\circ\text{C}$ (y como consecuencia la tasa de crecimiento específica máxima de los microorganismos), el coeficiente de rendimiento, la constante de saturación y el coeficiente de desaparición de los microorganismos tanto en la concentración de sustrato de la salida como en el tiempo de funcionamiento del sistema. Al aumentar la tasa de crecimiento específica de los microorganismos, éstos crecen a mayor velocidad, siendo capaces de eliminar más cantidad de materia orgánica. Lo contrario ocurre con el coeficiente de desaparición, si aumenta su valor, habrá una mayor concentración de sustrato a la salida, ya que habrá menos cantidad de microorganismos para su eliminación. Teniendo en cuenta que el crecimiento de microorganismos se basa en la ecuación de Monod, al aumentar la constante de saturación disminuirá la tasa de crecimiento, obteniendo una mayor concentración de materia orgánica en la salida. Por último, la tasa de rendimiento indica el crecimiento de biomasa en base al sustrato consumido, es decir, qué porcentaje de sustrato metabolizan los microorganismos. Cuanto mayor sea este valor, menos sustrato necesitarán los microorganismos, obteniendo una activación menor del sistema y concentraciones más altas de materia orgánica en la salida. La Tabla 3 muestra los parámetros más adecuados:

Tabla 3. Parámetros resultantes de la búsqueda paramétrica.

| | |
|-------------------------------------|----------|
| W (m) | 4.97 |
| H (m) | 0.8 |
| L (m) | 14.91 |
| T (°C) | 31 |
| r_{20} (h ⁻¹) | 0.76/24 |
| Q (m ³ h ⁻¹) | 14.48/24 |
| K_d (h ⁻¹) | 0.56/24 |
| K_s (g m ⁻³) | 90 |
| S_0 (g m ⁻³) | 695.8 |
| X_0 (g m ⁻³) | 100 |
| ε (%) | 35 |
| Y_{XS} (%) | 0.3 |

Una vez especificados los parámetros, se ha optimizado el modelado para simular el comportamiento de la planta en un periodo de 3 meses. Las Figuras 21 y 22 muestran los resultados de la concentración del sustrato en la salida y de la eficiencia, respectivamente:

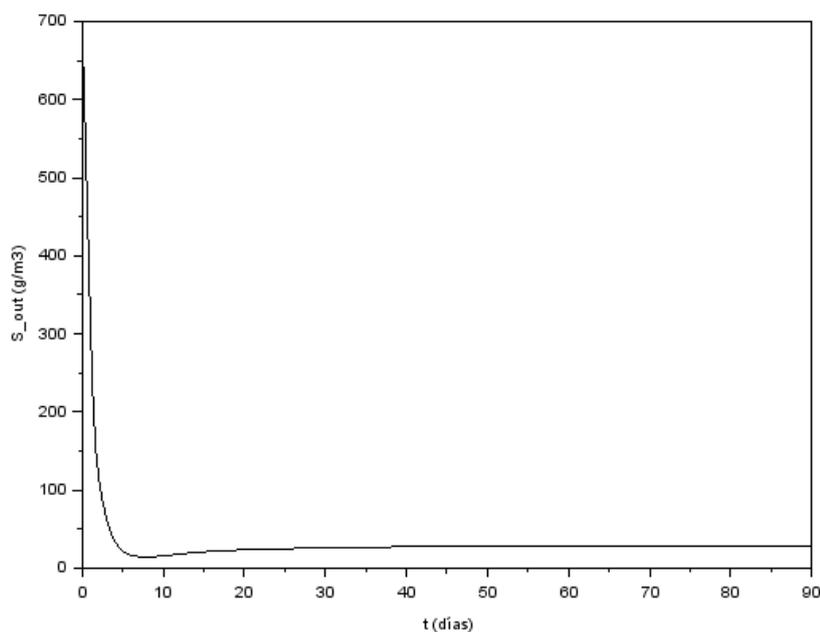


Figura 21. Evolución de la concentración de sustrato en 90 días tras la búsqueda paramétrica.

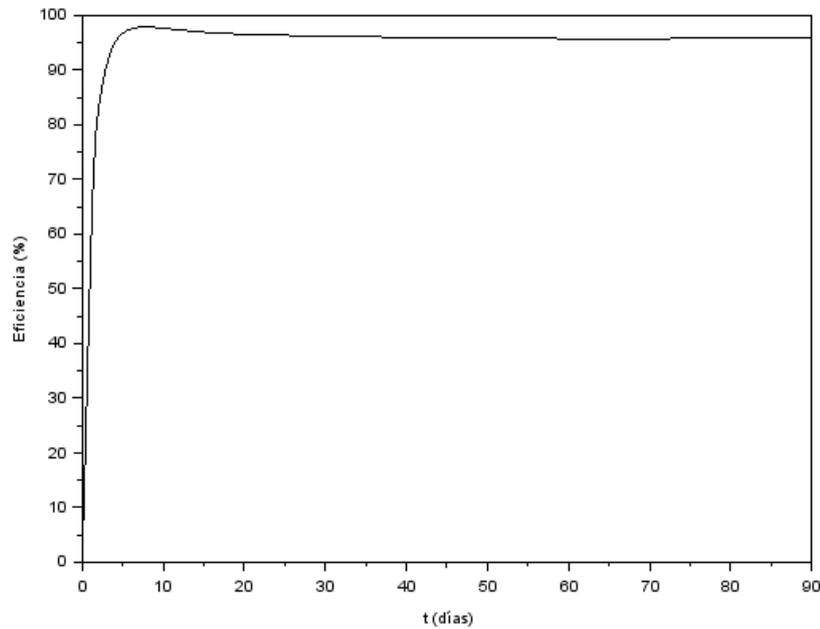


Figura 22. Evolución de la eficiencia en 90 días tras la búsqueda paramétrica.

En la Figura 21 se observa cómo, a diferencia de los resultados obtenidos con los parámetros iniciales, el sistema necesita únicamente 8 días para estabilizarse y funcionar de manera correcta. Los primeros tres meses desde la puesta en marcha, la concentración media de la materia orgánica a la salida es de $30 \text{ g}_{\text{DBO}_5}/\text{m}^3$ aproximadamente, valor muy cercano al dato experimental. En cuanto a la eficiencia, Figura 22, al igual que el sustrato, se mantiene casi constante durante los primeros tres meses del tratamiento, con un valor algo mayor al 95%. Comparando los resultados con los obtenidos por Bolaños y González en la planta real, se deduce que la búsqueda de parámetros es correcta y que el modelo se asemeja a la realidad. Para entender mejor el comportamiento de la biojardinera, en la Figura 23 se observa la evolución de la concentración de sustrato en cada nodo en el mismo periodo de tiempo:

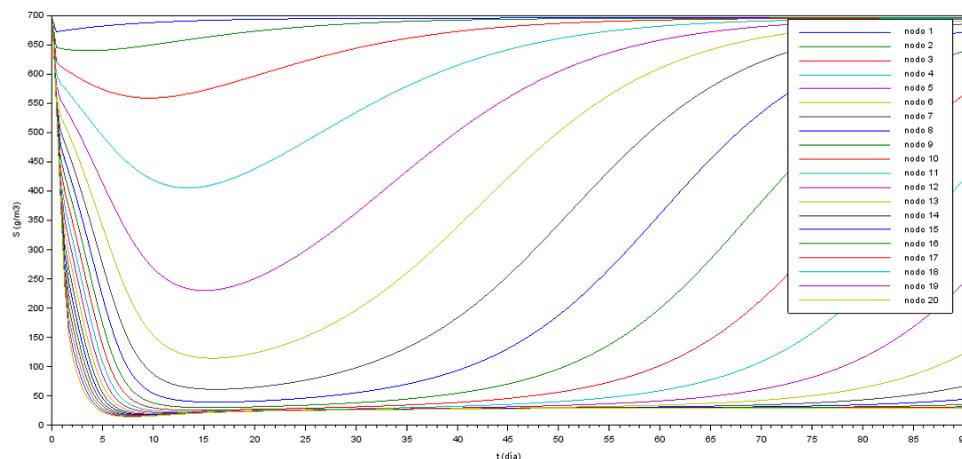


Figura 23. Evolución de la concentración de sustrato en cada nodo durante 90 días.

La gráfica muestra cómo la concentración disminuye a medida que se avanza en los nodos debido a que la depuración del agua ocurre mayoritariamente en la primera parte de la biojardinera. También se observa que, por el mismo motivo, la concentración en los últimos nodos es mínima. A medida que los primeros nodos se van saturando comienza a percibirse actividad en los nodos centrales, dando lugar a un aumento en la concentración de sustrato. Como se deducía también en las Figuras 21 y 22, el sistema tiende a estabilizarse alrededor del día 8. Para verlo de manera más clara, se ha representado en la Figura 24 la materia orgánica en cada nodo a los tres meses de la puesta en marcha:

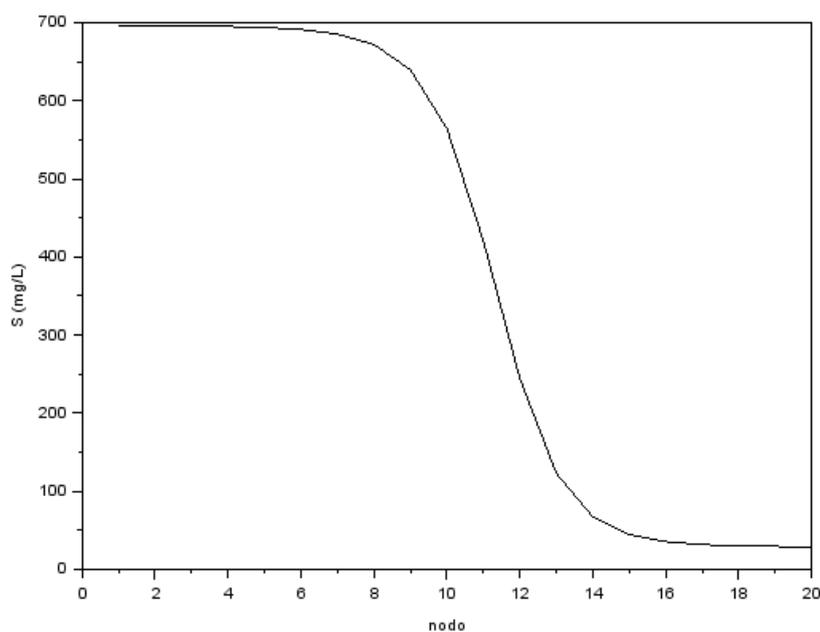


Figura 24. Evolución de la concentración de sustrato en cada nodo a los tres meses de la puesta en marcha.

Se deduce de la Figura 24 que a partir del nodo 14 el agua sale prácticamente limpia, quedando los siguientes nodos a modo de reserva para cuando los primeros se saturan o el lodo alcance una altura demasiado grande. Es por esto que resulta conveniente saber la evolución de la altura del lodo en cada nodo con el tiempo, como muestran las Figuras 25 y 26:

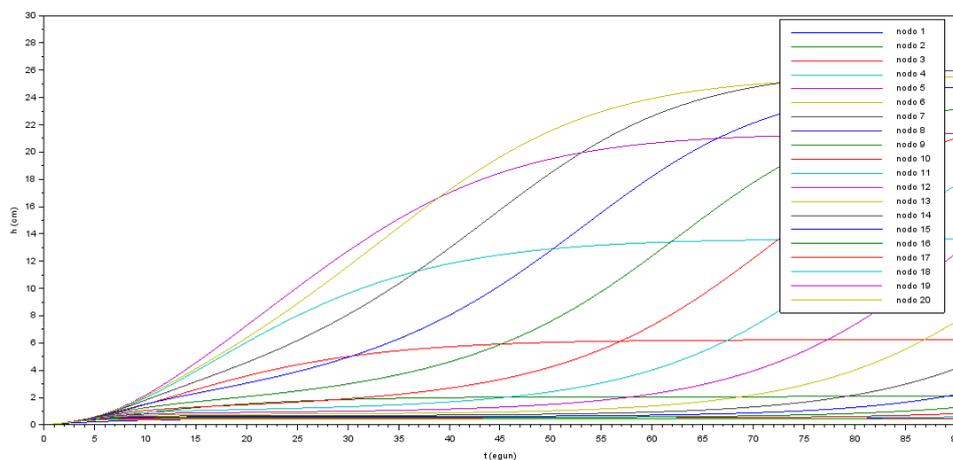


Figura 25. Evolución de la la altura del lodo en cada nodo durante 90 días.

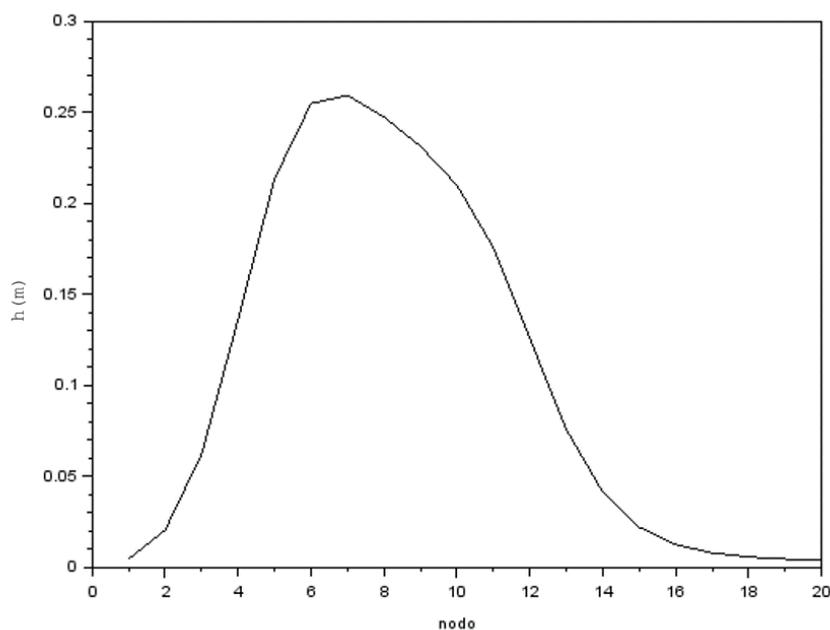


Figura 26. Evolución de la altura del lodo en cada nodo a los tres meses de la puesta en marcha.

Si se observa la Figura 26, se puede ver cómo el nodo en el que más altura alcanza el lodo es el nodo 7. Esto es debido a que los microorganismos necesitan un tiempo de activación, por lo que tanto la concentración máxima de microorganismos como la altura máxima del lodo se dan en el nodo 7. Una vez alcanzado este nodo, la altura disminuye a medida que se avanza en la biojardinera, tendencia que se observa durante los tres meses. Cabe destacar que la altura máxima alcanzada es de 26 cm, valor ampliamente inferior a la altura de la biojardinera, por lo que no obstruirá en ningún caso el paso del agua.

Suponiendo, por lo tanto, que el programa se adecua correctamente a la planta real durante los 3 primeros meses desde la puesta en marcha, se ha ampliado el tiempo de estudio con el objetivo

de predecir el mantenimiento que requeriría el sistema. En su investigación Bolaños y González proponen realizar un mantenimiento semestral de la biojardinera para evitar la formación de musgos y el crecimiento acelerado de la vegetación, además de una revisión trimestral de los parámetros fisicoquímicos (Bolaños y González, 2020). La Figura 27 representa el comportamiento que tendrá la biojardinera durante un año:

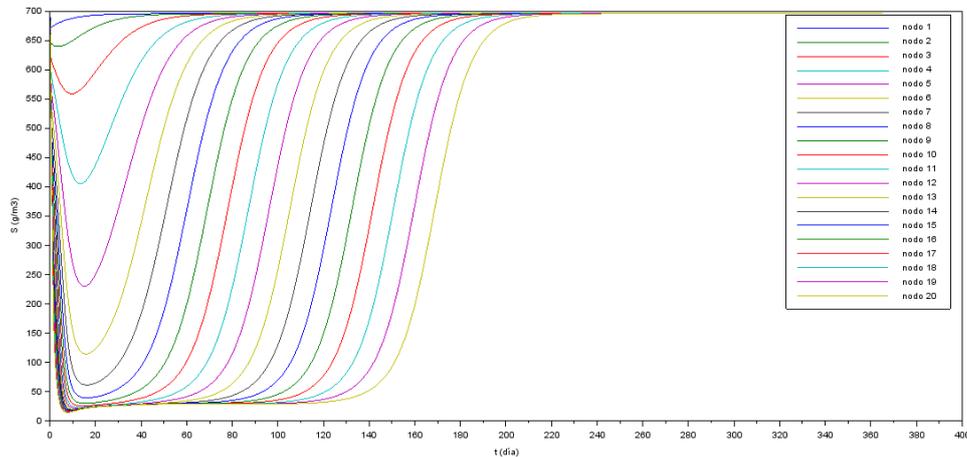


Figura 27. Evolución de la concentración de sustrato a lo largo de los nodos durante un año.

Como mostraban las figuras anteriores, tras 8 días aproximadamente el sistema comienza a dar resultados. Las primeras semanas la depuración se realiza en los primeros nodos, pero se observa cómo a lo largo del tiempo son los últimos nodos los que muestran mayor actividad. A partir del día 140 el último nodo comienza a saturarse y alrededor del día 210 el agua de la salida tendrá la misma cantidad de materia orgánica que contenía en la entrada. 5 meses después de su puesta en marcha, la concentración de salida es de $95 \text{ g}_{\text{DBO}_5}/\text{m}^3$, Figura 28, valor inadmisibles según la Especificación RTS 13.05.01:18, que establece el límite de Demanda Biológica de Oxígeno en $60 \text{ g}/\text{m}^3$ (Bolaños y González, 2020).

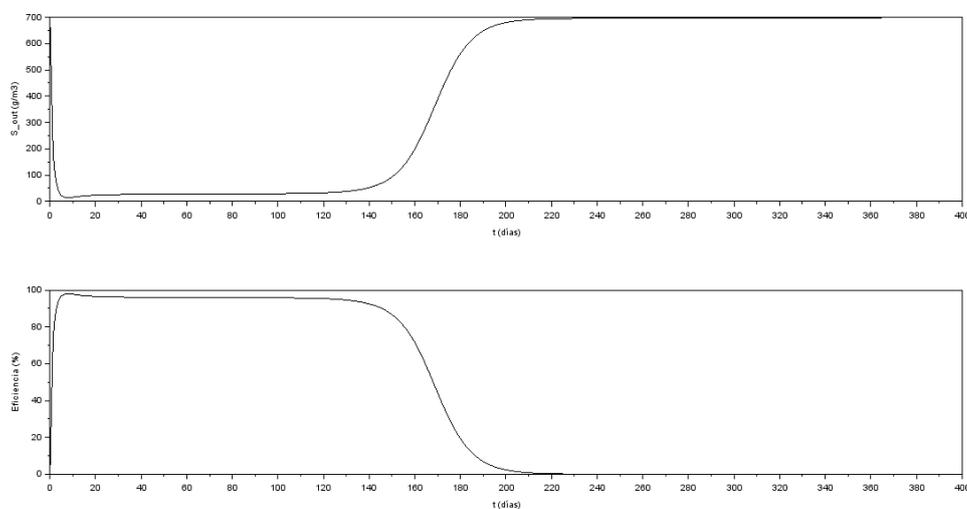


Figura 28. Evolución de la concentración de sustrato a la salida y de la eficiencia durante un año.

Además de la concentración de sustrato a la salida, la Figura 28 muestra la tendencia de la eficiencia. Como es de esperar, se mantiene constante en un valor aceptable del 95% hasta el día 140 y desciende rápidamente hasta ser completamente nula a partir del séptimo mes. Esto, además de a la escasez de actividad microbiana, se debe a la altura de la capa de lodo que se forma en la biojardinera, Figura 29, que provoca una disminución en el tiempo espacial a causa de la reducción en la sección.

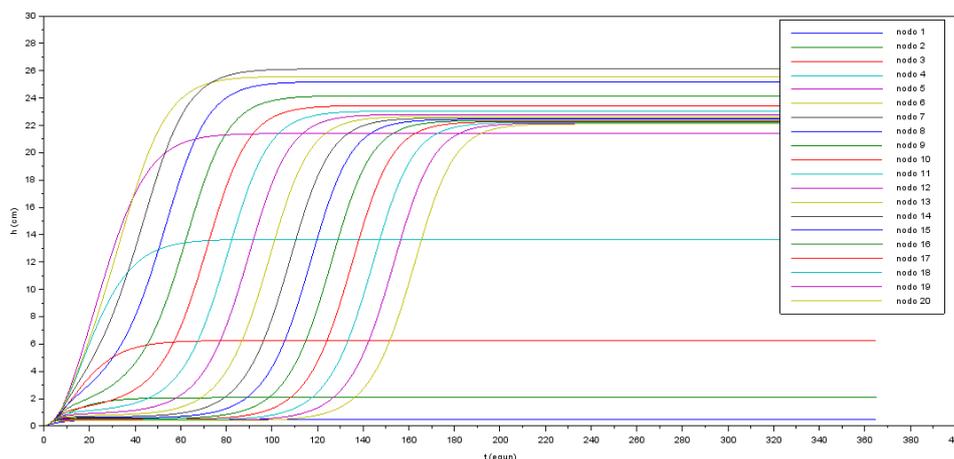


Figura 29. Evolución de la altura de la capa de lodo en la biojardinera durante un año.

La Figura 29 demuestra lo explicado previamente: debido al tiempo de activación necesario de los microorganismos, la altura de la capa de lodo en los primeros 5 nodos alcanza una menor altitud, siendo notablemente baja en los dos primeros, y logrando la altura máxima en el sexto nodo los primeros meses y en el séptimo después. Nuevamente la altura de la capa no llega a obstruir por completo el paso del agua, pero sí provoca deficiencias en la depuración. Teniendo en cuenta la propuesta semestral que proponen las autoras, se plantean dos mejoras más para un ajuste mayor a la planta real. Por un lado, al estar ubicado en la Universidad de El Salvador, el sistema no recibiría aguas residuales los fines de semana, y cabría la posibilidad de que en el periodo de estudio transcurrieran la época de vacaciones o de exámenes en las que el caudal sería prácticamente nulo. Teniendo este factor en consideración, el tiempo de uso de la biojardinera se alargaría probablemente hasta los 6 meses que proponen las autoras. Por otro lado, como se ha explicado previamente, el funcionamiento de la planta se ve deteriorado en gran medida por la sedimentación de lodos. La fracción de lodo sedimentado (f_v) indica la cantidad de fango que se sedimenta en cada nodo a medida que el efluente avanza en la biojardinera. Se ha disminuido el valor de este parámetro del 1% al 0.8%, consiguiendo así ajustar por completo el modelo con los resultados de la planta real, Figura 30:

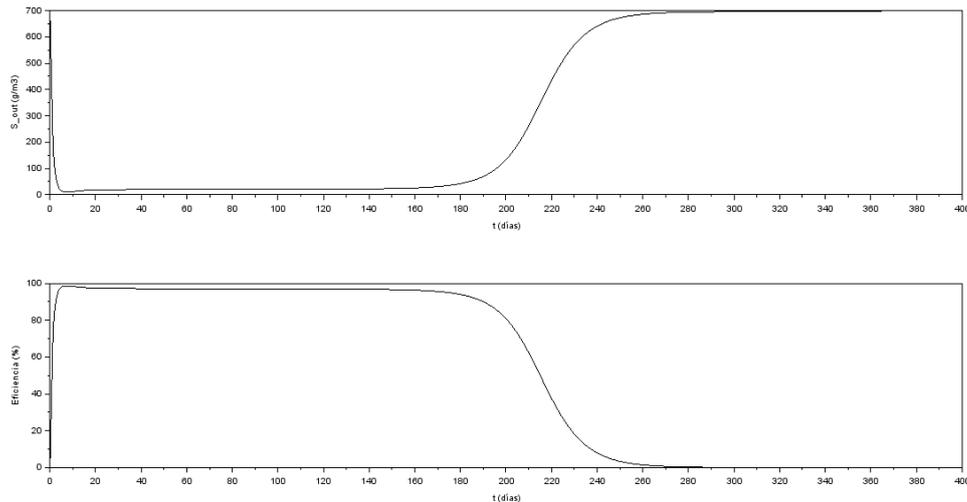


Figura 30. Resultados ajustados de la evolución de la concentración de sustrato a la salida y de la eficiencia durante un año.

Si se atiende al periodo de funcionamiento de la Figura 30, se puede observar cómo 180 días después de la puesta en marcha la concentración de DBO_5 ronda los 55 g/m^3 , valor que se acerca al máximo permitido por la Especificación RTS 13.05.01:18, situado en $60 \text{ g}_{\text{DBO}_5}/\text{m}^3$. Esto es un indicativo de una necesidad de limpieza y mantenimiento del sistema, adecuándose a los seis meses especificados por Bolaños y González (2020) en su investigación.

4.2. BIOJARDINERA SITUADA EN COSTA RICA

Una vez ajustado el modelo al sistema ubicado en la Universidad de El Salvador, se ha realizado la búsqueda paramétrica para una planta situada en Costa Rica (Moncada, 2011). El funcionamiento de este sistema es similar al analizado previamente y al instalado en El Rodeo. Si bien es cierto que dispone de tres trampas de grasas en la etapa de pretratamiento, la autora únicamente ha realizado mediciones de calidad en la entrada y salida de la biojardinera, por lo que no ha sido posible analizar el funcionamiento de las trampas de grasas. Para ajustar el programa a la planta real se ha comenzado por establecer los datos de la investigación llevada a cabo por Moncada como valores nominales. Al igual que en el estudio realizado por Bolaños y González (2020), Moncada no incluye estimaciones de ningún parámetro no cuantificable, por lo que para un primer acercamiento se han mantenido los supuestos por García (2018), exceptuando las dimensiones de la biojardinera, el caudal, la temperatura, la porosidad y la concentración de materia orgánica, Tabla 4:

Tabla 4. Parámetros establecidos inicialmente para el modelado de la biojardinera situada en El Rodeo y parámetros de la biojardinera situada en Costa Rica. Fuente: García (2018) y Moncada (2011).

| | Parámetros modelo | Parámetros Costa Rica |
|-------------------------------------|-------------------|-----------------------|
| W (m) | 1 | 1 |
| H (m) | 0.6 | 0.7 |
| L (m) | 4.5 | 5 |
| T (°C) | 30 | 22 |
| r_{20} (h ⁻¹) | 0.28/24 | - |
| Q (m ³ h ⁻¹) | 0.25/24 | 0.069/24 |
| K_d (h ⁻¹) | 0.045/24 | - |
| K_s (g m ⁻³) | 120 | - |
| S_{in} (g m ⁻³) | 90 | 233 |
| X_{in} (g m ⁻³) | 0 | - |
| ϵ (%) | 40 | 50 |
| Y_{XS} (%) | 50 | - |
| S_0 (g m ⁻³) | 90 | - |
| X_0 (g m ⁻³) | 100 | - |

Una vez sustituidos en el programa de Scilab los datos disponibles, se ha realizado una simulación con el objetivo de comprobar si los parámetros supuestos por García se amoldan al sistema de Costa Rica y a los resultados experimentales medidos por Moncada. Las Figuras 31 y 32 muestran, respectivamente, la concentración de sustrato a la salida y la eficiencia a lo largo del tiempo:

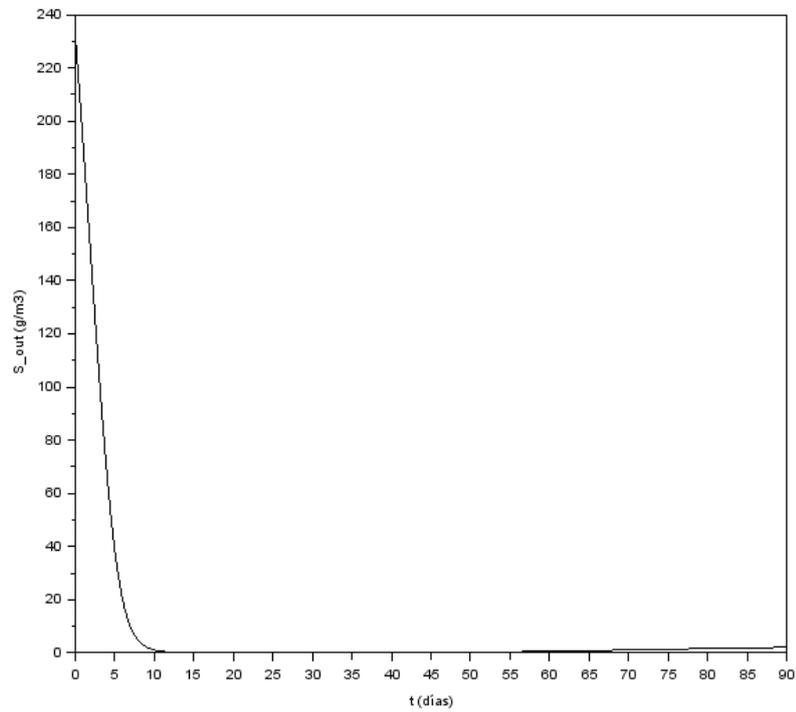


Figura 31. Evolución de la concentración de sustrato en la salida en 90 días.

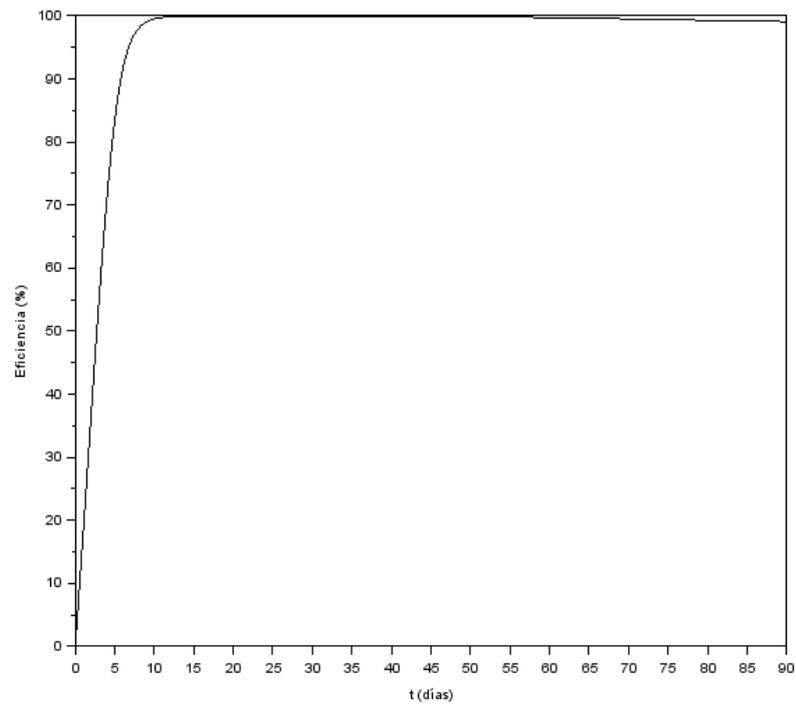


Figura 32. Evolución de la eficiencia de la biojardiera en 90 días.

La Figura 31 muestra la evolución del sustrato a la salida de la biojardinera con el tiempo. Para comprobar la adecuación de los parámetros se ha tenido en cuenta la concentración de materia orgánica medida por Moncada en la planta real, que tiene un valor de $18.11 \text{ g}_{\text{DBO}_5}/\text{m}^3$ (Moncada, 2011). Por lo tanto, se observa en las Figuras 31 y 32 que los resultados obtenidos con el programa distan mucho de la realidad. Y es que a partir del día 10 de la puesta en marcha y hasta los dos meses de funcionamiento la eficiencia lograda es del 100%, valor utópico y no aplicable al sistema real. Lo mismo ocurre con la materia orgánica, cuya concentración desciende hasta $0 \text{ g}_{\text{DBO}_5}/\text{m}^3$ (Moncada, 2011), siendo esto prácticamente imposible en la realidad. Se concluye, por lo tanto, que los parámetros iniciales estimados por García no se corresponden con los resultados experimentales de la biojardinera instalada en Costa Rica, por lo que se ha realizado una búsqueda paramétrica para ajustar el modelo. Los parámetros modificados han sido, en un principio, la velocidad de reacción de $20 \text{ }^\circ\text{C}$ (y como consecuencia la tasa de crecimiento específica máxima de los microorganismos), el coeficiente de rendimiento, la constante de saturación y el coeficiente de desaparición de los microorganismos. La Tabla 5 muestra los parámetros adecuados:

Tabla 5. Parámetros resultantes de la búsqueda paramétrica.

| | |
|-----------------------------------|----------|
| W (m) | 1 |
| H (m) | 0.7 |
| L (m) | 5 |
| T ($^\circ\text{C}$) | 22 |
| r_{20} (h^{-1}) | 0.46/24 |
| Q ($\text{m}^3 \text{ h}^{-1}$) | 0.069/24 |
| K_d (h^{-1}) | 0.6/24 |
| K_s (g m^{-3}) | 90 |
| S_0 (g m^{-3}) | 233 |
| X_0 (g m^{-3}) | 100 |
| ϵ (%) | 50 |
| Y_{XS} (%) | 0.3 |

El valor de la velocidad de reacción a $20 \text{ }^\circ\text{C}$ se ha aumentado de $0.28/24$ a $0.46/24 \text{ }^{-1}$, lo que trae como consecuencia un crecimiento más rápido de los microorganismos y una mayor eliminación de materia orgánica. Lo mismo ocurre al reducir la constante de saturación de 120 a $90 \text{ g}/\text{m}^3$ que, observando la ecuación de Monod, hace que la tasa de crecimiento aumente. También se ha disminuido la tasa de rendimiento del 50 al 30%, que trae como consecuencia una mejor depuración debido a la mayor necesidad de sustrato de los microorganismos. Si solo se realizaran estos cambios, se obtendría un resultado aún más irreal (con una eficiencia del 100% durante 70 años), por lo que, con el fin de equilibrar estos cambios, es necesario aumentar el coeficiente de desaparición, en este caso de 0.045 a 0.6 h^{-1} . Esto supone que habrá menos microorganismos disponibles para la eliminación de materia orgánica, logrando valores menores de eficiencia. Las Figuras 33 y 34 muestran respectivamente la evolución de la concentración de sustrato a la salida y de la eficiencia con los parámetros ajustados. Se ha reducido el tiempo de estudio a un mes, ya que, al contrario que en la investigación de Bolaños y González (2020), Moncada propone un mantenimiento mensual de las biojardineras.

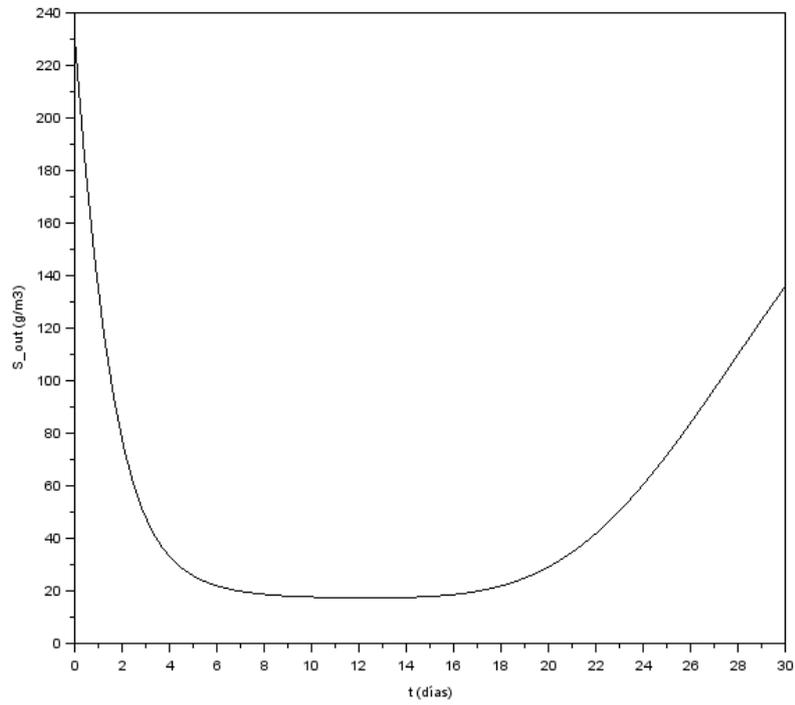


Figura 33. Evolución de la concentración de sustrato en la salida tras la búsqueda paramétrica.

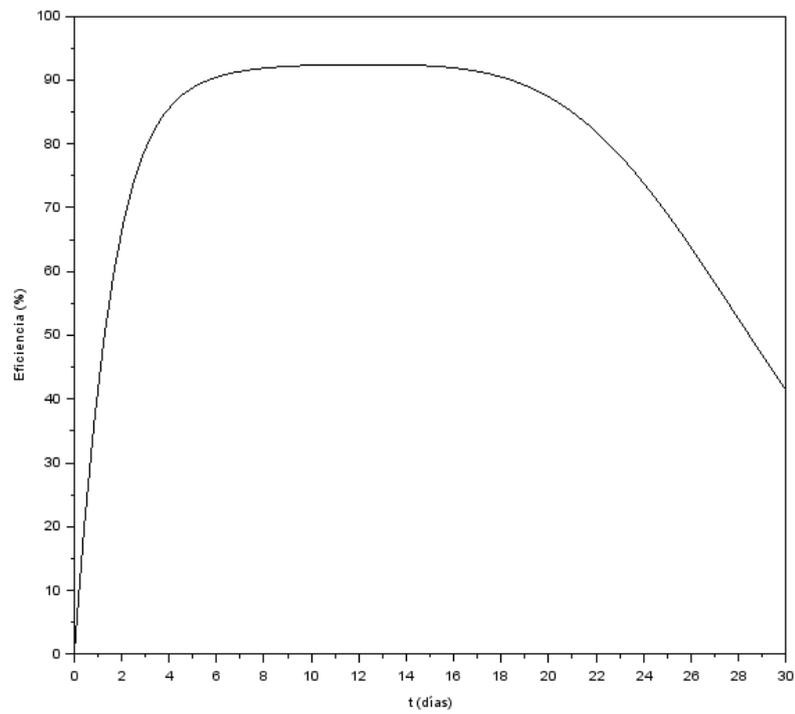


Figura 34. Evolución de la eficiencia de la biojardiera tras la búsqueda paramétrica.

Los valores tanto de concentración de materia orgánica como de eficiencia durante el funcionamiento son prácticamente iguales a los experimentales. De la Figura 33 se obtiene que la materia orgánica a la salida de la biojardinera es de $17.8 \text{ g}_{\text{DBO}_5}/\text{m}^3$, valor muy similar a los $18.11 \text{ g}_{\text{DBO}_5}/\text{m}^3$ que establecía Moncada. La eficiencia, Figura 34, muestra un valor de 92.4% frente al 92% que calculó Moncada. El sistema necesita alrededor de 5 días para estabilizarse y mantiene un funcionamiento correcto durante únicamente 10 días más. El valor de la concentración el día 30 desde la puesta en marcha es de $131 \text{ g}_{\text{DBO}_5}/\text{m}^3$, lo que supera por mucho el límite permisible establecido en el Reglamento de Vertido y Reuso de Aguas Residuales de Costa Rica (Moncada, 2011), de modo que se ha realizado una nueva búsqueda paramétrica con el fin de lograr el mantenimiento mensual que propone Moncada, Tabla 6:

Tabla 6. Parámetros resultantes de la segunda búsqueda paramétrica.

| | |
|-----------------------------------|----------|
| W (m) | 1 |
| H (m) | 0.7 |
| L (m) | 5 |
| T (°C) | 22 |
| r_{20} (h^{-1}) | 0.5/24 |
| Q ($\text{m}^3 \text{ h}^{-1}$) | 0.069/24 |
| K_d (h^{-1}) | 0.35/24 |
| K_s (g m^{-3}) | 150 |
| S_0 (g m^{-3}) | 233 |
| X_0 (g m^{-3}) | 100 |
| ϵ (%) | 50 |
| Y_{XS} (%) | 0.55 |

Además de los parámetros mostrados en la Tabla 6, también se han disminuido un 10% los valores de la fracción de lodo sedimentado y la fracción de microorganismos que pasa de un nodo al siguiente para asegurar el funcionamiento durante un mes. Las Figuras 35 y 36 muestran los resultados:

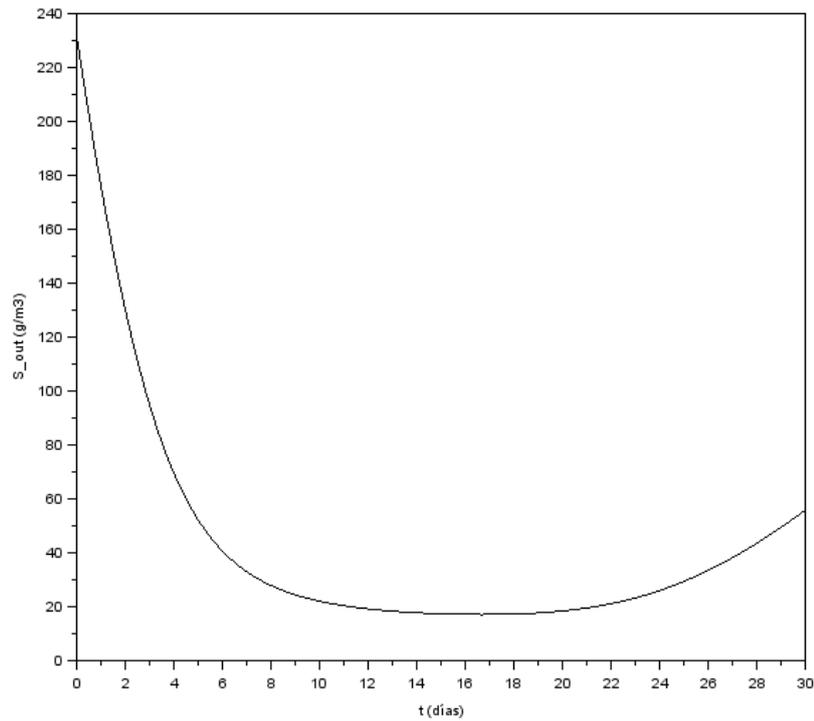


Figura 35. Evolución de la concentración de sustrato tras la segunda búsqueda paramétrica.

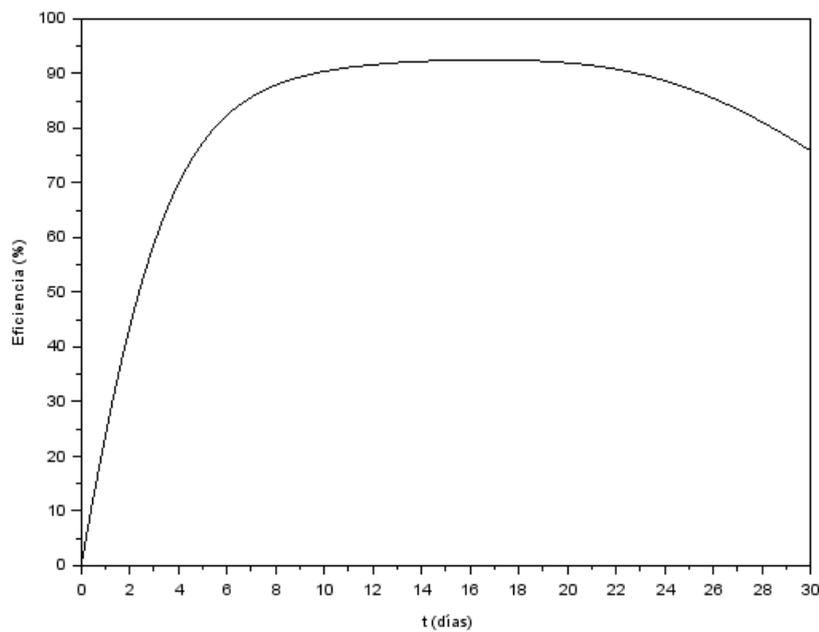


Figura 36. Evolución de la eficiencia de la biojardiera tras la segunda búsqueda paramétrica.

La tendencia mostrada en las Figuras 35 y 36 es similar a la de las Figuras 33 y 34, solo que en este caso la concentración de materia orgánica no supera los límites legales. El sistema

necesita 5 días para estabilizarse y mantiene la eficiencia por encima del 90% hasta el día 23. En ese momento el funcionamiento comienza a deteriorarse hasta superar el límite permisible de $50 \text{ g}_{\text{DBO}_5}/\text{m}^3$ el día 29 desde la puesta en marcha. Con este modelo se cumple por lo tanto el mantenimiento mensual que propone Moncada. Para entender mejor el comportamiento de la biojardinera, en la Figura 37 se muestra la evolución de la concentración de sustrato en cada nodo en el mismo periodo de tiempo:

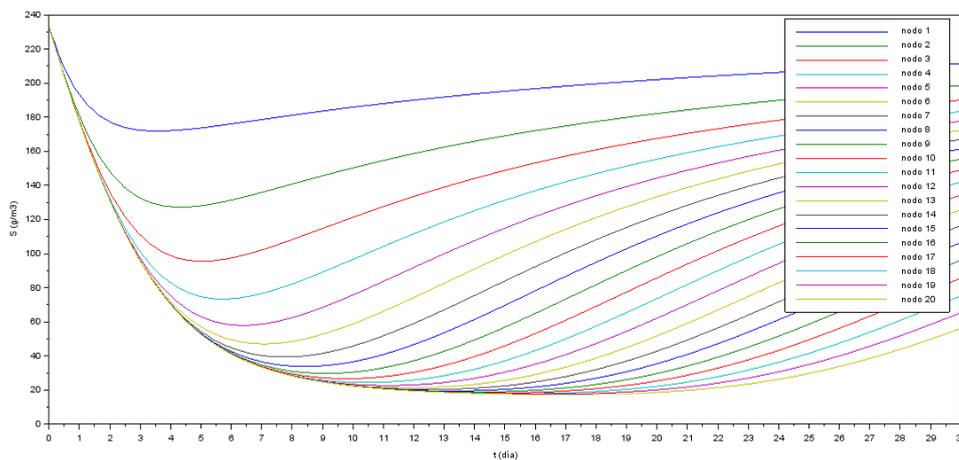


Figura 37. Evolución de la concentración de sustrato en cada nodo durante un mes.

La Figura 37 muestra cómo a medida que el efluente avanza en la biojardinera la concentración de materia orgánica disminuye. Esto ocurre porque la depuración se realiza en la primera parte de la biojardinera y llega a los últimos nodos con poca carga orgánica. El sistema comienza a estabilizarse alrededor del día 5, con una concentración de $50 \text{ g}_{\text{DBO}_5}/\text{m}^3$ en el último nodo y se mantiene con un funcionamiento correcto hasta el mes desde la puesta en marcha, como se deducía en las figuras anteriores. La Figura 38 muestra la concentración de materia orgánica en cada nodo el día 30:

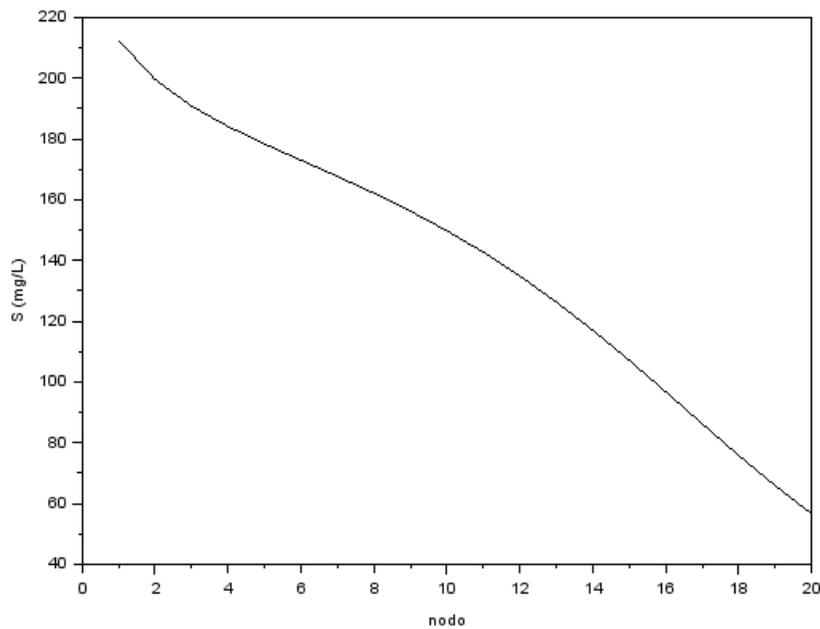


Figura 38. Evolución de la concentración de sustrato en cada nodo al mes de la puesta en marcha.

La Figura 38 indica que al mes de la puesta en marcha, por mucho que la primera parte de la biojardinera tenga aún algo de capacidad de depuración, la disminución de materia orgánica de un nodo a otro es pequeña, dando lugar a que no se logre el objetivo de depuración. El nodo 20 indica lo explicado previamente, la concentración de materia orgánica es de $53 \text{ g}_{\text{DBO}_5}/\text{m}^3$, por lo que supera por poco el límite permitido. Uno de los motivos por los que puede suceder esto es la cantidad de lodo acumulada en los nodos, Figura 39:

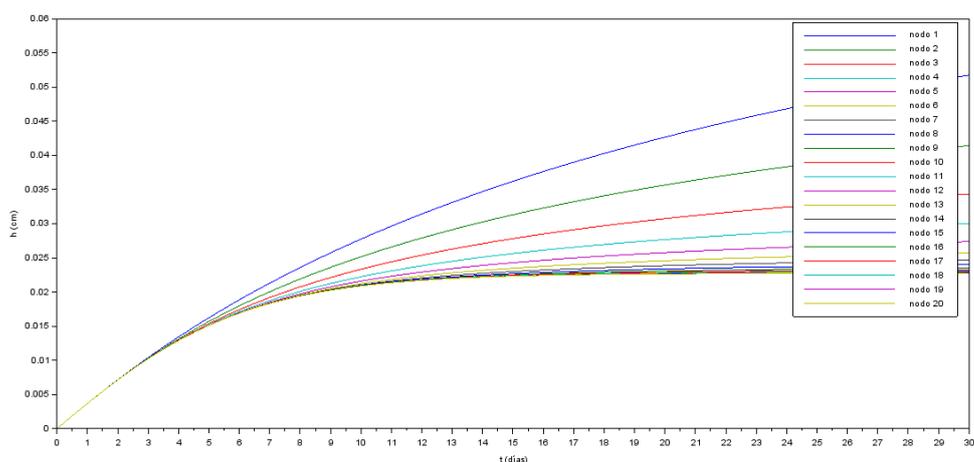


Figura 39. Evolución de la altura de la capa de lodo en la biojardinera durante un mes.

Al contrario que en la biojardinera situada en la Universidad de El Salvador, en este caso la mayor altura se da en los primeros nodos y disminuye a medida que se avanza en la biojardinera.

Esto se debe probablemente a que el tiempo de activación necesario de los microorganismos es menor. Aun así, la altura máxima que alcanza el lodo es de apenas 0.5 mm, por lo que se descarta como motivo del bajo rendimiento del sistema. Por tanto, se ha deducido que el sistema dejará de funcionar al mes de la puesta en marcha debido a la desaparición de los microorganismos. La Figura 40 muestra la evolución de los microorganismos en cada nodo con el paso del tiempo:

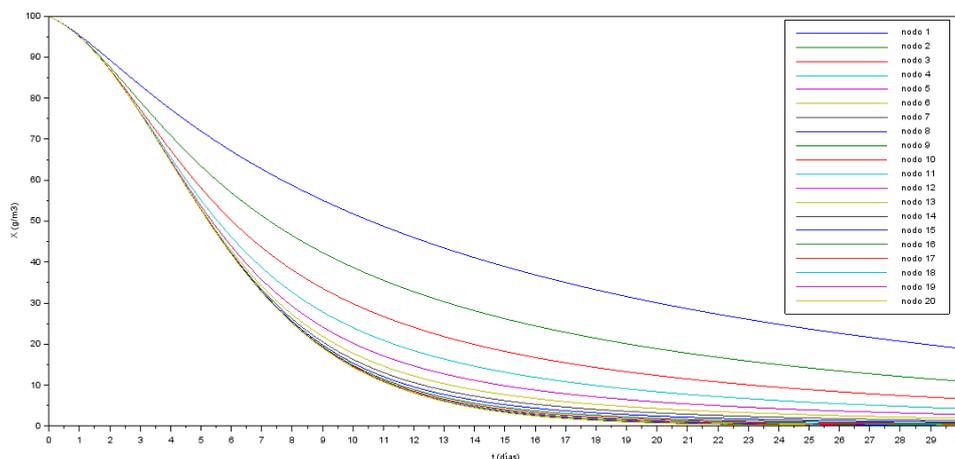


Figura 40. Evolución de la concentración de los microorganismos en cada nodo con el tiempo.

En la Figura 40 se observa cómo la cantidad de microorganismos disminuye a medida que pasa el tiempo. La mayor cantidad de biomasa se encuentra en los primeros nodos, mientras que en los nodos finales es prácticamente nula en los últimos días. Esto deriva en que, como los microorganismos están concentrados al principio de la biojardinera, los últimos nodos no tienen capacidad de depuración. Como consecuencia, por mucho que al inicio de la biojardinera los microorganismos consuman algo de materia orgánica, la concentración en la salida será demasiado alta por la escasez de biomasa en la última parte de la biojardinera.

En cuanto a la concentración de grasas y aceites, como se ha comentado anteriormente, Moncada no especifica las concentraciones iniciales de grasas y aceites, pero sí las de la salida, por lo que, con el fin de modelar el sistema completo de trampa de grasas y biojardinera, se ha supuesto que la concentración de grasas y aceites inicial es de 250 g/m^3 , valor típico en las aguas grises domésticas. De esta manera se han podido ajustar los parámetros del modelado integral de la biojardinera con trampa de grasas, obteniendo una mejor simulación del comportamiento del sistema. La Tabla 7 muestra los parámetros seleccionados para el modelado integral de la biojardinera con la trampa de grasas:

Tabla 7. Parámetros resultantes de la búsqueda paramétrica para el modelado integral de la biojardinera con trampa de grasas.

| | Biojardinera | Trampa de grasas |
|-------------------------------------|--------------|------------------|
| W (m) | 1 | - |
| H (m) | 0.7 | - |
| L (m) | 5 | - |
| V_r (m ³) | - | 0.224 |
| T (°C) | 22 | 22 |
| V_m (h ⁻¹) | 0.76/24 | 0.03/24 |
| Q (m ³ h ⁻¹) | 0.069/24 | 0.069/24 |
| K_d (h ⁻¹) | 0.45/24 | 0.16/24 |
| K_s (g m ⁻³) | 160 | 50 |
| Y_{XS} (%) | 55 | 80 |
| X_0 (g m ⁻³) | 100 | 20 |

Las mediciones realizadas por Moncada indican que la concentración real de salida de grasas y aceites es de 36 g/m³. La Figura 41 muestra evolución de la concentración con el tiempo:

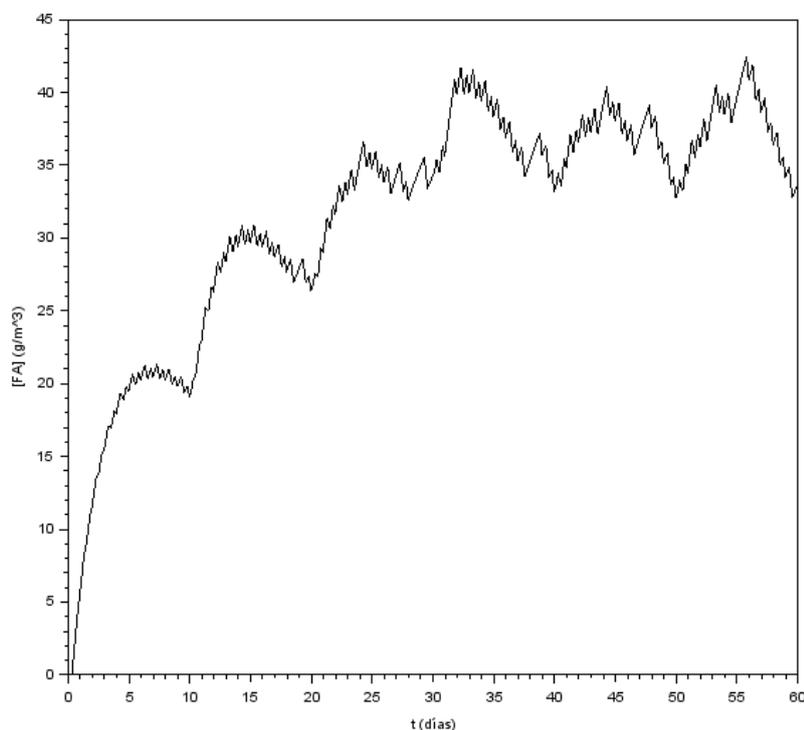


Figura 41. Evolución de la concentración de salida de las grasas y aceites con el tiempo.

El valor máximo de la concentración de grasas y aceites alcanza los 41 g/m³, próximo a la medición de la autora. Los altibajos formados se deben a la recarga de caudal que se realiza cada 10 días con el fin de mantener la activación del sistema y el funcionamiento de las enzimas.

Además de la concentración, es importante conocer la altura de la capa que forman las grasas y aceites en la trampa, deteriorando su comportamiento, Figura 42:

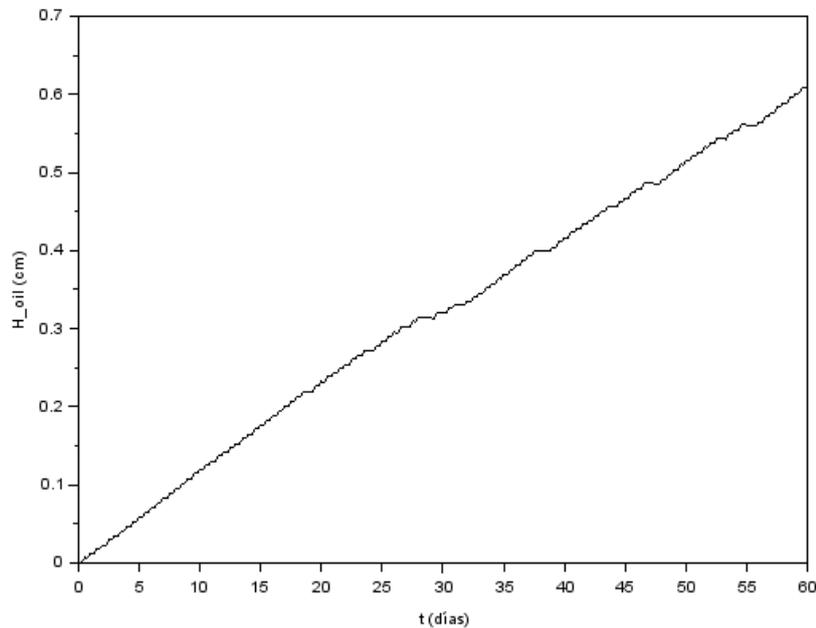


Figura 42. Evolución de la altura de la capa formada por las grasas y aceites con el tiempo.

Si bien es cierto que la capa de grasas y aceites no alcanza el centímetro de altura, es importante remover estos residuos y tratarlos de forma adecuada, ya que un mantenimiento poco adecuado de la trampa de grasas puede producir malos olores, además de un descenso en la eficiencia. Cabe mencionar que, por mucho que la simulación se acerque a la realidad, como explica Moncada en su investigación, los valores obtenidos de grasas y aceites en la salida no cumplen con la normativa y superan con creces el límite establecido de 25 g/m^3 , y es que el rendimiento de la trampa de grasas no sube del 80%.

Por último, las Figuras 43 y 44 muestran los resultados de la concentración de sustrato de salida y de la eficiencia con el modelado integral de biojardinera y trampa de grasas:

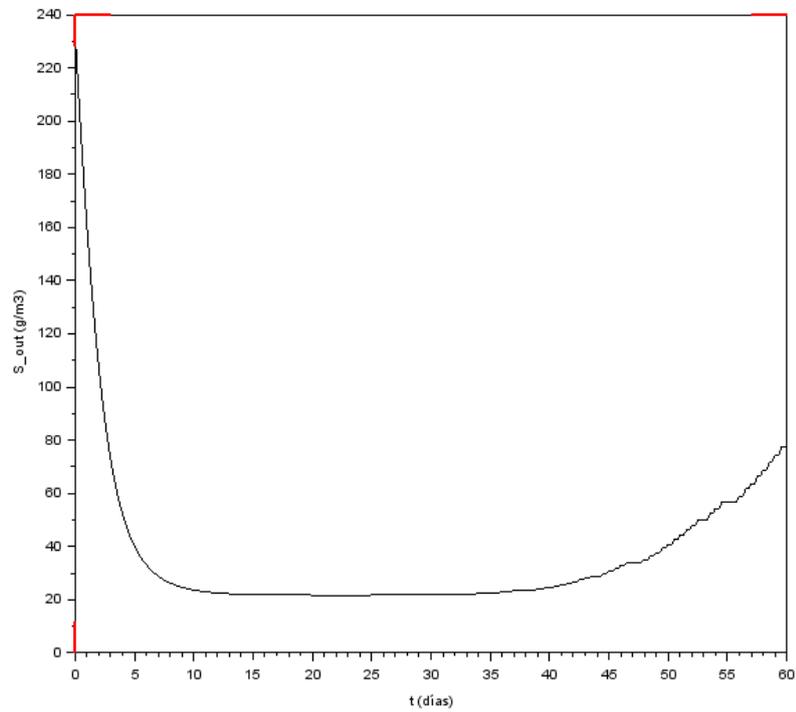


Figura 43. Evolución de la concentración de sustrato con el tiempo con el modelado integral.

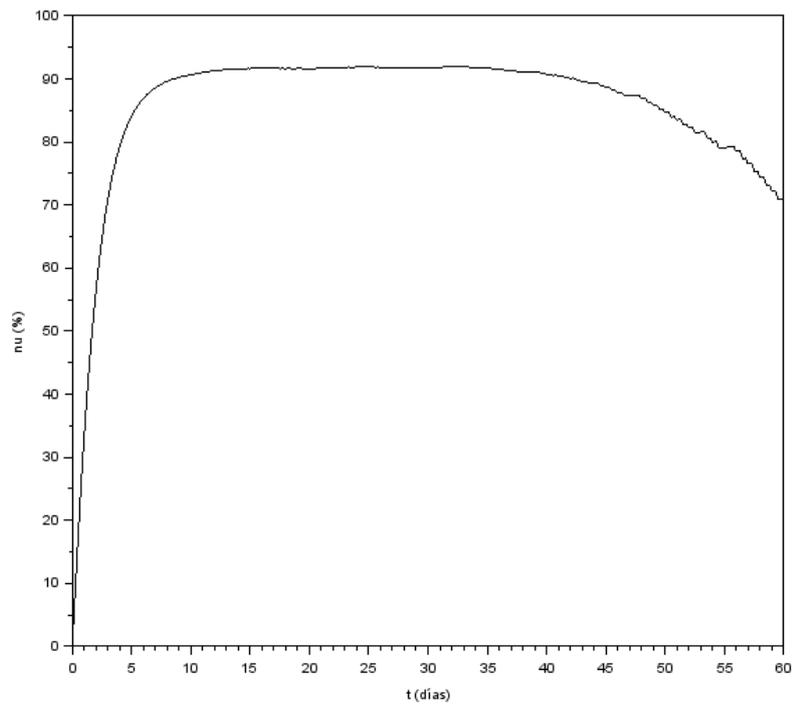


Figura 44. Evolución de la eficiencia del sistema con el tiempo con el modelado integral.

Como se observa en las figuras, el programa se ajusta a los datos experimentales con un margen de $3 \text{ g}_{\text{DBO}_5}/\text{m}^3$ y con una eficiencia prácticamente idéntica a la experimental del 92%. En cuanto al tiempo de mantenimiento, se ha logrado un funcionamiento adecuado hasta el día 40, momento en el que la eficiencia comienza a descender por debajo del 90%, frente a los 30 que recomendaba Moncada. Se concluye, por lo tanto que la adecuación es correcta y que el programa es capaz de simular el comportamiento de la biojardinera instalada en Costa Rica.

Para terminar, se propone una mejora de diseño para el sistema de pretratamiento, con el fin de disminuir los valores de salida de la concentración de grasas y aceites por debajo del límite legal. Para ello, se propone aumentar el volumen del tanque de pretratamiento a 1 m^3 y lograr una mejor depuración. La Figura 45 muestra los resultados:

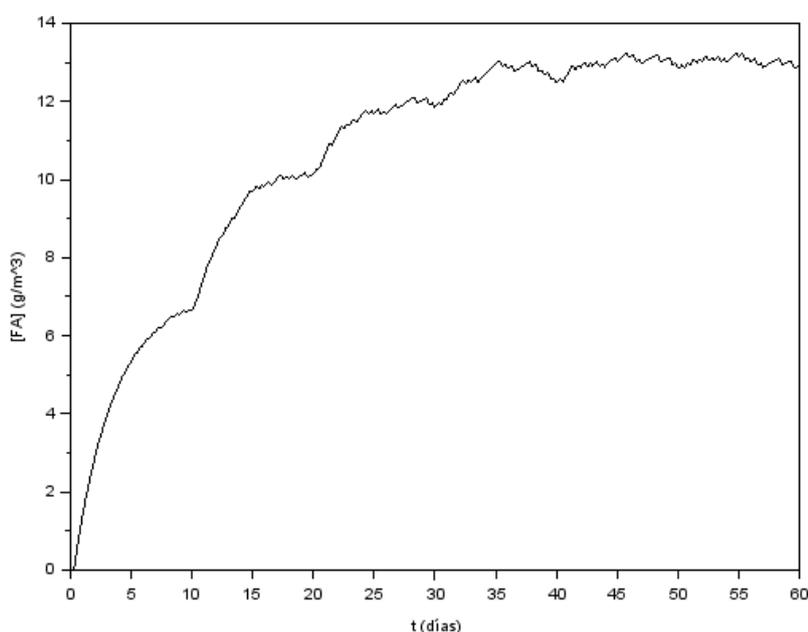


Figura 45. Evolución de la concentración de salida de grasas y aceites con la propuesta de mejora de diseño.

Se observa en la Figura 45 como los valores máximos son algo menores de $14 \text{ g}/\text{m}^3$, por lo que quedan por debajo del límite permitido de $25 \text{ g}/\text{m}^3$. Se deduce, por tanto, la importancia del volumen del tanque de pretratamiento a la hora de realizar el diseño del sistema.

5. CONCLUSIONES

Antes de comenzar con las conclusiones es necesario destacar que debido a la situación provocada por la Covid-19 los resultados de este TFG difieren de los objetivos planteados inicialmente. Aun así se extraen varios resultados del trabajo realizado.

Para comenzar, se ha demostrado que la biojardinera es un sistema eficaz para el tratamiento de aguas grises. Es además útil en un rango amplio de concentraciones de materia orgánica, desde los 695 g/m^3 que contenían las aguas residuales producidas en los comedores de la Universidad de El Salvador hasta los 200 g/m^3 de las aguas domésticas de Zapote, Costa Rica. En ambos casos el sistema ha dado eficiencias mayores al 90% y la concentración del agua tratada se ha mantenido por debajo del límite establecido legalmente en cada país. En cuanto al mantenimiento, dependiente en gran parte del tamaño de la biojardinera, deberá realizarse en un periodo de 1 a 6 meses para un funcionamiento pleno del sistema. Es cierto que la biojardinera instalada en Costa Rica necesita una limpieza mensual mientras que la ubicada en la Universidad de El Salvador la necesita cada 6 meses, pero hay que tener en cuenta que hay aproximadamente 10 metros de diferencia en las dimensiones, por lo que es entendible que para sistemas domésticos la estructura sea menor y el mantenimiento mayor. Esto demuestra también las amplias utilidades de la biojardinera, siendo apta tanto en casas, cocinas o incluso en construcciones industriales. Además de su funcionalidad, la biojardinera es un sistema sostenible medioambientalmente y asequible en países del Sur Global.

También se han obtenido resultados positivos en el modelado de la trampa de grasas. Ajustando los parámetros del sistema se ha simulado la concentración de grasas y aceites que puede tratar la trampa y la altura de grasa que se formaría, predecendo así el tiempo de mantenimiento necesario. Por mucho que los resultados experimentales de la biojardinera instalada en Costa Rica no cumplan con los límites ambientales, el programa ha permitido encontrar el error de diseño, demostrando su utilidad a la hora de realizar nuevas construcciones.

En cuanto al modelado, queda demostrada la versatilidad del programa creado por García, Manso y Urkijo. Gracias a una búsqueda paramétrica, es posible ajustar el modelo a prácticamente cualquier tipo de biojardinera, independientemente de sus dimensiones, concentraciones o caudales. Prueba de esto último es la diferencia en los caudales de las dos biojardineras analizadas ($14.48 \text{ m}^3/\text{día}$ y $0.069 \text{ m}^3/\text{día}$) e incluso la diferencia de temperaturas (31 °C y 22 °C). El programa ha sido capaz de ajustarse a ambas situaciones dando lugar a simulaciones que representan de una forma impecable la realidad. Esto supone un gran avance en el diseño de sistemas de tratamiento de aguas grises, ya que el poder predecir el comportamiento que tendrá la planta antes de su construcción trae consigo una reducción en los costes, una optimización en el diseño y un inmenso ahorro de tiempo.

Para poder ajustar el programa de manera adecuada, ha sido necesario entender cómo afectar los distintos parámetros en las concentraciones de materia orgánica. El aumento en la tasa específica de crecimiento y una disminución en la constante de saturación dan lugar a una mejor depuración de las aguas, mientras que el aumento del coeficiente de desaparición o de la tasa de rendimiento tendrán el efecto contrario. Para optimizar el tiempo de uso del sistema, es necesario modificar la fracción de lodo sedimentado en cada nodo y la fracción de microorganismos que pasan de un nodo a otro. El análisis exhaustivo del efecto que tienen estos parámetros ha resultado de gran ayuda a la hora de realizar la búsqueda paramétrica.

El aumento en la implementación de sistemas de este tipo en comunidades del Sur Global tiene como consecuencia una reducción en el riesgo de contracción de enfermedades gastrointestinales e infecciosas derivadas de la falta de saneamiento. Además trae mejoras para el medioambiente debido a la mejor calidad de los vertidos a ríos y quebradas. Cabe recordar que este TFG responde a una demanda concreta de la comunidad de El Rodeo, por lo que la realización del mismo conlleva a un empoderamiento comunitario y a una mejora en la calidad de vida.

Si bien es cierto que se han realizado la mayoría de los hitos propuestos inicialmente, se plantean ciertas propuestas para futuros trabajos. Por mucho que se haya demostrado el funcionamiento del programa en diferentes plantas reales, resultaría interesante poder realizar el análisis de las biojardineras instaladas en el Rodeo, como se proponía inicialmente. Se sugiere también analizar los cambios en el funcionamiento de la biojardinera en las diferentes épocas del año. Además, sería interesante integrar la eliminación de sólidos en el programa, con el fin de conocer mejor la calidad del agua tratada.

6. NOMENCLATURA

| | | |
|--------------|---|-----------------------------|
| a | Área libre específica de la interfase | $\text{m}^2 \text{kg}^{-1}$ |
| A | Área de la biojardinera | m^2 |
| AG_{out} | Concentración de la corriente de salida de ácidos grasos y glicéridos | g m^{-3} |
| E_{in} | Concentración de entrada de las encimas | g m^{-3} |
| E_{out} | Concentración de salida de las encimas | g m^{-3} |
| f_h | Fracción de los microorganismos que se trasladan de un nodo a otro | |
| f_v | Fracción del nodo sedimentado | |
| h_i | Altura del lodo en el nodo i | m |
| H | Altura de la biojardinera | m |
| k_d | Constante de velocidad de la desorción | min^{-1} |
| k_{sal} | Porcentaje de salida de la biomasa | % |
| K_d | Coefficiente de desaparición de los microorganismos | g m^{-3} |
| K_s | Constante de saturación | g m^{-3} |
| L | Longitud de la biojardinera | m |
| m_{aceite} | Masa de aceites y grasas que se acumulan en la trampa de grasas | g |
| n | Cantidad total de nodos | |
| Q | Caudal | $\text{m}^3 \text{h}^{-1}$ |
| Q_{aceite} | Caudal del aceite | $\text{m}^3 \text{h}^{-1}$ |
| Q_{agua} | Caudal del agua | $\text{m}^3 \text{h}^{-1}$ |
| r_s | Velocidad de reacción del sustrato | h^{-1} |
| r_x | Velocidad de reacción de los microorganismos | h^{-1} |
| S | Concentración del sustrato | g m^{-3} |
| S_i | Concentración del sustrato en el nodo i | g m^{-3} |

| | | |
|--------------|---|---|
| S_{in} | Concentración de entrada del sustrato | g m^{-3} |
| S_{out} | Concentración de salida del sustrato | g m^{-3} |
| t | Tiempo | h |
| V_r | Volumen del reactor | m^3 |
| V_l | Volumen de la fase acuosa | m^3 |
| W | Anchura de la biojardinera | m |
| X | Concentración de los microorganismos en la biojardinera | g m^{-3} |
| X_b | Concentración de microorganismos en la trampa de grasas | g m^{-3} |
| X_i | Concentración de microorganismos en el nodo i | g m^{-3} |
| X_{in} | Concentración de entrada de microorganismos | g m^{-3} |
| X_{∞} | Concentración de microorganismos en el lodo | g m^{-3} |
| y_i | Altura del caudal de las aguas grises utilizable en el nodo i | m |
| Y_{xs} | Coefficiente de rendimiento | $\frac{\text{g}_{\text{sustrato}}}{\text{g}_{\text{biomasa}}^{-1}}$ |

Letras griegas

| | | |
|-----------------|---|--------------------|
| ΔV | Volumen de un nodo | m^3 |
| Δz | Longitud de un nodo | m |
| ϵ | Porosidad | % |
| η | Eficiencia del proceso | % |
| μ | Tasa de crecimiento específico | h^{-1} |
| μ_m | Velocidad específica del crecimiento máximo | h^{-1} |
| τ | Tiempo espacial | día |
| ρ_{aceite} | Densidad del aceite | kg m^{-3} |

7. BIBLIOGRAFÍA

ADES, 2020. Informe técnico: dimensionamiento de una biojardinera.

An, C., Huang, G., Yao, Y., Zhao, S., 2017. Emerging usage of electrocoagulation technology for oil removal from wastewater: A review. *Science of The Total Environment* 579, 537–556. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969716325013>, doi:10.1016/j.scitotenv.2016.11.062. (Visitado el 17/02/2020).

APHA, 1992. Métodos normalizados para el análisis de aguas potables y residuales. Ediciones Díaz de Santos. URL: <http://ebookcentral.proquest.com/lib/biblioteca/detail.action?docID=3176700>. (Visitado el 24/05/2020).

Arellano, A.Y., Sánchez, E.R., 2017. Propuesta de mejora de diseño de una trampa de grasa para restaurantes.

Bolaños, C.M., González, D.B., 2020. Evaluación de la eficiencia de tratamiento de aguas grises mediante la comparación de un humedal artificial con un método físicoquímico en los comedores de la Universidad de El Salvador.

Calderón, F., Pavlova, M., 2001. Determinación de la demanda bioquímica de oxígeno DBO5. Método respirométrico. URL: http://www.drcalderonlabs.com/Metodos/Analisis_De_Aguas/Determinacion_DBO5_Metodo_Respirometrico.htm. (Visitado el 04/06/2020).

Carpio, T.M., Hernández, A.M., Solano, M.E.D., 2007. Sólidos totales secados a 103 ° - 105 °C. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales .

Cruz, A.M., Sierra, C.M., 2016. Propuesta de una alternativa de tratamiento de aguas residuales en la Salsamentaria el Bohemio. URL: <http://repository.uamerica.edu.co>. (Visitado el 18/02/2020).

Fernández, P.E., Riobos, M.C., Gutiérrez, J.D., 1986. Manual de control analítico de la potabilidad de las aguas de consumo humano. Díaz de Santos. URL: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/libro?codigo=122246>. (Visitado el 04/06/2020).

García, L., 2018. Ur grisen tratamendurako biojardineraren modelakuntza eta simulazioa.

iAgua, 2013. El agua es un derecho humano. URL: <https://www.iagua.es/noticias/onu/13/12/09/el-derecho-humano-al-agua-41658>. (Visitado el 02/03/2020).

Li, F., Wichmann, K., Otterpohl, R., 2009. Review of the technological approaches for grey water treatment and reuses. *Science of The Total Environment* 407, 3439–3449. URL: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0048969709001594>, doi:10.1016/j.scitotenv.2009.02.004. (Visitado el 17/02/2020).

Manso, M., 2018. Biojardineraren koipe tranparen aktibazio biologikoa eta beraren modelizazioa.

Menéndez, M., 2017. 1020UY: Determinación de sólidos suspendidos totales, fijos y volátiles en aguas naturales y efluentes líquidos. URL: <https://www.mvotma.gub.uy/component/k2/item/>

10010779-solidos-suspendidos-totales-fijos-y-volatiles-1020uy. (Visitado el 24/05/2020).

Moncada, S., 2011. Evaluación del diseño de una biojardinera de flujo subsuperficial para el tratamiento de aguas grises en Zapote, San José.

Moran, M., s.f. Agua y saneamiento. URL: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/water-and-sanitation/>. (Visitado el 17/02/2020).

Ortega de Miguel, E., Ferrer, Y., Salas, J.J., Aragón, C., 2013. Manual para la implantación de sistemas de depuración en pequeñas poblaciones.

Perez-Pons, E., 2019. Eguzki energia bidezko ur ponpaketa-sistema isolatua Buena Vistan.

Rodríguez de Zuniga, L.E., Salinas, J., Barrera, M.A., Hernández, C.E., Hernández, J.M., Munguía, F.A., 2018. Encuesta de Hogares de Propósitos Múltiples. Technical Report. Dirección General de Estadística Y Censos (DIGESTYC).

Salgado, I., Cruz, M., Durán, M.d.C., 2009. Perspectivas del empleo de la tecnología de humedales construidos para la remediación de aguas residuales, (...) En: Memorias del Taller por el Día Mundial del Medio Ambiente. URL: <http://ebookcentral.proquest.com/lib/biblioteka/detail.action?docID=3186811>. (Visitado el 28/02/2020).

Solís, A., Ricardo, M., 2015. Estudio para la reutilización de aguas grises producidas en el hogar, como agua de regadío en la casa prototipo del barrio Chan, cantón Latacunga, provincia Cotopaxi. URL: <http://repositorio.utc.edu.ec/handle/27000/2684>. (Visitado el 18/02/2020).

Urkijo, L., 2019. Modelado integral de una biojardinera con trampa de grasas bioactiva.

Weather Spark, 2020. Clima promedio en San Salvador, El Salvador, durante todo el año - Weather Spark. URL: <https://es.weatherspark.com/y/12243/Clima-promedio-en-San-Salvador-El-Salvador-durante-todo-el-a%C3%B1o>. (Visitado el 26/05/2020).