

Trabajo Fin de Grado en
Ingeniería Química Industrial



DESARROLLO DE DIGESTOR ANAEROBIO MESÓFILO DE LABORATORIO PARA EL TRATAMIENTO DE FANGOS MIXTOS DE EDAR

Autor:

Manuel Campo Mínguez

Tutores:

Julián Lebrato Martínez y María Dolores Garvi Higuera

Departamento de Ingeniería Química
Escuela Politécnica Superior
Universidad de Sevilla
Sevilla, julio 2023

AGRADECIMIENTOS

Quisiera agradecer el esfuerzo, el interés, los conocimientos, la dedicación y paciencia que me han brindado mi tutora Dolores Garvi Higuera y mi tutor Julián Lebrato Martínez durante todos estos meses de trabajo, que me han ayudado en mi formación como técnico ambiental del grupo TAR.

Agradecer también a mi padre y nuestra tigresa, por intentar darme lo mejor, para que pueda tener las mejores oportunidades siempre y por hacerme ver que en la vida siempre hay tiempo para todo.

A mi madre, por enseñarme a luchar en la vida, por creer en mí, por sus ánimos, por estar siempre ahí y aconsejarme.

¡Pili, que tu hijo va a ser ingeniero!

A mi abuela por su apoyo incondicional. No puedo expresar con palabras lo agradecido que estoy por tener una abuela tan excepcional como ella.

A mi tía Lidia y mi tío Alejandro Calderón Gil, por ayudarme a florecer en la vida.

A mi gran amigo y compañero de carrera Chenar Miró, que realmente entiende lo que esto cuesta y el apoyo mutuo. Las risas y los paseos son fundamentales para desconectar.

A todos aquellos y aquellas que de una manera u otra han formado parte de mi vida en el tiempo que ha durado la carrera, que me han apoyado y animado cuando lo he necesitado.

Y en especial a mi abuelo

¡¡Lo conseguimos abuelo!!

RESUMEN

La digestión anaerobia, también conocida como biometanización, representa un proceso biológico que ocurre en condiciones de ausencia de oxígeno. Su principal mecanismo radica en la degradación de carbono orgánico, presente en los fangos mixtos obtenidos de una Estación Depuradora de Aguas Residuales, para producir ácidos orgánicos y biogás.

Es esencial adquirir conocimientos acerca del montaje y funcionamiento de los digestores anaerobios a nivel de laboratorio. Esto se debe a que dichos digestores permiten la valorización de los residuos, los cuales se convierten en materia prima para otros procesos. En consecuencia, se genera un desarrollo sostenible en términos de gestión de residuos, contribuyendo a la economía circular en el ciclo del agua de las estaciones depuradoras.

ABSTRACT

Anaerobic digestion, also known as biomethanization, is a biological process that takes place in the absence of oxygen. Its main mechanism is the degradation of organic carbon present in the mixed sludge from a wastewater treatment plant to produce organic acids and biogas.

It is essential to acquire knowledge of the construction and operation of anaerobic digesters at the laboratory level. This is because these digesters allow the valorization of waste, which becomes a raw material for other processes. This is a sustainable development in terms of waste management, contributing to the circular economy in the water cycle of wastewater treatment plants.

ÍNDICE GENERAL

1. INTRODUCCIÓN	10
1.1. Línea de agua de una EDAR	10
1.2. Tratamiento de las aguas residuales.....	14
1.3. Digestión anaerobia	14
1.4. Etapas de la digestión anaerobia	14
1.5. Ventajas e inconvenientes de la digestión anaerobia	17
1.6. Digestores anaerobios	18
1.7. Variables a controlar en la digestión anaerobia	23
1.8. Digestión anaerobia termófila.....	29
1.9. Aprovechamiento del biogás	31
1.10. Marco Normativo Legal.....	33
2. OBJETIVOS Y ALCANCE	36
3. MATERIALES Y MÉTODOS.....	38
3.1. Materiales.....	38
3.2. Métodos	52
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	64
5. CONCLUSIONES	82
6. LINEAS FUTURAS	84
7. BIBLIOGRAFÍA.....	86

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Diagrama de flujo ciclo de agua. Fuente: propia	13
Ilustración 2. Etapas de la digestión anaerobia. Fuente: ⁸	16
Ilustración 3. Digestor anaerobio de laboratorio. Fuente: Grupo TAR.....	19
Ilustración 4. Representación esquemática de un digestor anaerobio de lodos de baja velocidad. Fuente: ⁸	20
Ilustración 5. Representación esquemática de un digestor anaerobio de lodos de alta velocidad de una etapa. Fuente: ⁸	20
Ilustración 6. Representación esquemática de un digestor anaerobio de lodos de alta tasa y dos etapas. Fuente: ⁸	21
Ilustración 7. Representación esquemática de un digestor UASB. Fuente: ¹⁴ ..	22
Ilustración 8. Representación esquemática de un digestor IC. Fuente: ¹⁵	23
Ilustración 9. Intervalo de temperatura para rango mesófilo de la digestión anaerobia. Fuente: ¹⁷	24
Ilustración 10. Proceso discontinuo. Fuente: ³⁹	39
Ilustración 11. Digestor anaerobio encamisado. Fuente: propia.....	39
Ilustración 12. Tapa digestor anaerobio. Fuente: propia	40
Ilustración 13. Bombas peristálticas de alimentación	Ilustración 14. Bomba peristáltica de salida. Fuente: propia
Ilustración 15. Programadores Digitales de Garza. Fuente: propia	42
Ilustración 16. Activación y prueba del baño térmico. Fuente: propia	45
Ilustración 17. Almacenamiento en recipiente plástico de fangos mixtos filtrados. Fuente: propia.....	47
Ilustración 18. Gasómetro por desplazamiento de volumen. Fuente: propia....	49
Ilustración 19. Digestor anaerobio mesófilo de laboratorio. Fuente: propia.....	50
Ilustración 20. pH-metro CRISON GLP 21+. Fuente: propia	52
Ilustración 21. Esquema representativo de los algoritmos a realizar en la determinación de DQO. Fuente: ⁴⁰	55
Ilustración 22. Fase 1. Estandarización semanal. Fuente: propia	59
Ilustración 23. Esquema representativo de los algoritmos a realizar en la determinación de fósforo. Fuente: ⁴¹	61
	63

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Requisitos para los vertidos procedentes de instalaciones de tratamiento de aguas residuales urbanas. Fuente: ¹	12
Tabla 2. Intervalos de pH, alcalinidad y acidez total en el proceso de digestión anaerobia. Fuente: ⁸	27
Tabla 3. Concentraciones límites de elementos químicos que producen la disminución del rendimiento de la digestión anaerobio. Fuente: ¹⁹	29
Tabla 4. Programación temporizador bomba peristáltica de recirculación. Fuente: propia	46
Tabla 5. Resultados de C.O.V. de alimentación. Fuente: propia.....	64
Tabla 6. Resultados de Temperatura. Fuente: propia	66

Tabla 7. Resultados de Producción de biogás generado. Fuente: propia.....	67
Tabla 8. Resultados de Demanda Química de Oxígeno. Fuente: propia	69
Tabla 9. Resultados en el afluente y efluente de pH. Fuente: propia	71
Tabla 10. Resultados de Conductividad eléctrica de la alimentación. Fuente: propia	72
Tabla 11. Resultados de Conductividad eléctrica en el efluente. Fuente: propia	73
Tabla 12. Resultados de Sólidos Totales, %MS eliminada, Sólidos Volátiles, %MV eliminada del digestor anaerobio. Fuente: propia	73
Tabla 13. Resultados de Alcalinidad, Acidez Total en la alimentación. Fuente: propia	76
Tabla 14. Resultados de Alcalinidad, Acidez Total y su Relación en el efluente. Fuente: propia	77
Tabla 15. Resultados Fósforo Total. Fuente: propia	79

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1. Volumen de biogás experimental. Fuente: propia.....	68
Gráfico 2. %DQO eliminada VS Producción de biogás. Fuente: propia	70
Gráfico 3. Representación de SV afluentes y efluentes. Fuente: propia	75
Gráfico 4. %MV eliminado VS volumen biogás experimental. Fuente: propia..	76
Gráfico 5. Alcalinidad, Acidez Total y su Relación en el efluente. Fuente: propia	79
Gráfico 7. Evolución del Fósforo Total efluente y afluente. Fuente: propia	80

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1. Cálculo de Sólidos Totales	57
Ecuación 2. Cálculo de Sólidos Volátiles	57
Ecuación 3. Cálculo de la DQO en mg O ₂	58
Ecuación 4. Cálculo Alcalinidad Total	60
Ecuación 5. Cálculo de Acidez Volátil soluble expresado en mg/L CH ₃ COOH	62
Ecuación 6. Cálculo de Acidez Volátil soluble expresado en mg/L CaCO ₃	62

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Línea de agua de una EDAR

En la etapa de entrada del agua residual, conocida como línea de agua, se lleva a cabo un proceso de tratamiento en varias etapas, incluyendo el pretratamiento, tratamiento primario y tratamiento secundario.

En el pretratamiento, se realiza la limpieza del agua proveniente de la red de alcantarillado con el objetivo de prepararla para los tratamientos subsiguientes. Esta etapa tiene como finalidad la eliminación de materiales gruesos, flotantes, arenas, aceites y grasas mediante tratamientos de tipo físicos como el desbaste, desarenado y desengrasado. Esta operación reviste una gran importancia, ya que previene daños mecánicos en los equipos y la inhibición del proceso biológico.

En el tratamiento primario, el agua residual ingresa a unidades conocidas como sedimentadores, donde se permite que ocurra el proceso de decantación de la materia orgánica presente en el agua. Durante este proceso, las partículas con una densidad mayor a la del agua sedimentan, mientras que aquellas con una densidad significativamente menor flotan y se recolectan mediante un sistema de barrido.

Este tratamiento primario logra una eliminación aproximada del 65% de los sólidos en suspensión presentes en el agua. Estos sólidos se denominan lodos primarios y están compuestos principalmente por minerales y pequeñas fracciones de materia orgánica. Los lodos primarios representan una fracción significativa de los contaminantes suspendidos en el agua residual y su remoción en esta etapa contribuye a la reducción de la carga orgánica antes de avanzar al tratamiento secundario.

En el tratamiento secundario, se aborda la eliminación de los sólidos remanentes que no decantan debido a su naturaleza coloidal o disuelta. Para lograr esto, se emplea un proceso de depuración biológica, donde la materia orgánica presente en el agua residual se transforma mediante la actividad de microorganismos. Estos microorganismos tienden a agruparse en flóculos, los cuales tienen la propiedad de sedimentar debido a su peso.

En esta etapa, se utiliza un segundo proceso de decantación para permitir la sedimentación de los flóculos microbianos formados durante la depuración biológica. Mediante este proceso, los flóculos sedimentan y se separan del agua tratada. Los sólidos resultantes de esta separación se conocen como lodos secundarios o lodos activados en exceso.

La combinación de los lodos primarios y secundarios, provenientes de los decantadores de la línea de agua de una Estación Depuradora de Aguas Residuales (EDAR), se conoce como fangos mixtos. Estos fangos mixtos son sometidos a un proceso de tratamiento denominado digestión anaerobia, esta se corresponde con la línea de gas, que consta principalmente de un reactor anaerobio, donde microorganismos degradan la materia orgánica en ausencia de oxígeno, generando biogás. Luego, el biogás se recolecta, se purifica para eliminar impurezas como sulfuro de hidrógeno y humedad, y se almacena en un tanque. En cuanto a los fangos tratados, se pueden llevar a un tratamiento de compostaje.

Una vez concluido el proceso de la línea de agua, el agua resultante puede ser vertida en un cauce receptor si cumple con los parámetros establecidos en el Anexo I del Real Decreto 509/1996¹, en concordancia con la normativa ambiental vigente.

Tabla 1. Requisitos para los vertidos procedentes de instalaciones de tratamiento de aguas residuales urbanas.
Fuente:¹

Parámetros	Concentración	Porcentaje mínimo de reducción (1)	Método de medida de referencia
Demanda bioquímica de oxígeno (DBO 5 a 20 °C) sin nitrificación (2).	25 mg/l O ₂	70-90 40 de conformidad con el apartado 3 del artículo 5 R.D.L. (3).	Muestra homogeneizada, sin filtrar ni decantar. Determinación antes y después de cinco días de incubación a 20 °C ± 1 °C, en completa oscuridad. Aplicación de un inhibidor de la nitrificación.
Demanda química de oxígeno (DQO).	125 mg/l O ₂	75	Muestra homogeneizada, sin filtrar ni decantar. Dicromato potásico.
Total de sólidos en suspensión.	35 mg/l (4) 35 de conformidad con el apartado 3 del art. 5 R.D.L. (más de 10.000 h-e) (3). 60 de conformidad con el apartado 3 del art. 5 R.D.L. (de 2.000 a 10.000 h-e) (3).	90 (4) 90 de conformidad con el apartado 3 del art. 5 R.D.L. (más de 10.000 h-e) (3). 70 de conformidad con el apartado 3 del art. 5 R.D.L. (de 2.000 a 10.000 h-e) (3).	Filtración de una muestra representativa a través de una membrana de filtración de 0,45 micras. Secado a 105 °C y pesaje. Centrifugación de una muestra representativa (durante cinco minutos como mínimo, con una aceleración media de 2.800 a 3.200 g), secado a 105 °C y pesaje.

(1) Reducción relacionada con la carga del caudal de entrada.

(2) Este parámetro puede sustituirse por otro: carbono orgánico total (COT) o demanda total de oxígeno (DTO), si puede establecerse una correlación entre DBO 5 y el parámetro sustituto.

(3) Se refiere a los supuestos en regiones consideradas de alta montaña contemplada en el apartado 3 del artículo 5 del Real Decreto-ley 11/1995, de 28 de diciembre.

(4) Este requisito es optativo.

Los análisis de vertidos procedentes de sistemas de depuración por lagunaje se llevarán a cabo sobre muestras filtradas; no obstante, la concentración de sólidos totales en suspensión en las muestras de aguas sin filtrar no deberá superar los 150 mg/l.

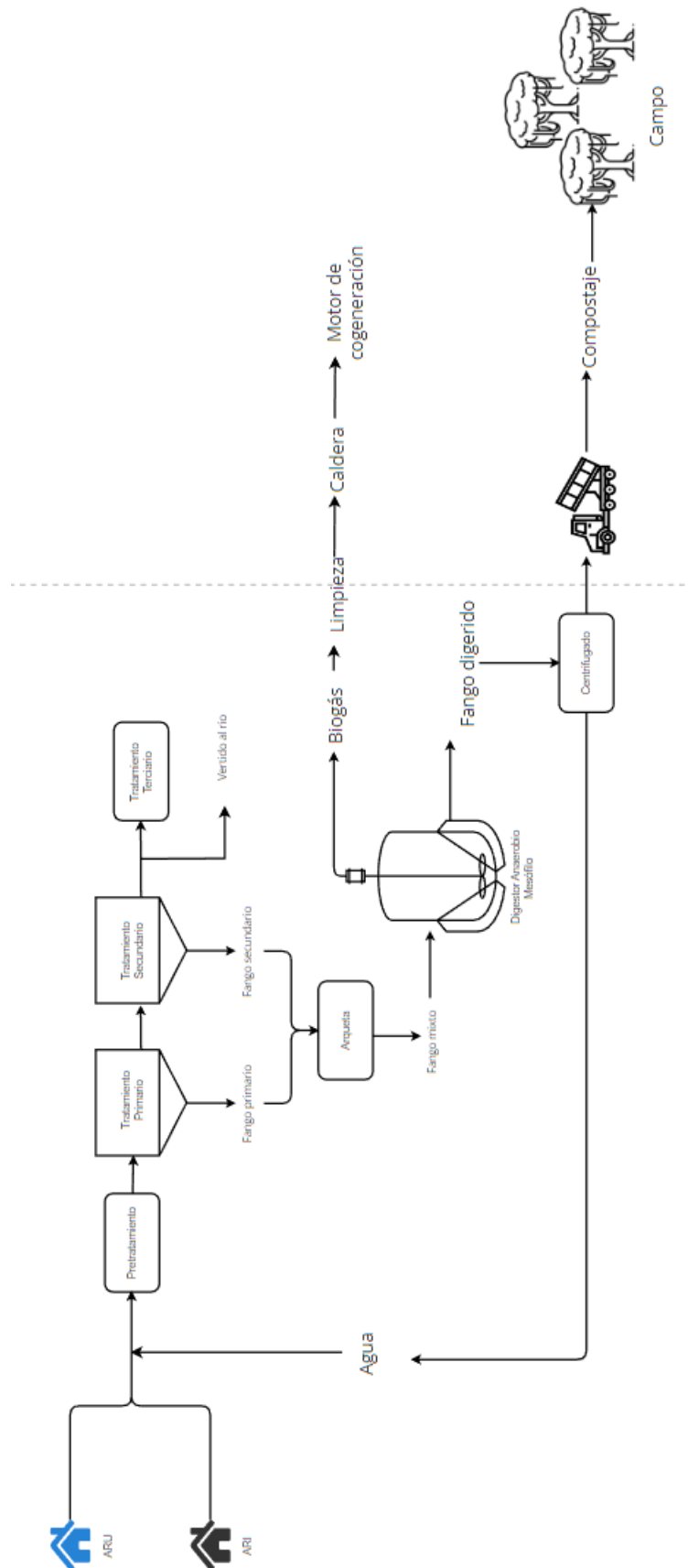


Ilustración 1. Diagrama de flujo ciclo de agua. Fuente: propia

1.2. Tratamiento de las aguas residuales

El tratamiento de aguas residuales conlleva la producción de lodos que deben purgarse con cierta frecuencia del proceso. Este tipo de lodos posee una elevada cantidad de materia orgánica, microorganismos que pueden ser patógenos o parásitos y materia contaminante que no fue removida del agua. El lodo presenta una alta capacidad de putrefacción que provoca desprendimiento de malos olores y atrae organismos que actúan como vectores de enfermedades, los más comunes son las ratas y los mosquitos. Estas características, así como la presencia de patógenos y parásitos hacen necesario el tratamiento de los lodos. Particularmente, los parásitos intestinales constituyen un riesgo a la salud pública.²

1.3. Digestión anaerobia

La digestión anaerobia, también conocida como biometanización, es un proceso biológico en ausencia de oxígeno que se basa en la degradación de carbono orgánico en ácidos orgánicos y biogás de los fangos mixtos que se obtienen de una EDAR, a su vez, se consigue rendimientos de reducción de materia volátil 40-50%. El metano (65%) es el principal componente del biogás junto con el dióxido de carbono (35%), aunque también se forman otros gases en concentraciones de menos de un 1%, como el hidrógeno, amoníaco, nitrógeno, óxidos de nitrógeno y sulfuro de hidrógeno.³

1.4. Etapas de la digestión anaerobia

La digestión anaerobia puede considerarse un ecosistema donde varios grupos de microorganismos trabajan de manera interactiva en la conversión de materia orgánica compleja en productos finales. Las etapas son las siguientes:

A. Etapa de Hidrolisis

La materia orgánica particulada tales como carbohidratos, lípidos y proteínas (polímeros orgánicos complejos) se transforman en moléculas más simples con menor número de átomos de carbono, azúcares, aminoácidos, glicerol... Esta

etapa inicial es controlada por enzimas extracelulares, generadas gracias al desarrollo de microorganismos denominados hidrolíticos.⁴

La presencia de estas moléculas simples favorece la aparición predominante de bacterias capaces de alimentarse de éstas, dichas bacterias se denominan acidogénicas.

B. Etapa acidogénica o fermentativa

Etapa controlada por bacterias acidogénicas que consiste en la transformación de las moléculas de cadena más simple en otras de peso molecular intermedio, es decir, conjunto de cuatro, cinco, seis átomos de carbono; como dióxido de carbono, amoníaco, sulfhídrico, hidrógeno...

En esta etapa se forman ácidos orgánicos de cadena relativamente larga, así como alcoholes y ácidos grasos.

Una vez transformada las moléculas orgánicas complejas en moléculas más simples y éstas en moléculas de tipo ácido, empieza a aparecer las bacterias acidogénicas.

C. Etapa acetogénica

Etapa controlada por las bacterias acetogénicas, aquellas que son capaces de transformar los ácidos y alcoholes en ácidos grasos volátiles, ácidos que presentan uno o dos átomos de carbono.

En esta etapa, las bacterias acetogénicas son responsables de la oxidación de los productos generados en la fase acidogénica en un sustrato apropiado para los microorganismos metanogénicos.⁵

Los productos generados por bacterias acetogénicas son ácido acético, hidrógeno y dióxido de carbono.

En el desarrollo de esta etapa, podría ocurrir que se acidifique el digestor debido a que durante la generación de los ácidos acético y pirónico se provoque la formación de una gran cantidad de hidrogeno. Por ello, es necesario que haya una presencia de alcalinidad que actúe como tampón y mantenga el reactor ya que, al disminuir de manera elevada el pH, evite que el proceso funcione adecuadamente.

D. Etapa metanogénica

Consiste en la transformación del ácido acético y del ácido fórmico en dióxido de carbono y metano y la formación de metano a partir de dióxido de carbono e hidrógeno.⁶

Las bacterias responsables de este proceso son anaeróbicas estrictas. Se distinguen dos tipos de microorganismos, aquellos que degradan el ácido acético a metano y dióxido de carbono (bacterias metanogénicas acetoclásticas) y otros que reducen el dióxido de carbono con hidrógeno a metano y agua (bacterias metanogénicas hidrogenófilas).⁷

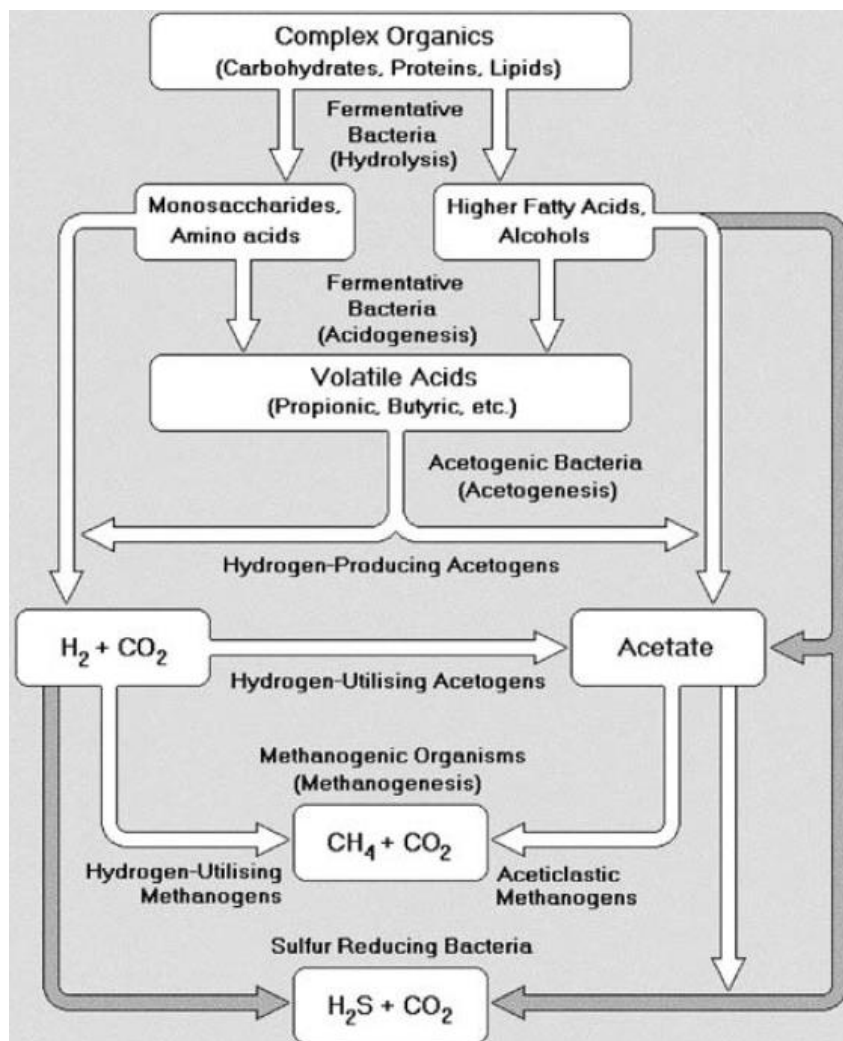


Ilustración 2. Etapas de la digestión anaerobia. Fuente: ⁸

1.5. Ventajas e inconvenientes de la digestión anaerobia

En general, la digestión anaerobia presenta una serie de ventajas que son las siguientes:

-El consumo de energía es muy bajo con el tratamiento anaerobio ya que por ejemplo no tiene que ser provisto de oxígeno.⁹

-Aplicable tanto a escala laboratorio como piloto e industrial.

-Reducción de emisiones de gases de efecto invernadero derivadas de la reducción de emisiones incontroladas de metano y dióxido de carbono.

- Producción de biogás como sustitución de fuente de energía fósil, al ser una energía renovable.¹⁰

- Autoabastecimiento en cuanto a energía térmica y eléctrica en cualquier punto del proceso, debido al elevado poder calorífico del biogás, reduciendo así los costes de electricidad y venta de la misma, en caso sobrante.

-Permite tanto la reducción de malos olores asociados a la descomposición de residuos orgánicos como la presencia de agentes patógenos.

-Cumple con los objetivos del protocolo de Kyoto, así como con los objetivos europeos de producción de energía renovable.

-El subproducto generado en este proceso presenta una gran salida hacia la agricultura como tratado de compostaje siempre que cumpla: “Digestión anaerobia termófila, a una temperatura mínima de 55°C con un tiempo de retención media de 15 días, o bien a la temperatura mínima de 53°C durante 24 horas en «batch», es decir, sin alimentación ni purgas del digester durante el método de tratamiento” según viene recogido BOJA nº156 de 13/08/2018. ⁴

- La gran ventaja de la digestión anaerobia termófila radica en la significativa reducción de patógenos que implica. Esta característica permite que esta tecnología sea aplicable en el contexto del decreto previamente citado por la Junta, que se refiere al uso agrario directo del digestato.

Por otro lado, también presenta una serie de desventajas:

- Las sustancias que inhiben son compuestos que pueden estar presentes en el residuo antes de su digestión o se pueden formar durante el proceso fermentativo anaerobio, por lo que reducen el rendimiento de la digestión e incluso pueden llegar a causar una desestabilización en el proceso.
- Inicialmente se requiere una inversión en obra civil e implantación de los equipos.
- Es un proceso muy delicado donde hay que mantener el control estricto de diversos factores.
- Generalmente se requiere un postratamiento.⁸
- Generación de espumas en el digestor.
- Escasa reducción de patógenos que presenta el fango escurrido (fango tratado en el digestor), siendo tan escasa que el fango final no se puede considerar higienizado como para ser utilizados directamente a suelos.

1.6. Digestores anaerobios

Los digestores de agitación continua se utilizan principalmente para la estabilización de lodos primarios y secundarios, provenientes de tratamientos de aguas residuales, y para el tratamiento de efluentes industriales con alta concentración de sólidos en suspensión. Por lo general, consisten en tanques circulares o en forma de huevo cubiertos de hormigón armado. Las paredes del fondo suelen estar inclinadas para favorecer la sedimentación y eliminación de los sólidos más concentrados. La cubierta del reactor puede ser fija o flotante (móvil)^d. Estos digestores generalmente trabajan a flujo discontinuo, y debido a que no se agitan, poseen cierta estratificación. Requieren de altos tiempos de retención hidráulicos y de edades del lodo.¹²

Como los digestores de agitación continua no cuentan con medios específicos para la retención de biomas en el sistema y el tiempo de retención hidráulica debe ser amplio para garantizar la vida de los microorganismos en el sistema, se han aplicado tres configuraciones principales diferentes a este digestor.

La ilustración 3 muestra de manera visual el diseño del digestor anaerobio mencionado previamente. Se incluyen detalles como la estructura del reactor,

las tuberías de alimentación, salida y recirculación, así como el sistema de agitación utilizado.

Esta representación gráfica es un valioso recurso para ilustrar y comprender mejor el diseño del digester anaerobio y facilitar el análisis de los resultados obtenidos durante el experimento realizado por los futuros técnicos ambientales del grupo TAR en el contexto de la asignatura Tecnología Ambiental.

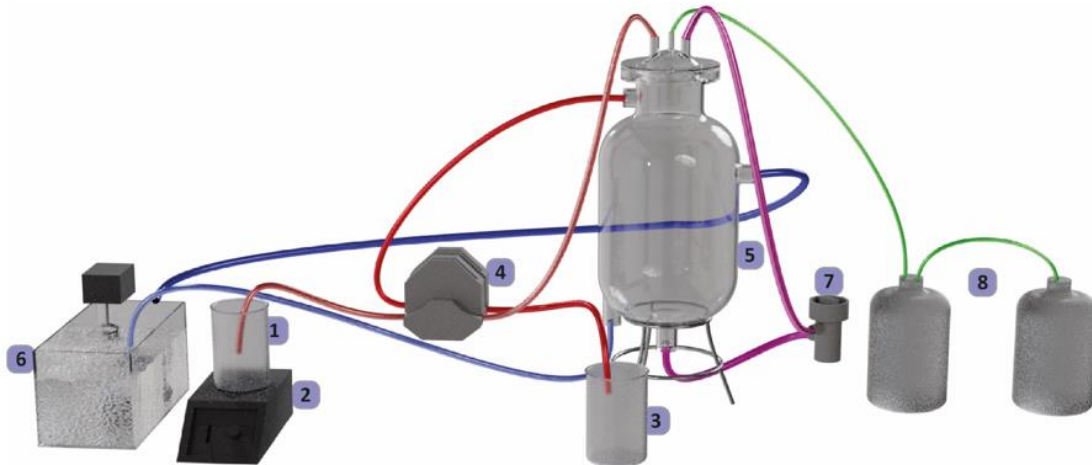


Ilustración 3. Digester anaerobio de laboratorio. Fuente: Grupo TAR

Los digestores anaeróbicos de baja velocidad son aquellos que no tienen dispositivos de mezcla y generalmente consta de un solo tanque, donde la digestión, el espesamiento del lodo y la formación del sobrenadante ocurren simultáneamente. El lodo crudo se agrega a la parte del digester donde el lodo se somete a una digestión y se libera el biogás. Con el movimiento ascendente del biogás, las partículas de lodo y otros materiales de flotación son llevados a la superficie, formando una capa de escoria. Como resultado de la digestión, el lodo se estratifica debajo de la capa de escoria y se forman cuatro zonas diferentes dentro del reactor: zona de escoria, zona sobrenadante, zona de digestión activa y zona de lodo estabilizado.⁸

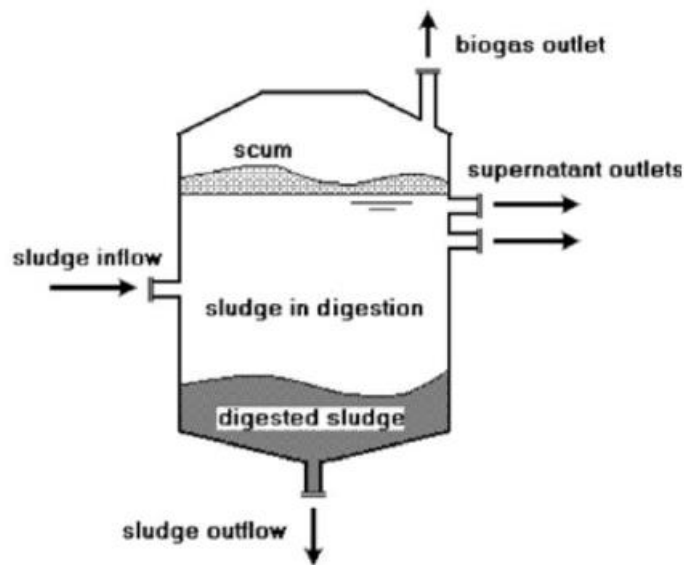


Ilustración 4. Representación esquemática de un digester anaerobio de lodos de baja velocidad. Fuente: ⁸

Los digestores de alta velocidad de una etapa incorporan mecanismos complementarios de calentamiento y mezclado, además de operar a velocidades de alimentación uniformes y con el espesamiento previo de los lodos crudos, para garantizar condiciones más uniformes en todo el digester. Como resultado, se puede reducir el volumen del tanque y se mejora la estabilidad del proceso.⁸

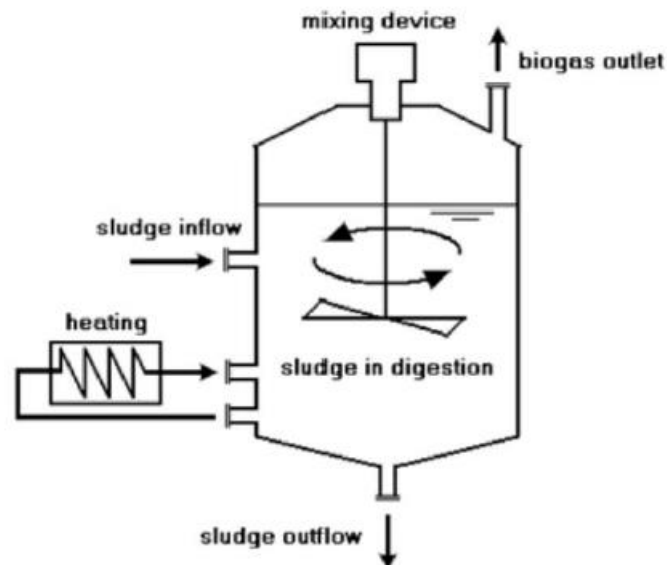


Ilustración 5. Representación esquemática de un digester anaerobio de lodos de alta velocidad de una etapa. Fuente: ⁸

Los digestores anaerobios de lodos de alta tasa y dos etapas consisten en la incorporación de un segundo tanque, que opera en serie con un digester primario

de alta velocidad. En esta configuración, el primer tanque se utiliza para la digestión de lodos y, por lo tanto, puede estar equipado con dispositivos de calentamiento y mezcla. El segundo tanque se utiliza para el almacenamiento y espesamiento del lodo digerido, dando lugar a la formación de un sobrenadante clarificado.⁸

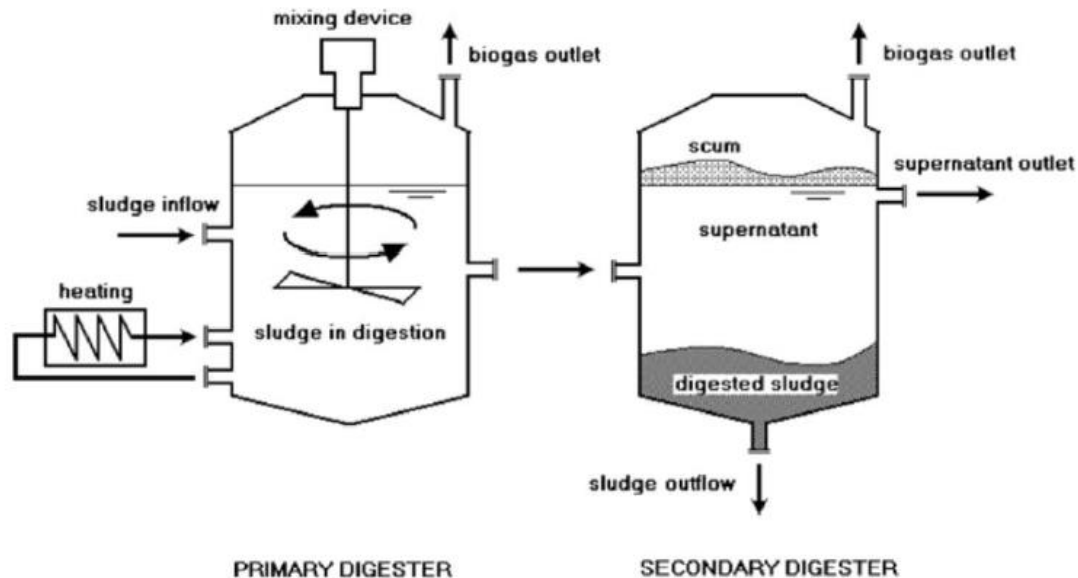


Ilustración 6. Representación esquemática de un digestor anaerobio de lodos de alta tasa y dos etapas. Fuente: ⁸

Para las aguas residuales de baja carga la tecnología más utilizada es la UASB (Upflow Anaerobic Sludge Blanket), desarrollada a partir de los años 80 para tratamientos de agua de carga elevada procedente de la industria alimentaria.¹³ El proceso anaeróbico de flujo ascendente consiste básicamente de un tanque Imhoff, “al revés”, presentando las cámaras de decantación y digestión anaeróbica super puestas.

En este digestor existen 3 zonas:

- Zona de lecho de lodos, en la cual se concentran los microorganismos que van a biodegradar el material orgánico presente en el agua residual a tratar.
- Zona donde se encuentran dispersos los microorganismos a lo largo del UASB.
- Zona de separación gas - líquido - sólido

En este proceso, el residuo que se quiere tratar se introduce por la parte inferior del reactor. El agua residual fluye en sentido ascendente a través de un manto de lodos constituido por gránulos o partículas formadas biológicamente.⁹

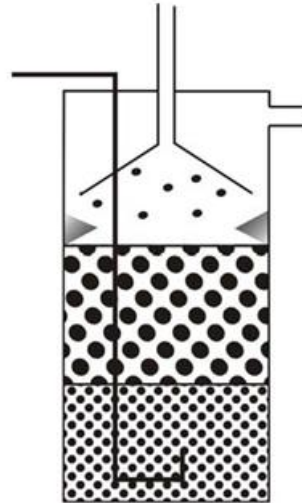


Ilustración 7. Representación esquemática de un digester UASB. Fuente:¹⁴

Los reactores IC aparecieron a final de los 80, son capaces de trabajar a elevadas cargas volumétricas y alcanzar grandes alturas. Los reactores IC pueden considerarse como dos UASB puestos uno encima del otro, de tal manera que uno (inferior) trabaja a alta carga y el otro (superior) trabaja a baja carga. El agua entra por la parte inferior (1) en un compartimiento en el que se mezcla con el fango granular, y pasa a una zona (2) en la que se elimina el 70-80% de la materia orgánica que es tratada por este reactor. El conjunto agua-fango-biogás es recogido (no separado) en una zona intermedia (3) y conducido por un colector interno (4) a un calderín (5) situado en la parte superior, en el que el biogás no tiene ningún problema en separarse de la mezcla agua-fango, y por otro colector interno (6) desciende la parte inferior del reactor donde entra el agua preacidificada, creando una recirculación interna que es lo que da nombre a este tipo de reactor IC (Internal Circulation). La mezcla de agua fango que no ha sido recogida en el punto (3), pasa directamente a una segunda fase (7) en la que se elimina el 20-30% restante de la materia orgánica que es tratada por el reactor, separándose el biogás en el punto similarmente a como sucede en los reactores UASB.¹⁵

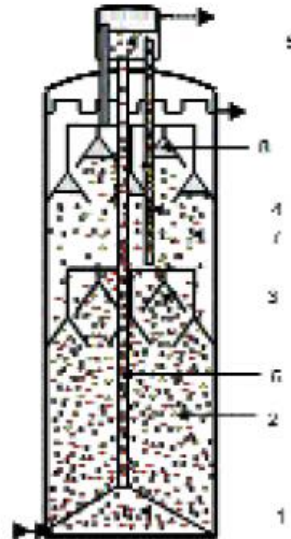


Ilustración 8. Representación esquemática de un digester IC. Fuente:¹⁵

1.7. Variables a controlar en la digestión anaerobia

En nuestro proceso de digestión anaerobia en rango mesófilo y optimización de la producción de biogás, debemos de tener un control exhaustivo de una serie de parámetros tanto físicos como químicos:

- Inóculo y fase de arranque

Para aguas industriales, que en general carecen de microorganismos adecuados, se impone la necesidad de contar con un inóculo adecuado. Además, la baja velocidad de crecimiento de los microorganismos aconseja contar con un inóculo inicial que aporte la suficiente cantidad de bacterias. El inóculo más utilizado consiste en biomasa procedente de otro digester, por su mayor abundancia se utilizan fangos procedentes de digestores anaeróbicos urbanos, residuos ganaderos o fangos de reactores anaeróbicos industriales.

El periodo de arranque del digester es muy importante. La puesta en marcha del digester del reactor requiere trabajar inicialmente con velocidades de carga orgánica moderadas y controlar constantemente los parámetros de operación, sobre todo pH y concentración de AGV. Los tiempos de arranque habituales fluctúan entre 1 y 4 meses.¹³

- Temperatura

La temperatura es un parámetro fundamental a la hora de trabajar en la digestión anaerobia, debe ser estable y no debe tener variaciones bruscas ya que esto puede provocar que el proceso se desestabilice.

El rango de temperatura más utilizado es el rango mesófilo, cuyo intervalo de temperatura oscila entre 25 y 45°C, aunque cada vez se emplea más el rango termófilo cuyo intervalo de temperatura está comprendido entre 45 y 65°C ya que consigue una mayor velocidad del proceso y eliminan más organismos patógenos.¹⁶

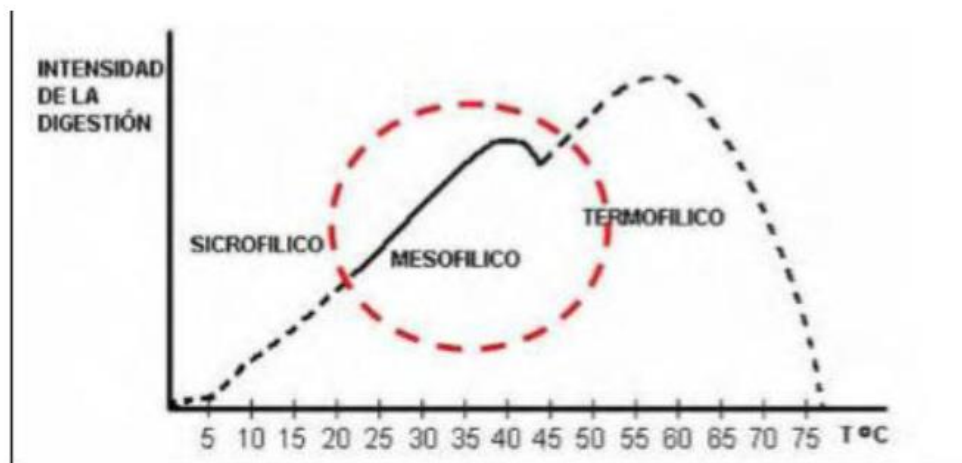


Ilustración 9. Intervalo de temperatura para rango mesófilo de la digestión anaerobia. Fuente: ¹⁷

- Tiempos de retención hidráulico (TRH)

Los tiempos de retención son indicadores de la carga del digestor. Se debe tener en cuenta el tiempo de crecimiento de las bacterias metanogénicas puede llegar a ser hasta de diez días, lo que, lógicamente nos indica que este sería el tiempo mínimo de retención que se debería de disponer en el sistema.¹³

Una disminución del TRH puede llevar a una disminución en la producción del biogás del digestor, mientras que una sobrecarga de sólidos puede llevar a la formación de espumas que puede complicar e impedir el funcionamiento del proceso.¹³

- Carga orgánica volumétrica (COV)

Es la cantidad de materia orgánica introducida diariamente en el digestor, expresada normalmente en sólidos volátiles, por unidad de volumen y tiempo.¹⁶

- Mezclado y homogenización interior

Es necesario crear un entorno homogéneo de la población bacteriana en el interior del digestor a la vez de evitar fenómenos de sedimentación o estratificación.

La agitación promueve el contacto entre el fango fresco que entra al digestor y la biomasa activa que ya se encuentra en su interior, así como puede reducir el efecto de algún tóxico entrante al distribuirlo por todo el volumen del mismo.

- Concentración de sólidos. Sólidos Volátiles

La producción de biogás es proporcional a la reducción de sólidos del sistema, por este motivo la producción de biogás se expresa en unidades de m³ de biogás producido por kg de sólido volátil destruido, situándose los valores normales de producción en el intervalo de 0,75 a 1,1 Nm³/kg.

El porcentaje de reducción de sólidos volátiles podrá oscilar entre el 35 y 50 % en función de la eficiencia de la digestión, a mayor reducción, mayor producción de biogás.¹³

- pH

En el proceso de digestión anaerobia tiene dos fases, una en la que el pH tiene tendencia a bajar, la fase de formación de ácidos, y otra en la que el pH tiende a subir, la de formación del gas metano. Para que el proceso de metanización continúe, el pH debe estar equilibrado, ya que, de no ser así, las bacterias formadoras de metano se inhiben, interrumpiendo la producción del gas, aunque no desaparecen y por tanto retomarán su acción una vez recupere el valor de pH adecuado.

El pH se debe mantener entre 6,6 y 7,5, este valor en el digestor determina la cantidad de producción de biogás y la composición de este.

Existen diferentes métodos para regular el pH en el proceso de digestión anaerobia en el caso de que fuera necesario:

-Adición de álcali (fundamentalmente cal o sosa).

Sin embargo, es crucial tener cuidado al agregar cal, ya que un exceso de iones de calcio (Ca^{++}) puede ser perjudicial. En caso de excederse, se deben tomar medidas adicionales, como detener la alimentación, reemplazar parte del agua del digestor con agua de otro digestor de la planta de tratamiento de aguas residuales que tenga una mejor alcalinidad.

-Adición de ácido (orgánico o inorgánico).

-Disminución de la carga orgánica aplicada al proceso.

-AGV.

- Alcalinidad y capacidad amortiguadora

La capacidad amortiguadora puede entenderse como la capacidad de una solución para evitar cambios en el pH. Una disolución tampón consiste en una mezcla de un ácido débil y su sal correspondiente, lo que permite agrupar los iones H^+ y OH^- y evitar tanto el aumento como la disminución del pH.¹⁸

La alcalinidad es una medida que indica la capacidad tampón del medio. En el rango de pH de 6 a 8, en el dióxido de carbono-bicarbonato es el principal equilibrio químico que controla la alcalinidad. La relación de alcalinidad se define como la relación entre la alcalinidad debida a los ácidos grasos volátiles (AGV) y la debida al bicarbonato (alcalinidad), recomendándose no superar 0,3-0,4, así no se acidificará el reactor.⁸

En el caso de un desequilibrio y para controlar el pH, ya que la tendencia del sistema es a generar ácidos, se ha de contrarrestar incrementando la alcalinidad adicionando bicarbonato. Para realizar esta adición normalmente se utilizan compuestos como la cal $\text{Ca}(\text{OH})_2$ que al entrar en contacto con el CO_2 en el interior del digestor se convierte en carbonato cálcico y agua o bien bicarbonato cálcico.¹³

- Ácidos grasos volátiles (AGV)

La concentración de AGV es uno de los parámetros que más eficazmente pueden indicar la evolución del proceso. Este parámetro es uno de los más empleados en los sistemas de control debido a su rápida respuesta ante variaciones del sistema, siempre significa una desestabilización del proceso y, como consecuencia, una disminución de la producción de biogás.

Los ácidos grasos volátiles, tal y como se describió anteriormente son un producto intermedio en el proceso de digestión, si bien, su seguimiento relacionándolo con la Alcalinidad y ambos expresados en ppm es uno de los parámetros que mejor indican el estado del proceso de digestión, tal y como se muestra en la siguiente tabla.

La interacción entre la alcalinidad y los ácidos volátiles durante la digestión anaerobia se basa en si la alcalinidad del sistema es capaz de neutralizar los ácidos formados en el proceso y amortiguar el pH en caso de acumulación de ácidos volátiles.⁸

Tabla 2. Intervalos de pH, alcalinidad y acidez total en el proceso de digestión anaerobia. Fuente: ⁸

Ratio AV/Alcalinidad	Estado del proceso
0,00	Proceso de digestión OK. pH entre 7 y 7,1
0,3 a 0,4	Necesidad de incrementar alcalinidad. pH cercano a 6
0,8	Acidificación del proceso, se inhibe la producción de metano. pH inferior a 6

- Potencial redox

El potencial redox representa el estado de oxidación-reducción en el sistema y se mide a través de la diferencia de potencial eléctrico entre un electrodo de referencia y el electrodo en el interior del digestor. Este parámetro refleja la actividad de los microorganismos anaerobios presentes en el reactor y su capacidad para realizar la descomposición de la materia orgánica.

Un control exhaustivo del potencial redox permite identificar y corregir de manera oportuna posibles desequilibrios en el digestor, optimizando así la producción de biogás y garantizando un funcionamiento eficiente del sistema.

Los valores recomendados deben ser inferiores a -350 mV .¹⁰

- Conductividad eléctrica

La conductividad es una medida de la propiedad que poseen los iones presentes en disolución acuosa para producir corriente eléctrica. La conductividad que varía en función de la temperatura está estrechamente ligada a la concentración de sustancias disueltas y a su naturaleza.

Las sales minerales (sustancias inorgánicas, ácidos, bases) son en general, buenas conductoras. Por el contrario, los compuestos orgánicos que no están disociados tienen escasa conductividad. La conductividad eléctrica de las aguas superficiales suele encontrarse en el intervalo entre 200 y $1.000 \mu\text{S cm}^{-1}$, mientras que las aguas subterráneas presentan valores algo mayores, ente 500 y $1.500 \mu\text{S cm}^{-1}$. El intervalo de conductividad para las aguas residuales urbanas oscila entre 1 y 4 mS cm^{-1} .

- Compuestos tóxicos e inhibidores

El proceso de digestión puede verse afectado por diversos compuestos que puede inhibirlo entre los que se encuentran el amoniaco, los propios ácidos volátiles, metales pesados, algunos metales ligeros a concentraciones elevadas, sulfuros y disolventes.

Las sustancias que inhiben son compuestos que pueden estar presentes en el residuo antes de su digestión o se pueden formar durante el proceso fermentativo anaerobio.

La reacción del proceso de digestión ante estas sustancias tóxicas hace que disminuya el rendimiento de la digestión e incluso pueden causar una desestabilización completa en el proceso. A niveles altos de AGV se generan problemas altos de inhibición, sobre todo cuando también existe niveles bajos de pH.

A modo de ejemplo se recogen a continuación una tabla con concentraciones límite que pueden ocasionar una bajada en el rendimiento del proceso de digestión anaerobia.

Tabla 3. Concentraciones límites de elementos químicos que producen la disminución del rendimiento de la digestión anaerobia. Fuente: ¹⁹

Elementos	Concentración en ppm
Cromo +6	110
Cromo +3	130
Cobre	40
Plomo	340
Zinc	400
Niquel	10
Calcio	8.000
Magnesio	3.000
Potasio	12.000
Sodio	8.000
Tolueno	200
Acetona	800
Benceno	200
Cianuros	0,2

1.8. Digestión anaerobia termófila

La estabilización biológica de fangos producidos en las EDAR generalmente ha sido llevada a cabo mediante la digestión anaerobia mesófila, las ventajas que este proceso posee frente a otras formas de gestión son la producción de energía en forma de metano, la reducción de materia orgánica volátil del fango entre un 30-60% y su sencillez en llevar a cabo el proceso; por otro lado, presenta algunas desventajas como se ha comentado anteriormente.

Con el fin de mejorar los inconvenientes generados en la digestión anaerobia mesófila surge la digestión anaerobia termófila. Algunas ventajas respecto a la predecesora son una mayor eficiencia de eliminación de sólidos suspendidos, menor generación de espumas, mejor separación de sólido-líquido, mayor destrucción de organismos patógenos y mejor deshidratabilidad (aunque este

último aspecto sigue generando conflictos). No obstante, no todo son mejoras, existen algunas desventajas por las cuales a día de hoy se sigue utilizando principalmente métodos mesófilos. El escurrido del proceso termófilo (efluente que tiene que ser tratado de nuevo en la línea de aguas de la depuradora) presenta una concentración elevada de amonio, materia orgánica disuelta (DQO filtrada) y ácidos grasos volátiles por lo que su inclusión en la línea de aguas puede generar problemas en la depuradora⁶. Al aplicar mayor temperatura hay un mayor gasto de energía en el propio proceso lo que puede en algunos casos atender contra el aprovechamiento energético del biogás para otros usos. Los equipos, tuberías, válvulas y accesorios en general, son más costosos cuando se trabaja con temperaturas termófilas, así como su propio mantenimiento.⁹ Además, el proceso en fase termófila se considera más inestable.

El tratamiento por digestión anaerobia termófila de los lodos de desecho representa en la actualidad, una buena opción en cuanto a remoción de patógenos y parásitos, disminución de atracción de vectores y de putrefacción, de manera que los lodos estabilizados (biosólidos) puedan utilizarse como mejoradores de suelos, de acuerdo con las recomendaciones de la Organización Mundial de la Salud (OMS).²

Las modernas técnicas de digestión aerobia termófila utilizan el carácter exotérmico de las reacciones de oxidación de la materia orgánica. Si la sequedad de los lodos es superior al 3% se puede conseguir un proceso autotérmico (procesos ATAD, según la nomenclatura inglesa correspondiente a “Autothermal Thermophilic Aerobio Digestión”) permiten destruir la mayoría de los virus y huevos de ácaros. Según algunos estudios, este proceso es capaz de eliminar microorganismos nocivos refractarios al tratamiento anaerobio.²⁰

Los rangos de temperaturas termófilas favorecen los tiempos de retención con una mayor degradación de la materia orgánica y producción de ácidos orgánicos volátiles para obtener una mayor productividad de metano.²¹

Se ha demostrado que los microorganismos termófilos presentan una actividad metabólica mayor que los microorganismos mesófilos, ésta es la principal ventaja de los tratamientos termófilos, lo que les confiere la capacidad de tratar mayores cargas orgánicas. Es obvio pensar que cuanto mayor sea la carga de

alimentación del digestor (manteniendo el rendimiento de eliminación), mayor será el caudal de biogás producido (litros/día). Los digestores termófilos comúnmente pueden trabajar a menores tiempos de retención que los mesófilos manteniendo un rendimiento de eliminación de materia orgánica similar. Por lo tanto, el hecho de eliminar más materia orgánica implica que el digestor tiene una producción de biogás superior.

En cuanto a la producción de biogás por gramos de sólido volátil eliminado, tampoco se encuentran diferencias significativas. Sin embargo, cuando se trabaja a bajos tiempo de retención hidráulico, el digestor termófilo obtiene rendimientos superiores a los obtenidos en el mesófilo. La producción de biogás en el termófilo por gramos de sólido volátil alimentado será mayor en el termófilo. Este hecho es un mero efecto del rendimiento de eliminación de sólidos volátiles.

1.9. Aprovechamiento del biogás

El aprovechamiento energético del biogás generado en la digestión anaerobia se puede lograr de varias formas, la mayoría de ellas se basa en la combustión del metano que contiene, si bien es necesario adecuar el biogás para que otros componentes minoritarios no perjudiquen a los dispositivos en los que va ser utilizado.¹³

El biogás presenta un fantástico poder calorífico, en torno a 5.000-6.000 kcal/m³. De esta forma se puede obtener energía eléctrica, generando así el propio abastecimiento de la EDAR, además de la posible venta de la energía eléctrica sobrante. Al presentar un 100% de eficiencia energética, el calor sobrante también es empleado para mantener los lodos de la EDAR a la temperatura adecuada, así como para cualquier parte del proceso que sea necesario elevar la temperatura.

Otros usos posibles para el biogás generado, ordenado de mayor a menor utilización actualmente son:

- Calderas
- Motores de combustión interna
- Turbinas

- Células de combustible
- Enriquecimiento y purificación hasta niveles de Gas Natural

-Uso del biogás en calderas: Este es el destino más sencillo, directo y por tanto el más empleado para el biogás generado en una digestión anaerobia de una EDAR. Los requisitos para utilizar el biogás en una caldera son mínimos, pudiéndose limitar a

- Eliminación de condensados, instalando recipientes de purga en los lugares bajos de la instalación de la tubería de conducción de biogás.
- Presión de alimentación del biogás superior a 0,2 bar, lo que se puede garantizar con un almacén intermedio y una rampa reguladora de presión en la entrada de la caldera.

El rendimiento estándar obtenido en una caldera está alrededor del 90%, es decir, si el PCI del biogás generado está en 5 KWh/Nm³, se obtendrán útiles en forma de energía calorífica 4.5 KWh por m³ normal de biogás quemado.

-Uso del biogás en motores de combustión interna: En este caso el biogás se utiliza, bien como único combustible, bien junto con Gas Natural, para alimentar un motor de combustión interna, que acciona un alternador que genera energía eléctrica, situándose el rendimiento de generación con biogás en una cifra comprendida entre el 36-38% frente al 40-42% que se puede alcanzar utilizando como combustible Gas Natural.

El rango de potencias eléctricas de generación está entre los 300 a los 9.000KW.

Para este uso, el pretratamiento del biogás debe ser tal que garantice:

- Contenido en H₂S < 50 ppm
- Ausencia de condensados
- Ausencia de siloxanos
- Humedad relativa no superior al 30%

-Uso del biogás en micro turbinas: En instalaciones más reducidas, en los que no se justifica por razones económicas la instalación de un motor de

cogeneración, es posible producir energía eléctrica y obtener el calor necesario para mantener la temperatura de 35°C en la digestión, utilizando micro turbinas.

El rango de potencias eléctricas de generación es bajo comparado con los rangos de motogeneradores y está entre los 30-300KW por lo que son adecuadas para las instalaciones de mediana o pequeña envergadura.

-Uso del biogás en células de combustible: Las células de combustible se obtienen, directamente de la oxidación sin combustión del combustible, la energía eléctrica y la térmica, por lo que su rendimiento es mucho mayor que el de cualquier otro sistema, con la ventaja de que no se producen los elementos colaterales asociados a una combustión (contaminación).

Los métodos de aprovechamiento energético vistos hasta ahora obtienen la energía a partir de la combustión cuya energía alimenta un elemento mecánico que a su vez acciona a un generador que produce finalmente la energía eléctrica.

-Enriquecimiento y purificación hasta niveles de Gas Natural: Esta opción abre las posibilidades a la utilización del biogás como combustible de uso general, bien distribuido a través de la misma red de distribución del GN, bien como combustibles para vehículos automóviles con motores adaptados para combustibles de gas.¹³

1.10. Marco Normativo Legal

La legislación desarrollada por la Unión Europea para proteger el medio ambiente hace un especialmente hincapié en el agua además de la aplicación directa en la agricultura del reciclaje de los lodos y así lo recoge en las siguientes Directivas.

- Directiva 91/271/CEE. Esta directiva tiene como objetivo la recogida, el tratamiento y el vertido de las aguas residuales urbanas, protegiendo así el medio acuático regulando la calidad de las aguas vertidas.²³
- La Directiva 2000/60/CE conocida como la Directiva Marco del Agua (DMA), es la ley absoluta sobre el agua. En ella se establece un marco de actuación comunitaria en el ámbito de la política del agua. Se establecen los criterios de calidad, medio ambiente, contaminación, prevención y uso

relativos al agua.²⁴ Desde su aprobación han ido surgiendo modificaciones de esta, como la Directiva 2008/105/CE modifica a DMA en las sustancias que se recogen en el Anexo X.²⁵

- La Directiva 2006/44/CE tiene como objetivo proteger y/o mejorar la calidad de las aguas continentales corrientes o estancadas en las que viven o pudieran vivir peces, si se redujera o se eliminara la contaminación, logrando niveles de calidad de las aguas superficiales que no den lugar a riesgos o efectos significativos en el medio ambiente.
- El marco general viene dado por la Directiva Europea 86/278/CEE relativa a la protección de los suelos en la utilización de lodos en la agricultura.

En el ámbito nacional, la legislación española se traspone en su mayoría de las directrices europeas al ser uno de los países miembros, lo cual esto no ocurrió hasta 1986. Hasta entonces en España la legislación referente al agua surgía de tratados internacionales como la Declaración de los Derechos Humanos o como el de Naciones Unidas, recogándose también en el artículo 10 de la Constitución de 1978.²⁷

- El Real Decreto 1/2001 es uno de los más importantes constituyendo un complemento a la Ley de Aguas en relación con los vertidos.²⁸
- El Real Decreto 817/2015 que establece como objetivo la protección de las aguas y del dominio público hidráulico que incluyen, entre otros, prevenir el deterioro, proteger y mejorar el estado de las aguas, establecer medidas específicas para reducir la contaminación por sustancias prioritarias y garantizar un buen suministro de agua suficiente en buen estado.²⁹
- El Real Decreto 11/1995 que tiene por objeto el establecimiento de las normas aplicables al tratamiento de las aguas residuales urbanas.³⁰
- Real Decreto 509/1996¹ de desarrollo del Real Decreto-ley 11/1995, de 28 de diciembre, por el que se establecen las normas aplicables al tratamiento de las aguas residuales urbanas.
- Resolución de 25 de mayo de 1998, por la que se declaran las "zonas sensibles" en las cuencas hidrográficas intercomunitarias.³¹

- Resolución de 10 de julio de 2006, por la que se declaran las Zonas Sensibles en las Cuencas Hidrográficas Intercomunitarias.³²
- Resolución de 30 de junio de 2011, por la que se declaran las zonas sensibles en las cuencas intercomunitarias.³³
- Real Decreto 1620/2007, por el que se establece el régimen jurídico de la reutilización de las aguas depuradas.³⁴
- Real Decreto 1310/1990, de 29 de octubre, por el que se regula la utilización de los lodos de depuración en el sector agrario.³⁵
- Orden AAA/1072/2013, de 7 de junio, sobre utilización de lodos de depuración en el sector agrario.³⁶

En Andalucía, los aspectos relacionados con los tratamientos a realizar a los lodos, así como los requisitos que deben cumplir las EDAR como productoras de residuos y las entidades que apliquen estos lodos en suelos agrícolas, como gestores de residuos, están recogidos en el Boletín Oficial de la Junta de Andalucía:

- Orden de 6 de agosto de 2018, conjunta de la Consejería de Agricultura, Pesca y Desarrollo Rural y de la Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio, por la que se regula la utilización de lodos tratados de depuradora en el sector agrario.⁴

Los métodos de tratamiento de los lodos están recogidos en el Anexo II de la Orden de 6 de agosto. Estos mantendrán su condición de residuo hasta su incorporación a los suelos agrícolas y como tales deberán ser manipulados y aplicados por las entidades autorizadas para ello.

2. OBJETIVOS Y ALCANCE

El objetivo principal de este Trabajo Fin de Grado es el aprendizaje, montaje y comprensión del funcionamiento de los digestores anaerobios a escala de laboratorio. Este enfoque se vincula a la práctica de la autoconstrucción, que implica construir nuestro propio digestor utilizando materiales reutilizables y reciclados, aprovechando los recursos disponibles en el entorno que se está presente, en lugar de adquirirlos a través de financiación pública. Esto conlleva menores costos en comparación con la compra directa y nos proporciona la capacidad de resolver problemas y comprender de manera futura las escalas piloto e industrial.

Este Trabajo Fin de Grado implica identificar posibles fallos o errores en el digestor y aplicar ingeniería para transformar con tus propias manos para solucionarlo. También se busca comprender cómo funciona el digestor, cómo se realiza el montaje y cómo se controlan aspectos como las entradas y salidas, fugas, sobrepresiones..., etc. A través de este proceso, se adquiere la capacidad de montar un digestor de manera efectiva y de interpretar su funcionamiento real.

Un segundo objetivo principal de este Trabajo Fin de Grado es la valorización de un residuo que consta de unos fangos primarios y secundarios, buscando la máxima eficiencia energética de una EDAR mediante la producción de biogás, generando energía eléctrica (y térmica) que pueda hacer sostenible a las líneas fango y gas. En caso de que hubiera energía sobrante, ésta podría ser puesta en venta o abastecer todo lo posible la línea de agua.

Un tercer objetivo principal de este Trabajo Fin de Grado consta en el cierre de ciclo de una EDAR, ya que el fango digerido saliente del digestor anaerobio equivale a un residuo, donde se puede realizar un proceso de deshidratación de agua y dicha agua puede ser recirculada de nuevo junto con las aguas residuales urbanas e industriales al comienzo del pretratamiento, y el resto de fango digerido puede ser vertida a campo previamente compostado y tener así una economía circular de abastecimiento eléctrico de fangos mixtos y salida de fangos digeridos y compostados hacia una agricultura ecológica.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Materiales

- Digestor anaerobio

El marco de este proyecto experimental a escala laboratorio es construir propiamente y poner en funcionamiento un sistema de digestión anaerobia, conocido como digestor anaerobio de agitación, reactor de agitación completa con sistema de recirculación que permite homogeneizar de manera continua la materia orgánica en el interior del mismo, además de evitar el proceso de sedimentación y ayudar al proceso de digestión anaerobia a que progrese de manera uniforme.

Los reactores de tanque con agitación son recipientes con un gran volumen, lo que proporciona un tiempo de residencia largo. Los reactores tipo CSTR se utilizan preferentemente en sistemas de fase líquida a presiones bajas o medias.³⁸

En la mayoría de los casos, la operación consiste en introducir los reactivos en el recipiente y aumentar la temperatura hasta el nivel deseado (mediante la camisa exterior) para que se dé la reacción. Generalmente se fija una temperatura de consigna para poder controlar la temperatura de la masa reaccionante.

El funcionamiento en discontinuo consiste en trabajar por lotes, es decir, se adiciona una alimentación compuesta por los fangos mixtos a tratar en un tiempo programado (y calculado) previamente. A su vez, la degradación bioquímica de materia orgánica y formación de biogás ocurren en el mismo tanque de digestión. Finalmente, al unísono con el tiempo de alimentación, se produce la salida del fango digerido.

PROCESOS DISCONTINUOS

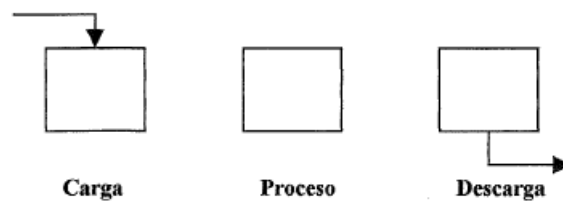


Ilustración 10. Proceso discontinuo. Fuente: ³⁹

Este digester anaerobio consta de un cuerpo central cuya forma geométrica es cilíndrica (cilindro contenedor), es construido en vidrio transparente y su capacidad volumétrica se determina de manera posterior, en el apartado de métodos.

Además, el digester presenta una camisa formada por una doble capa de vidrio, quedando una cavidad entre ambas capas por la cual circula el agua, fluido que se utiliza para controlar la temperatura en rango mesófilo. Para la entrada y salida del agua en el reactor, se emplea dos tuberías de material plástico translúcidas y flexibles unidas al digester a distintas alturas, para un correcto llenado y buena circulación del digester con el fin de calentar el propio digester.



Ilustración 11. Digester anaerobio encamisado. Fuente: propia

La agitación completa del digestor anaerobio como se ha mencionado anteriormente se consigue mediante un sistema de recirculación. Se compone de una única tubería que une la boquilla de salida del digestor situada en la parte inferior de éste (se utiliza para el vaciado del mismo una vez que sea necesario sustituir la materia orgánica digerida y comenzar de nuevo el proceso) y la cabeza del digestor.

La cabeza del digestor es una de las partes más importantes del digestor, ya que es el medio a través del cual introducimos la alimentación de fangos mixtos, se realiza el proceso de recirculación y se evacúa el biogás producido en la digestión anaerobia mesófila donde se dirige hacia el sistema de recogida de biogás.



Ilustración 12. Tapa digestor anaerobio. Fuente: propia

En la imagen anterior se puede observar las distintas boquillas:

- La boquilla central trasera de la cabeza del digestor se utiliza para introducir la alimentación.
- La boquilla izquierda de la cabeza del digestor se utiliza para el proceso de recirculación.
- La boquilla derecha se utiliza como punto de salida de biogás.
- La boquilla salida de los fangos digeridos no se sitúa en la tapa del digestor, sino en la zona inferior derecha.

Una consideración a tener en cuenta es el cierre hermético de las boquillas como se aprecia en la ilustración, para evitar la entrada de aire exterior, así como posibles pérdidas de los gases generados en el interior del digestor.

- Bombas peristálticas

Es un dispositivo mecánico diseñado para transferir fluidos de manera precisa y controlada. Estas bombas utilizan un principio de funcionamiento conocido como acción peristáltica, en cual un rotor giratorio formado por una pareja de rodillo comprime y descomprime una tubería flexible, desarrollando así el movimiento de los fangos mixtos hacia el interior del digestor y/o recipiente de salida. La principal finalidad de las bombas peristálticas es la dosificación precisa de los fangos mixtos, ya sea a baja o alta velocidad.

Para introducir el inóculo en el interior del digestor anaerobio y posteriormente la alimentación diaria, se emplean tuberías plásticas flexibles que permite la unión entre el recipiente de alimentación y el interior del reactor. Para transferir el fango mixto hasta el interior del digestor anaerobio, la tubería de alimentación se conecta a una bomba peristáltica, cuya finalidad es comprimir dicha tubería para aumentar la presión y transportar el fluido hasta el interior, ya que la alimentación se encuentra a una cota inferior a la del digestor anaerobio. Lo mismo ocurre con respecto a la tubería de salida, cuya diferencia está en el sentido, es, al contrario.

A su vez, se conecta una tercera bomba peristáltica para la tubería de recirculación, cuyo inicio comienza en la boquilla izquierda de la cabeza del digestor anaerobio, y su final se encuentra en la boquilla situada en la parte inferior del digestor anaerobio, provocando así, la agitación completa.

Una vez que el funcionamiento de las bombas peristálticas es correcto, se lleva a cabo el proceso de calibración de las bombas peristálticas de alimentación y salida

Se ha de conseguir que la cantidad de fangos mixtos alimentado al digestor anaerobio sea igual a la que expulse como fango digerido en un mismo periodo de tiempo.

Se calcula experimentalmente fijando un valor de revoluciones por minuto (rpm) en la bomba de alimentación y cronometrando la cantidad que alimenta en un

tiempo estimado de un minuto. Seguido de ello, se realiza el mismo proceso, pero modificando las rpm de la bomba de salida. Es un proceso laborioso ya que hay que realizar numerosos ensayos.

Un factor a tener en cuenta es la sobrepresión que se produce en el interior del digestor anaerobio, por lo que se debe de dejar alguna tubería plástica abierta mientras se realiza el proceso de calibrado, en este caso, la tubería de producción de biogás.

La bomba peristáltica empleada para recircular se programa de manera que se active tres horas y se desactive cuatro horas diarias. Esto es posible gracias a la ayuda de temporizadores.

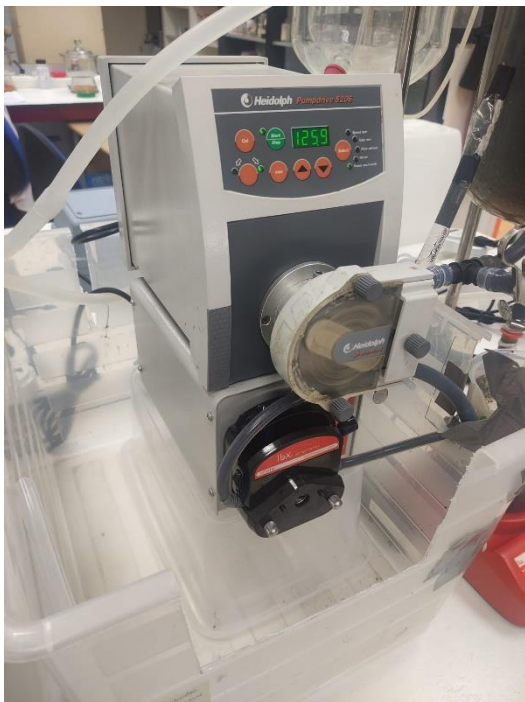


Ilustración 13. Bombas peristálticas de alimentación

Ilustración 14. Bomba peristáltica de salida. Fuente: propia

Y recirculación. Fuente: propia

- Mantenimiento y resolución de incidencias

-Antes de poner en funcionamiento el digestor anaerobio con el inóculo y los fangos mixtos, es necesario llevar a cabo un proceso de limpieza debido a su uso previo en ensayos anteriores.

La limpieza del digestor anaerobio comienza con la deposición de la tubería de alimentación en un recipiente donde se prepara una mezcla de agua y limpiador

amoniacal. Una vez que el nivel del líquido alcanza la cantidad necesaria para la recirculación, se activa la bomba peristáltica de recirculación. Es importante dejar al menos una tubería libre para evitar la acumulación de presión en el interior del digestor, siendo la tubería de producción de biogás la seleccionada para esta función.

Es suficiente repetir el proceso de limpieza cinco veces para asegurar una adecuada limpieza del digestor.

Para limpiar la camisa del digestor, se realiza un llenado en un recipiente con una mezcla de lejía y detergente, especialmente si hay rastros de aceite presentes. Una vez que la camisa se llena por completo con la mezcla, se coloca la tubería de salida del digestor en otro recipiente para expulsar y eliminar cualquier rastro o residuo presente en su interior.

- Para garantizar el correcto funcionamiento del digestor, se realiza un ensayo preliminar de la carga de entrada y salida. Durante este ensayo, se activa la bomba peristáltica de alimentación para llenar el digestor, simultáneamente se activa la bomba peristáltica de recirculación y, una vez que se alcanza el volumen deseado en el digestor, se verifica el adecuado funcionamiento de la bomba peristáltica de salida.

Este ensayo se realiza utilizando agua en lugar de fangos mixtos, ya que su manejo resulta más cómodo y permite detectar posibles errores con mayor facilidad.

Durante los ensayos con agua, se identificaron errores relacionados con la succión y expulsión de las bombas peristálticas de alimentación y salida.

Al intentar introducir el agua en el interior del digestor mediante la succión de la bomba peristáltica de alimentación desde un recipiente, se observó que, a pesar de aumentar, la succión no era lo suficientemente fuerte como para que el agua cayera adecuadamente en el interior del digestor.

El problema se localizó en la parte interna de la bomba peristáltica que está en contacto directo con la tubería, específicamente en el rotor giratorio compuesto por una pareja de rodillos que comprimen y descomprimen la tubería. Se detectó una holgura entre la pared de la bomba peristáltica y la tubería en esta área.

Para solucionar este problema, se aplicó cinta americana para generar un mayor espesor en la pared de la bomba peristáltica, eliminando así la holgura. Se siguió un enfoque similar para resolver el problema en la bomba peristáltica de salida al extraer el agua del digestor.

-Es necesario realizar un cambio semanal de las tuberías utilizadas en las bombas peristálticas del digestor anaerobio. Estas tuberías pueden sufrir dilataciones o cortes debido al uso diario de las bombas, tanto en la alimentación como en la recirculación y salida. Se debe tener en cuenta que se debe evitar el uso excesivo de elementos de unión y mantener longitudes adecuadas para las conexiones entre la cabeza del digestor y los recipientes de alimentación, salida y recirculación. A medida que aumenta la longitud de las conexiones, también aumenta la pérdida de carga en el sistema.

-En caso de generar producción de biogás inferior al valor promedio diario, se ha de comprobar el nivel de inóculo en el digestor anaerobio. Un problema común ocurre en la salida de los fangos digeridos, donde se genera un volumen superior al de alimentación. Esta diferencia provoca una disminución en el nivel de inóculo en la cabeza del digestor anaerobio y, por lo tanto, una reducción en la producción de biogás. De la misma forma se ha de controlar que la cantidad de alimentación sea igual a la de salida, ya que un sobre exceso de alimentación frente a la salida, puede provocar la expulsión de fangos por todas las boquillas presentes en la cabeza del digestor, lo que implica el fin del proceso de digestión anaerobia experimental.

-Otro factor el cual reduzca o anule la producción de biogás es la obstrucción en una de las tuberías conectadas al digestor anaerobio. Para solventar este problema, se debe verificar el funcionamiento de las bombas peristálticas y observar el flujo de los fangos a través de las tuberías. En caso de que no haya circulación o se produzca una compresión o estrechamiento en la tubería, se detiene el proceso, se colocan pinzas en la tubería en un intervalo superior e inferior a la zona obstruida, se elimina la sección obstruida y se vuelve a unir la tubería con una nueva sección del mismo tamaño. Si no se puede localizar la obstrucción en la tubería, pero se sabe en qué tubería se encuentra, se realiza una apertura en dicha tubería y se coloca una jeringuilla en la abertura para

generar presión y empujar los sólidos hacia el interior. También se puede aplicar compresión para eliminar los sólidos por la parte inferior de la tubería.

- Temporizadores

La finalidad del uso de los temporizadores en este proceso experimental es para regular los tiempos de recirculación de la bomba peristáltica, así como para controlar el encendido y apagado de las bombas peristálticas de alimentación y salida para la carga diaria de alimentación y salida de fangos mixtos y fangos mixtos digeridos, asegurando así que las acciones se realicen en el momento adecuado y orden correcto.



Ilustración 15. Programadores Digitales de Garza. Fuente: propia

Se programan temporizadores para la bomba peristáltica de alimentación, salida y recirculación, así como el agitador magnético, situado en la parte inferior del recipiente de alimentación, cuyo fin es homogeneizar el fango, previo a su alimentación del digestor anaerobio.

-El temporizador de la bomba peristáltica de alimentación y salida se programa para activarse de lunes a domingo a las 10:00 y desactivarse a las 10:01.

-El temporizador del agitador magnético se configura para activarse de lunes a domingo a las 9:30 y desactivarse a las 10:05.

-El temporizador de la bomba peristáltica de recirculación se programa para trabajar en un ciclo de tres horas de funcionamiento seguidas de cuatro horas de descanso, los siete días de la semana. Esto implica que se configuren seis alarmas diarias.

A continuación, se presenta una tabla aclaratoria que resume los horarios de activación y desactivación del temporizador mencionado anteriormente:

Tabla 4. Programación temporizador bomba peristáltica de recirculación. Fuente: propia

Programación	Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes	Sábado y Domingo
Se activa (ON)	9:30	13:30	17:30	21:30	1:30	5:30
Se desactiva (OFF)	12:30	16:30	20:30	00:30	4:30	8:30
Alarmas	1	2	3	4	5	6

- Activación del baño térmico

El baño térmico se utiliza con el fin de proporcionar y mantener una temperatura óptima para la actividad de los microorganismos encargados de degradar la materia orgánica. Para ello, se realiza el llenado del baño mediante una bomba de succión que impulsa el agua hacia la camisa del digestor anaerobio mediante tubos de material plástico. Esta bomba se encuentra ubicada dentro del baño térmico.

Una vez lleno, se activa el sistema de control de temperatura del baño térmico y se ajusta a su punto de consigna, que en este caso es de 35°C. Esto se logra gracias a las resistencias instaladas en el interior del baño, que permiten regular la temperatura del agua que circula por la camisa del digestor. Sin embargo, se observa que la temperatura en la camisa del digestor anaerobio es ligeramente

inferior a la del baño térmico. Por lo tanto, se incrementa la temperatura requerida en el interior del digestor en dos grados centígrados.

El fluido a emplear para calentar el digestor es agua, debido a su bajo costo y su eficacia en esta operación. Se conecta también una tubería de salida al baño térmico, asegurándose de que no entre en contacto con el nivel del agua, con el fin de lograr un régimen permanente y cerrar el circuito de agua de manera adecuada. Esto permite mantener una circulación continua y estable del agua caliente entre el baño térmico y la camisa del digestor.



Ilustración 16. Activación y prueba del baño térmico. Fuente: propia

- Inóculo y fangos mixtos

El inóculo que se agrega inicialmente en el interior y que ocupa una capacidad volumétrica del cilindro contenedor hasta el nivel de la cabeza del digestor anaerobio se obtiene del digestor 5 de la EDAR Copero de EMASESA, ubicado en Sevilla.

La alimentación diaria del digestor anaerobio formada por los fangos mixtos que equivale a la unión de fangos primarios y secundarios, también se extraen de la EDAR Copero de EMASESA, Sevilla.

- Filtrado de inóculo y fangos mixtos

Se lleva a cabo un proceso de filtrado tanto para el inóculo como para los fangos mixtos. El objetivo principal de este filtrado es prevenir cualquier tipo de obstrucción o bloqueo en el interior del reactor y a lo largo de las tuberías de alimentación, salida y recirculación. Esto se debe a que las tuberías utilizadas en el digester de laboratorio son estrechas, lo cual aumenta la posibilidad de que ocurran obstrucciones. Por lo tanto, se implementa el proceso de filtrado como medida preventiva para garantizar un flujo adecuado y evitar problemas operativos en el sistema.

Este proceso de filtración se realiza de forma manual, por separado, utilizando herramientas como una espátula, un filtro y un recipiente.

Para filtrar el inóculo y los fangos mixtos, se utiliza una espátula para retirar las partículas sólidas más grandes y luego se pasa el líquido a través de un filtro. El filtro utilizado está diseñado para retener las partículas no deseadas y permitir el paso del líquido filtrado, evitando así obstrucciones en el sistema.

Una vez que se completa el proceso de filtración, el líquido filtrado se almacena en recipientes de capacidad de cinco litros. Estos recipientes son etiquetados con el nombre del contenido (inóculo o fangos mixtos) y la fecha de entrega correspondiente. Posteriormente, los recipientes se depositan en una cámara frigorífica a 4°C para su posterior uso.



Ilustración 17. Almacenamiento en recipiente plástico de fangos mixtos filtrados. Fuente: propia

Esta etapa es crucial para evitar la ruptura debido a la fricción en los cabezales de las bombas peristálticas, así como para prevenir el atasco de las tuberías del circuito. Todo ello contribuye a garantizar un funcionamiento óptimo del digestor anaerobio, sin enfrentar problemas operativos.

- Sistema de recogida de biogás

Se compone de dos garrafas de 10 litros de capacidad. Se rellena una de las garrafas con agua hasta aproximadamente el 80-90% de su capacidad, asegurando dejar libre algo de espacio para el desplazamiento del biogás.

Esta primera garrafa dispone de dos tuberías flexibles de distintos tamaños, mayor y menor, que sobresalen por su parte exterior (tapón de la garrafa) la cual permite conectar con la segunda garrafa.

Se conecta la tubería procedente de la boquilla de la cabeza del digestor empleado como punto de salida de biogás con la primera tubería de menor tamaño de la garrafa que contiene agua mediante una válvula antirretorno.

La segunda tubería de mayor tamaño es introducida en la segunda garrafa completamente vacía con un diámetro de menor tamaño para que pueda escapar el gas, ya que ésta se utiliza como recipiente de almacenamiento del biogás.

La finalidad de tener una garrafa vacía y otra rellena es desplazar el agua contenida en dicha garrafa hacia la garrafa vacía. A medida que se genera el biogás, empuja el agua dentro de la garrafa llena hacia arriba, comprimiéndola y desplazándose por la tubería de menor tamaño hacia la garrafa vacía.

Al medir el volumen de agua desplazado, se obtiene la cantidad de biogás producido en ml. Esto es gracias a la densidad del agua, al ser 1 g/cm^3 , se puede realizar la medida por pesada y volumen.

Hay que asegurarse de que las conexiones sean herméticas para evitar fugas del biogás.



Ilustración 18. Gasómetro por desplazamiento de volumen. Fuente: propia

Para medir el metano, se utiliza el mismo sistema de recogida de biogás, en lugar de llenar las garrafas de agua, se llena con una solución de hidróxido de sodio (NaOH) con una concentración de 20 Normal. Esta elección se hace con el propósito de absorber el dióxido de carbono contenido en el biogás que produce el digestor anaerobio. producido por el digestor anaerobio.

El hidróxido de sodio reacciona con el dióxido de carbono presente en el biogás, formando carbonato de sodio (Na_2CO_3) y agua. Esta reacción tiene como resultado la precipitación del dióxido de carbono en forma de carbonato de sodio. Mientras el dióxido de carbono se precipita, el metano y otros gases presentes en la mezcla de biogás no reaccionan con el hidróxido de sodio y permanecen en el gasómetro.

El desplazamiento de hidróxido de sodio en el sistema es igual al volumen de metano producido. A medida que se genera el biogás, este empuja la solución de hidróxido de sodio en la garrafa hacia arriba, comprimiéndola y desplazándose por la tubería hacia la garrafa vacía, que actúa como el recipiente de almacenamiento del biogás.

Mediante la medición del volumen de hidróxido de sodio desplazado en mililitros, se obtiene la cantidad de metano que produce.

A continuación, se muestra una imagen final representativa del sistema explicado anteriormente:



Ilustración 19. Digestor anaerobio mesófilo de laboratorio. Fuente: propia

3.2. Métodos

- Temperatura

La temperatura de funcionamiento en rango mesófilo del digestor anaerobio se mide a través de un pirómetro de radiación. Se presiona el botón de medición para obtener la lectura de temperatura. El pirómetro utiliza la radiación infrarroja emitida por el propio digestor anaerobio para determinar su temperatura sin necesidad de estar en contacto físico.

Se toman múltiples mediciones en diferentes puntos del digestor anaerobio y se toma un valor promedio.

Se ha de tener en cuenta que la temperatura del baño térmico siempre ha de estar por encima de la temperatura del reactor tanque agitado, para compensar las pérdidas por conducción a través de las paredes.

- Volumen del digestor anaerobio

Para determinar el volumen del digestor anaerobio se realizan cuatro ensayos y se calcula su valor promedio. Sin embargo, hay dos consideraciones importantes a tener en cuenta.

Se ha de tener en cuenta que una parte de ese volumen corresponde al llenado de las tuberías utilizadas en la alimentación, salida y recirculación. Esto se refiere al momento en que el reactor se encuentra completamente lleno con el fluido.

Además, gracias a la selección del fluido utilizado, al tener una densidad de 1 g/cm^3 , facilita el cálculo del volumen utilizando mediciones por pesada, en lugar de medidas volumétricas.

Los pasos a seguir para determinar el volumen del digestor son los siguientes:

Inicialmente, se pesa un recipiente vacío utilizando una balanza granataria.

A continuación, se llena el recipiente con diez litros de agua y se realiza una nueva pesada. La diferencia entre el peso inicial y este nuevo peso corresponde al volumen del fluido presente en el recipiente.

Se conecta la tubería de alimentación al recipiente y se activa la bomba de alimentación para que succione el fluido del recipiente, seguido de la activación de la bomba de recirculación una vez que el fluido ingresa al interior del reactor.

Se espera hasta que la tubería de salida esté cebada, lo cual se logra cerrándola con una pinza. Esto permitirá que el nivel de agua alcance la cabeza del digestor.

Una vez que el nivel de agua alcanza la cabeza del digestor, se desactivan las bombas de alimentación y recirculación. Se realiza una nueva pesada del volumen restante en el recipiente y, restando el volumen del fluido inicialmente medido, se obtiene el volumen del digestor anaerobio.

- Volumen de entrada y salida

Al determinar el caudal diario de alimentación de fangos mixtos en el digester anaerobio, se verifica la correspondencia con el volumen asignado.

Se rellena de fangos mixtos un recipiente que presente su escala de medida, como puede ser un vaso de precipitado de 2.000 ml de capacidad.

Una vez que el digester anaerobio se alimenta, se procede a llevar el vaso de precipitado hacia un jar test, cuya finalidad en este caso es realizar una agitación mediante varillas para asegurar una distribución homogénea del fango mixto restante.

Después de la agitación, se comprueba de manera visual en la escala de medida de dicho recipiente el volumen desaparecido.

El volumen de fango digerido expulsado por el digester anaerobio se determina siguiendo el mismo procedimiento al anteriormente descrito. No obstante, se distingue por la condición inicial del recipiente, el cual se encuentra vacío al comienzo del proceso. En este caso, el volumen presente en el recipiente después de la expulsión del fango representa el volumen de salida del fango digerido.

- Producción de biogás

Para medir el biogás generado en el gasómetro por desplazamiento de volumen, se requiere un recipiente para recolectar el agua (biogás) desplazado hacia la segunda garrafa que estaba inicialmente vacía.

Previamente este recipiente se debe pesar en una balanza granataria para obtener su masa inicial.

A continuación, se transfiere el agua procedente de la garrafa vacía hacia el recipiente y se vuelve a realizar la pesada de éste. La diferencia entre el valor final y el valor inicial representa el biogás recolectado.

Una vez que se finalice el proceso de medida de biogás, el agua se vierte nuevamente en la garrafa que debe de contener el 80-90% de su capacidad. Además, se deben asegurar la unión de las tuberías en su estado inicial para que sea posible repetir el procedimiento.

Al concluir estas medidas, los valores obtenidos se registran en un documento designado para el seguimiento diario de las variables a controlar. Estos registros garantizan una valiosa información como datos experimentales para su posterior análisis y evaluación.

A continuación, se presentan de manera concisa las técnicas analíticas empleadas para el análisis de los procesos en cuestión.

Se ha identificado anteriormente cada uno de los factores que se consideran variables a controlar para el seguimiento y control del proceso. Estos factores son fundamentales para evaluar el rendimiento y la calidad del proceso.

Algunas de las técnicas comúnmente empleadas son:

- Determinación de pH

La determinación electrométrica del pH se basa en la medida de la actividad de los iones de H^+ por mediciones potenciométricas utilizando, un electrodo indicador de vidrio y tampones de pH 4 y 7.

Un pH elevado indica una baja concentración de iones H^+ , y por tanto un medio alcalino. Por el contrario, un pH bajo indica la acidificación del medio. Dado que los principales microorganismos involucrados en este proceso trabajan de forma óptima en un rango de pH de 7-8, éste debe mantenerse cercano a la neutralidad.



Ilustración 20. pH-metro CRISON GLP 21+. Fuente: propia

Se ha utilizado un pH-metro CRISON GLP 21+ que contiene una sonda portátil CRISON (5200T), el calibrado se realiza diariamente con dos tampones.

- Determinación de la Conductividad Eléctrica

La conductividad eléctrica se determina utilizando un equipo multiparamétrico Eutech, modelo PCD 650, con sonda de cuatro células en vidrio-platino, que permite tomar medidas de la conductividad, resistividad, salinidad y sólidos disueltos totales.

Presenta una precisión de $\pm 0,08 \text{ mS cm}^{-1}$.

Los resultados se expresan como mS cm^{-1} .

La calibración de este electrodo se realiza diariamente con un patrón.

- Sólidos Totales (ST): Sólidos totales Fijos (STF) Y Sólidos totales Volátiles (STV).

Con la medida de los sólidos totales fijos y volátiles, es posible determinar la cantidad de materia sólida inerte y la cantidad de materia orgánica o biomasa existente en la muestra.

Equipos necesarios: Balanza analítica, estufa y mufla.

Material: Cápsula, espátula y pipeta aforada.

Previamente, se debe preparar la cápsula donde se va a proceder al análisis de la muestra. Si en la medición se pretende analizar SV, se debe incinerar la capsula a $550 \pm 50^\circ\text{C}$ durante al menos 1 hora en una mufla. Si, por lo contrario, solamente se pretende hacer el análisis de los ST, se debe calentar la cápsula a $103\text{-}105^\circ\text{C}$ durante al menos 1 hora en una estufa. Después de preparar la cápsula, se debe conservar en un desecador y pesar inmediatamente antes de usar. Primero se realizan los sólidos totales y después de pesarlo, se llevan a la mufla y se obtienen así los volátiles.

Para realizar el análisis de los Sólidos totales se vierten 25 mililitros en una cápsula, la cual se ha pesado con antelación. Posteriormente, se introduce en la estufa durante 24 horas. Transcurridas las 24 horas, se debe dejar en el desecador hasta peso constante.

Para determinar los sólidos volátiles, la misma muestra con la que se han determinado los sólidos totales se introduce en la mufla a 550 °C durante 20 minutos. Se lleva la cápsula o crisol a desecador hasta peso contante.

$$ST = \frac{(B - A)}{V * 1000}$$

Ecuación 1. Cálculo de Sólidos Totales

$$SV = \frac{(B - C)}{V * 1000}$$

Ecuación 2. Cálculo de Sólidos Volátiles

Siendo:

ST: Sólidos totales (g.L⁻¹).

SV: Sólidos volátiles (g.L⁻¹).

A: Tara de la cápsula vacía (g).

B: Peso de cápsula + muestra tras 24 horas a 105 °C.

C: Peso de cápsula + muestra tras 20 minutos a 550 °C.

V: Volumen de muestra (L).

- Determinación de la Demanda Química de Oxígeno

La DQO se determina titulométricamente por la oxidación con dicromato potásico, según el método de reflujo cerrado.

Se realiza la dilución de la muestra y se procede a tomar 5 mililitros, introduciéndolo en un tubo de ensayo, a continuación, se añaden 3 ml de disolución de digestión de dicromato potásico 0,066 N y 7 ml de reactivo ácido sulfúrico de plata (catalizador) de forma que se cree una capa de ácido debajo de la disolución de digestión de la muestra.

Se debe tener mucho cuidado ya que se produce una reacción fuertemente exotérmica, por lo que el tubo se calienta al añadir los reactivos.

Colocar los tubos en el termoreactor, previamente calentado, a 150 °C y mantener la digestión durante 2 horas.

Una vez transcurridas las dos horas, se enfría a temperatura ambiente. Una vez enfriadas las muestras, se procederá a su valoración y para ello, se abre el tubo, se añaden tres gotas de indicador de ferroína, un imán de agitación y se valora con una disolución sulfato de hierro y amonio (sal de Möhr, 0,025 N). El punto final de la valoración se observa con un marcado cambio de color de azul verdoso a marrón rojizo, aunque el azul verdoso puede volver a aparecer pasados unos minutos.

La disolución sal de Möhr debe ser estandarizada a diario frente a una disolución patrón de dicromato potásico de la siguiente forma: tomar 5 mL de agua destilada en un tubo de ensayo, añadiéndose los reactivos en las cantidades especificadas anteriormente.

El volumen obtenido en la valoración con la sal de Möhr se introduce en la siguiente fórmula para calcular el dato de DQO. Se expresan en mg de O₂, necesarios para oxidar un litro de muestra (mgL⁻¹).

$$DQO \text{ en } mg \text{ O}_2 = \frac{((A - B) * M * 8000 * Fd)}{mL \text{ muestra}}$$

Ecuación 3. Cálculo de la DQO en mg O₂

Donde,

A: Volumen de sal de Möhr utilizados para el Blanco

B: Volumen de sal de Möhr obtenido en la valoración de la muestra

M: La molaridad de la sal de Möhr

8000: La constante de equivalencia

mL de muestra: Volumen de muestra analizada.

Fd: Factor de dilución

A continuación, se muestran los pasos descritos anteriormente de manera esquemática:

Procedimiento

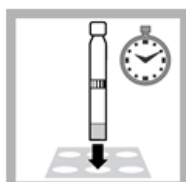


1.- Invertir para que el sedimento quede en suspensión

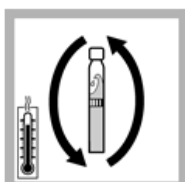
2.- Pipetear cuidadosamente 0,5 ml de muestra

3.- Tapar la cubeta, limpiar bien el exterior de la cubeta

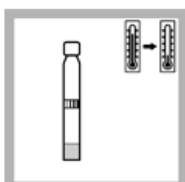
4.- Invertir



5.- Calentar en el termostato. DQO clásica durante 2 horas a 148 °C



6.- Retirar la cubeta caliente. DQO clásica: invertir cuidadosamente 2 veces



7.- Dejar enfriar a temperatura ambiente. DQO clásica: en la gradilla de enfriamiento



8.- Limpiar bien el exterior de la cubeta y evaluar. Nota: El sedimento debe estar completamente asentado.



9.- Colocar la cubeta en el soporte portacubetas. Ir a métodos LCK/TNT plus, Seleccionar el test, pulsar MEDICIÓN.

Ilustración 21. Esquema representativo de los algoritmos a realizar en la determinación de DQO. Fuente: ⁴⁰

- Determinación de Alcalinidad Total para fangos

Reactivos.

- HCl 0.1N, patrón secundario no estandarizado, medir 8.3 ml de HCl, PA, en pipeta graduada y llevar a 1000 ml de agua desionizada.
- Na₂CO₃ 0.1N, patrón primario,
- Secar cerca de 6 g Na₂CO₃ en estufa 3 horas, llevar a desecador 30 minutos y pesar en balanza analítica 5,3 g y llevar a un matraz aforado de 1000 ml.

- HCl 0.01N, patrón secundario no estandarizado, Tomar una alícuota de 100ml de 0.1 N HCl y llevar a un matraz aforado de 1000 ml.
- Na₂CO₃ 0.01N, patrón primario,
- Tomar una alícuota de 100ml de 0.1 N Na₂CO₃ y llevar a un matraz aforado de 1000 ml.

Fase 1. Estandarización. Se hace una vez por semana

Pipetear 10 ml con pipeta aforada y llevar a un erlenmeyer, titular con HCl 0.01 N hasta pH4. Ver ml gastados de HCl 0.01N.

$N \cdot V = N'' \cdot V''$ $N = (N'' \cdot V'') / V$ donde:

N=normalidad de HCl

V= ml gastados de HCl

N''=Normalidad de Na₂CO₃

V''= ml de Na₂CO₃

Fase 2: Muestra.

Tomar 25 ml de muestra en matraz aforado, centrifugar durante 10 minutos a 5000 rpm.

Se recoge el líquido sobrenadante en un erlenmeyer y el residuo sólido se le añaden 50 ml de agua desionizada y se vuelve a centrifugar 10 minutos a 50 rpm, recoger el sobrenadante en el erlenmeyer anterior y al sólido añadir 25 ml de agua desionizada centrifugar 10 minutos a 5000 rpm, y el sobrenadante verterlo al erlenmeyer.

Agitar en un agitador magnético el erlenmeyer para homogenizar la muestra. Se sumerge el electrodo de pH y se valora con HCl 0.01 N hasta pH=4. Anotar el volumen gastado de HCl 0.01N.

$$\text{Alcalinidad Total} = \frac{V_1(\text{ml HCl}) \cdot 0.1 \cdot 50 \cdot 1000}{\text{volumen de muestra (ml)}} = \text{mg/l de CaCO}_3$$

Ecuación 4. Cálculo Alcalinidad Total

- Determinación de Acidez Total

Reactivos.

- NaOH 0.01N, patrón secundario no estandarizado, pesar 0.4 g de NaOH, y llevar a 1000 ml de agua desionizada.
- Ftalato ácido de potasio 0.005N, patrón primario.
- Secar cerca de 15 g de ftalto en estufa 3 horas, llevar a desecador 30 minutos y pesar en balanza analítica 10.2115 g y llevar a un matraz aforado de 1000 ml, este es de 0.05N, por lo tanto vamos a coger 100 ml de 0.05N y los llevamos a un matraz aforado de 1000 ml.

Fase 1. Estandarización. Se hace una vez por semana

Pipetear 50 ml con pipeta aforada y llevar a un erlenmeyer, titular con NaOH 0.01 N hasta pH 8.3. Ver ml gastados de NaOH 0.01N.

$N \cdot V = N'' \cdot V''$ $N = (N'' \cdot V'') / V$ donde:

N=normalidad de NaOH

V= ml gastados de NaOH

N''=Normalidad de ftalato 0.005N

V''= ml de ftalato

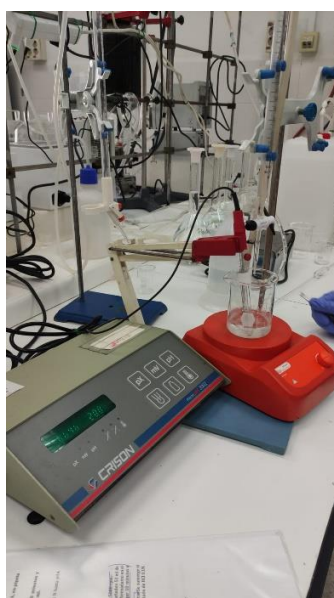


Ilustración 22. Fase 1. Estandarización semanal. Fuente: propia

Fase 2: Muestra.

Después de hacer la alcalinidad, continuar acidificando con HCl hasta pH 3.5.

Llevar a una placa calefactora y dejarla hervir 3 minutos después de comenzar la ebullición constante. Enfriar la muestra.

Llevar el líquido enfriado al agitador magnético y sumergir el electrodo de pH. Añadir NaOH 0.01N hasta pH4. Continuar valorando hasta pH7. Anotar el volumen de base consumido como V_2 .

$$\text{Acidez Volátil soluble} = \frac{V_2(\text{ml NaOH}) * 0.01 * 60 * 1000}{\text{Volumen de la muestra (ml)}} = \text{mg/L de CH}_3\text{COOH}$$

Ecuación 5. Cálculo de Acidez Volátil soluble expresado en mg/L CH₃COOH

$$\text{Acidez Volátil soluble} = \frac{V_2(\text{ml NaOH}) * 0.01 * 50 * 1000}{\text{Volumen de la muestra (ml)}} = \text{mg/L de CaCO}_3$$

Ecuación 6. Cálculo de Acidez Volátil soluble expresado en mg/L CaCO₃

La acidez volátil soluble se expresa en mg /L de CaCO₃ cuando es necesario calcular la relación Ácidos Volátiles/Alcalinidad para obtener así un n° adimensional.

Si Ácidos Volátiles solubles/Alcalinidad Total, es menor a 0.4, las bacterias metanogénicas del digestor están en condiciones óptimas para la producción del Metano.

- Determinación de Fósforo Total

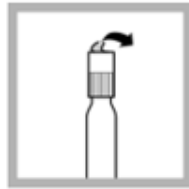
Instrucciones para la evaluación de Fósforo con el pack Hach-Lange LCK 350 (2-20 mg/l PO₄-P ortofosfatos y 6-60 mg/L PO₄ fósforo total):

- Quitar el cierre de seguridad del tapón del tubo
- Desenroscar el tapón de la cubeta
- Pipetear 0,4 ml de la muestra a analizar
- Agitar y homogenizar.
- Calentar en el termostato 30 min a 120 °C
- Dejar enfriar y pipetear 0,5 ml de la solución B.

-Poner el tapón DosiCap C gris en la cubeta, agitar y dejar en reposo 10 min

-Evaluar en el espectrofotómetro DR3900 de Hach.

Procedimiento



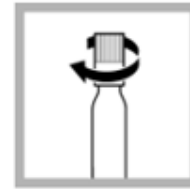
1. Retirar con sumo cuidado el precinto de papel de aluminio del DosiCap Zip enroscado.



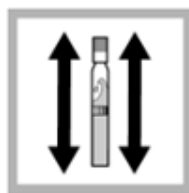
2. Desenroscar el DosiCap Zip.



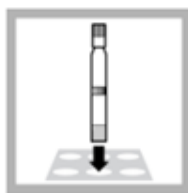
3. Pipetear cuidadosamente 0.4 ml de muestra.



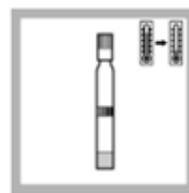
4. Inmediatamente roscar el DosiCap Zip fuertemente; con el lado estriado hacia arriba.



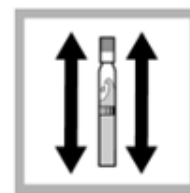
5. Agitar enérgicamente.



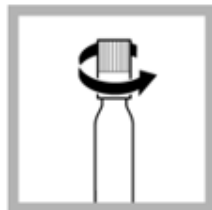
6. Calentar en el termostato.
Termostato LT200:
30 minutos a 120 °C



7. Dejar enfriar a temperatura ambiente.
NOTA: Verifique si la tapa está todavía apretada tras el enfriamiento.



8. Agitar enérgicamente.



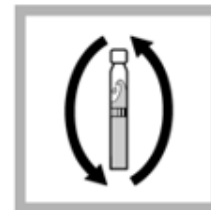
9. Desenroscar el DosiCap Zip.



10. Pipetear en la cubeta enfriada: 0.5 ml de reactivo B. Cerrar el reactivo B después del uso.



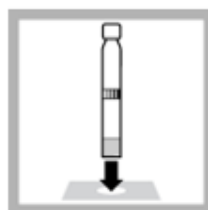
11. Roscar un DosiCap C de color gris sobre la cubeta.



12. Invertir varias veces hasta que el liofilizado se haya eliminado totalmente.



13. Después de 10 minutos, invertir la cubeta varias veces, limpiar bien el exterior y evaluar.



14. Coloque la cubeta en el portacubetas.
DR1900: Ir a métodos LCK/TNTplus. Seleccione la prueba y pulse MEDICIÓN.

Ilustración 23. Esquema representativo de los algoritmos a realizar en la determinación de fósforo. Fuente: ⁴¹

Al concluir estas las técnicas analíticas empleadas para el análisis del proceso de digestión anaerobio, los valores obtenidos se registran en un documento designado para el seguimiento semanal de las variables a controlar. posterior análisis y evaluación.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para este proyecto, se lleva a cabo una serie de ensayos experimentales para analizar las variables a controlar, así como emplear técnicas analíticas durante un periodo de 7 semanas. El objetivo principal de estos ensayos es verificar el funcionamiento correcto del digestor anaerobio.

- Volumen del digestor anaerobio

Para determinar el volumen del digestor anaerobio se realizan cuatro ensayos y se calcula su valor promedio. El volumen resultante es de 7,6 L de capacidad

- Tiempo de retención hidráulico

En este proceso, se ha operado con un tiempo de retención hidráulico (TRH) de 20 días. La selección de un TRH de 20 días se basa en la necesidad de proporcionar un período adecuado para la degradación biológica de los compuestos orgánicos presentes en los fangos mixtos.

Si hubiese sido preciso acortar este tiempo, se hubiera incrementado el grado de agitación interna del digestor, además, se habría optimizado el sistema de calentamiento y se habrían gestionado los gradientes internos de temperatura que pudieran existir.

- Volumen de alimentación y Carga Orgánica Volumétrica

Semana	Carga Volumétrica afluente DQO (g/L * día)
Semana 1	1,90
Semana 2	1,90
Semana 3	1,91
Semana 4	1,89
Semana 5	1,46
Semana 6	1,47
Semana 7	1,76

Tabla 5. Resultados de C.O.V. de alimentación. Fuente: propia

El cálculo del volumen de alimentación en el digestor anaerobio de fangos mixtos, medido durante un período de investigación de 7 semanas, resulta en un valor invariable a lo largo del tiempo de 0,375 L/día. Esta cifra se determina para mantener una carga orgánica volumétrica adecuada en el sistema, evitando así posibles sobrecargas o déficits que puedan afectar negativamente el rendimiento del tratamiento. Se establece un flujo constante de alimentación que asegura la disponibilidad óptima de sustratos orgánicos para los microorganismos anaerobios presentes en el digestor.

En cuanto al seguimiento de la carga orgánica de alimentación, durante las primeras 4 semanas, se observa que los valores de carga orgánica volumétrica se mantienen constantes.

No obstante, en las semanas 5 y 6, se evidencia una reducción significativa en los valores de carga orgánica volumétrica, alcanzando 1,46 y 1,76 g/L día. Esta disminución se relaciona con la reducción en la Demanda Química de Oxígeno del afluente durante esas mismas semanas, reduciéndose de 38 a 30 mg/L, como se muestran en la tabla 8 más adelante. La DQO es un indicador de la cantidad de materia orgánica presente en los fangos mixtos, y su descenso indica una menor concentración de materia orgánica que entra al digestor anaerobio.

En contraste, en la última semana del estudio, la carga orgánica volumétrica vuelve a aumentar y recupera su valor promedio, esto debido al aumento en la DQO del afluente, que se incrementa a 36 mg/L como se vuelve apreciar en la tabla 8.

La disminución en la DQO del afluente durante las semanas 5 y 6 se atribuye a la incorporación de nuevos fangos mixtos en el sistema durante esas semanas, lo cual genera una falta de estabilidad con los fangos mixtos utilizados en semanas anteriores.

Esta disminución puede deberse a variaciones en la calidad del sustrato orgánico que se introduce en el digestor anaerobio, el cual es diferente con el que se trabaja las 4 primeras semanas.

Estas fluctuaciones también afectan los valores de los sólidos totales y volátiles en el sistema, lo que sugiere cambios en la composición del sustrato orgánico que ingresa al digestor.

Mantener una carga orgánica volumétrica adecuada es esencial para el funcionamiento eficiente del proceso de digestión anaerobia. Una carga excesiva puede resultar en la acumulación de sustratos no degradados, lo que puede generar problemas como la acidificación o la inhibición de la actividad microbiana. Por otro lado, una carga insuficiente puede limitar la producción de biogás y disminuir la eficiencia del tratamiento.

- Temperatura

Tabla 6. Resultados de Temperatura. Fuente: propia

Semana	Temperatura (°C)
Semana 1	35
Semana 2	35
Semana 3	35
Semana 4	35
Semana 5	35
Semana 6	35
Semana 7	35

Se observa que se mantiene una temperatura constante de 35°C en el reactor tanque agitado, lo cual es altamente beneficioso para lograr un funcionamiento óptimo y un rendimiento satisfactorio. Al mantenerse en el rango mesófilo de temperatura, se logra alcanzar el valor de consigna para el correcto desarrollo de los procesos biológicos en el digestor anaerobio. Este rango de temperatura favorece la actividad microbiana y las reacciones bioquímicas asociadas, lo que contribuye a una mayor eficiencia en la digestión de la materia orgánica y la generación de productos deseados.

- Producción de biogás

Tabla 7. Resultados de Producción de biogás generado. Fuente: propia.

Semana	Volumen de biogás experimental (NL/día)
Semana 1	2,1
Semana 2	1,9
Semana 3	2,5
Semana 4	2,2
Semana 5	1,8
Semana 6	1,7
Semana 7	1,9

El nivel promedio de producción semanal de biogás obtenido es de 2,01 L/día, lo cual indica un funcionamiento satisfactorio del digestor anaerobio. Este valor se correlaciona de manera proporcional con la cantidad de Demanda Química de Oxígeno (DQO) eliminada, lo que indica una eficiente conversión de la materia orgánica presente en el sistema. Durante las 7 semanas de seguimiento, no se han detectado fugas ni pérdidas significativas en el digestor anaerobio, lo que confirma la integridad del sistema.

Aunque cabe resaltar como se ha explicado antes, que durante las semanas 5 y 6 se produce una ligera disminución en la producción de biogás. Esta reducción en la producción de biogás se correlaciona directamente con una disminución en la carga orgánica volumétrica alimentada al digestor anaerobio.

El motivo detrás de esta disminución en la carga orgánica volumétrica se encuentra en la concentración de DQO presente en el afluente. Durante las semanas mencionadas, la DQO afluente se ha reducido de 38 a 30 mg/L, lo que indica una menor cantidad de materia orgánica introducida al sistema.

Es importante destacar que la producción de biogás está directamente relacionada con la cantidad y calidad del sustrato orgánico disponible para la actividad de los microorganismos en el digestor anaerobio. Al disminuir la carga orgánica volumétrica, la disponibilidad de "comida" para los microorganismos

también se reduce, lo que se traduce en una disminución lineal en la producción de biogás.

Sin embargo, en la última semana del periodo de estudio, la carga orgánica volumétrica vuelve a aumentar, debido al incremento en la DQO afluente, lo que restablece la producción de biogás a su valor promedio.

Es fundamental tener en cuenta estas relaciones entre la carga orgánica volumétrica, la DQO afluente y la producción de biogás para optimizar el rendimiento del digester anaerobio y lograr una operación estable y eficiente del proceso de digestión anaerobia mesófila.

El Gráfico 1 muestra la evolución del biogás producido a lo largo del tiempo durante el período de 7 semanas. Esta representación visual permite observar de manera clara y concisa la tendencia y variaciones en la producción de biogás.

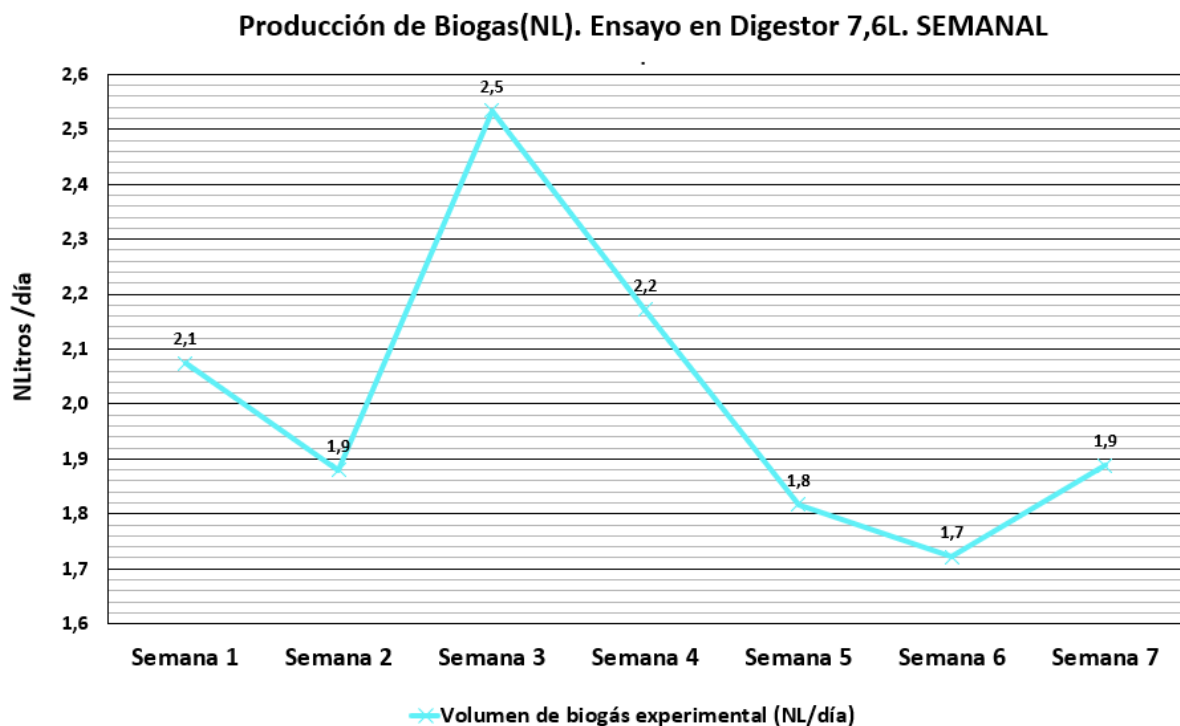


Gráfico 1. Volumen de biogás experimental. Fuente: propia

- Determinación de la Demanda Química de Oxígeno

Tabla 8. Resultados de Demanda Química de Oxígeno. Fuente: propia

Semana	DQO afluente (mg/L)	DQO efluente (mg/L)	% DQO eliminada
Semana 1	38.523	22.600	41
Semana 2	38.451	21.291	45
Semana 3	38.635	20.527	47
Semana 4	38.351	20.464	47
Semana 5	29.684	18.169	39
Semana 6	29.818	17.189	42
Semana 7	35.711	18.397	48

A la vista de los resultados se puede ver en qué medida se ha eliminado la materia orgánica medidos en términos de DQO. Como se puede comprobar, los valores obtenidos reflejan una satisfactoria eliminación de materia orgánica, con un promedio de 44,14% y alcanzando valores máximos de hasta un 48 % de eliminación de materia orgánica, viéndose resentido el digester únicamente en las semanas 5 y 6 debido a esa menor cantidad de DQO en el afluente y, por tanto, menor %DQO eliminada.

El porcentaje de DQO eliminada es un indicador directo del rendimiento del digester anaerobio en términos de su capacidad para descomponer y eliminar la materia orgánica presente en el afluente.

Es importante señalar que estas cifras demuestran un rendimiento favorable del digester anaerobio en el proceso de eliminación de materia orgánica.

En el análisis de los datos correspondientes a la DQO afluente en las semanas 5 y 6, se aprecia en la tabla 8 su tendencia descendente, con un valor mínimo de 29,684 mg/L en comparación con el valor máximo de las semanas anteriores de 38,635 mg/L. Esta disminución significativa en la DQO afluente afecta de manera negativa tanto a la producción de biogás como a la carga orgánica volumétrica como se ha descrito anteriormente.

El Gráfico 2 muestra la evolución tanto del porcentaje de DQO eliminado como de la producción de biogás a lo largo del tiempo. Este gráfico proporciona una representación visual de la eficiencia en la remoción de materia orgánica, así como de la producción de biogás, lo cual es un indicador clave para evaluar el desempeño del sistema.

Se visualiza una estabilidad absoluta en el funcionamiento del digestor anaerobio operando en condiciones mesófilas. El proceso de digestión anaerobia mesófila se encuentra totalmente estable, ya que la cantidad de biogás producido corresponde con el porcentaje de DQO eliminada.

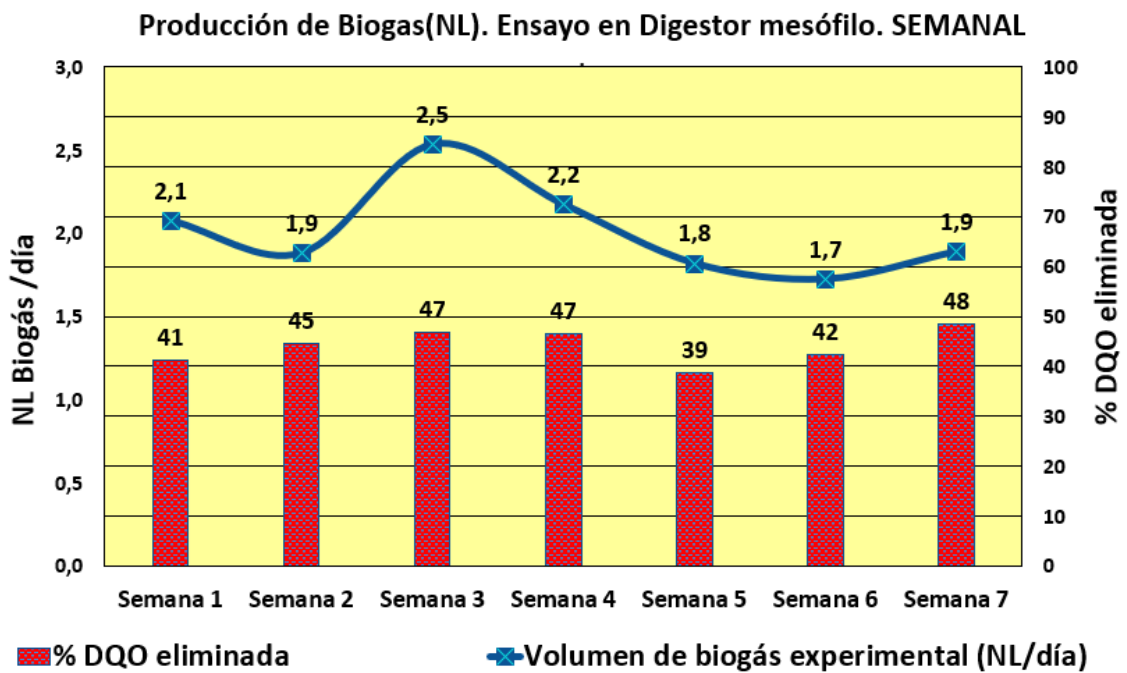


Gráfico 2. %DQO eliminada VS Producción de biogás. Fuente: propia

- Determinación de pH

Tabla 9. Resultados en el afluente y efluente de pH. Fuente: propia

Semana	pH afluente	pH efluente
Semana 1	7,03	7,58
Semana 2	7,14	7,58
Semana 3	6,93	7,57
Semana 4	7,13	7,83
Semana 5	7,15	7,73
Semana 6	6,89	8,08
Semana 7	6,40	7,73

El pH que se registra en la entrada de fangos mixtos hacia el digester anaerobio exhibe una tendencia a ser inferior al pH medido en la salida del fango digerido debido a los procesos bioquímicos inherentes a la digestión anaerobia.

En la etapa inicial de dicho proceso, los fangos mixtos ingresan al digester con una concentración relativamente alta de ácidos orgánicos de cadena corta, como ácido acético, ácido propiónico y ácido butírico, generados durante la etapa acidogénica. Estos ácidos contribuyen a la acidificación del medio y, consecuentemente, a la disminución del pH.

A medida que avanza la digestión anaerobia y se establecen las condiciones óptimas, los microorganismos metanogénicos comienzan a convertir los ácidos orgánicos en metano y dióxido de carbono. Este proceso de producción de metano implica una neutralización, ya que consume protones, lo que resulta en un aumento del pH.

En relación al rango de pH del efluente, que varía de 7,58 a 8,08 durante el periodo de tiempo evaluado, podemos observar que los valores se mantienen dentro de un rango aceptable para la digestión anaerobia. Estos valores de pH cercanos a la neutralidad indican que el proceso de digestión se está llevando a cabo en condiciones adecuadas.

Además, el valor de pH registrado en el sistema de digestión anaerobia se mantiene dentro de un intervalo óptimo de 6,6 a 7,7, y no desciende por debajo de 6,2 proporcionando un entorno favorable para las bacterias metanogénicas, ya que les permite desarrollar su actividad metabólica de manera óptima. Esto asegura una digestión eficiente de la materia orgánica y una producción estable de metano, que es el producto deseado en el proceso de digestión anaerobia.

Esta condición es fundamental para evitar la formación de un entorno tóxico para las bacterias metanogénicas y prevenir la inhibición del proceso de digestión anaerobia.

- Determinación de la Conductividad Eléctrica

Tabla 10. Resultados de Conductividad eléctrica de la alimentación. Fuente: propia

Semana	Conductividad (mS) alimentación
Semana 1	2,5
Semana 2	2,5
Semana 3	2,6
Semana 4	2,7
Semana 5	2,3
Semana 6	2,2
Semana 7	2,7

Estos valores indican que la conductividad de la mezcla de fangos mixtos se mantiene dentro de un rango relativamente constante. Esta estabilidad en la conductividad puede ser atribuida a la composición y características consistentes de los fangos mixtos utilizados como alimentación, así como a la ausencia de cambios significativos en los componentes disueltos presentes en éstos.

Tabla 11. Resultados de Conductividad eléctrica en el efluente. Fuente: propia

Semana	Conductividad efluente (mS/cm)
Semana 1	8,18
Semana 2	8,18
Semana 3	7,67
Semana 4	7,47
Semana 5	6,96
Semana 6	5,96
Semana 7	5,04

Estos resultados de la conductividad de los efluentes reflejan de nuevo estabilidad en el digester anaerobio y en el proceso de digestión anaerobia mesófila proceso de digestión anaerobia.

- Sólidos Totales (ST): Sólidos totales Fijos (STF) Y Sólidos totales Volátiles (STV).

Tabla 12. Resultados de Sólidos Totales, %MS eliminada, Sólidos Volátiles, %MV eliminada del digester anaerobio. Fuente: propia

Semana	ST afluente (mg/L)	ST efluente (mg/L)	% Materia Seca eliminada (rendimiento)	SV afluente (mg/L)	SV efluente (mg/L)	% MV eliminado
Semana 1	30.500	21.905	28	21.887	13.760	34
Semana 2	30.546	19.660	36	21.522	12.176	32
Semana 3	30.655	19.693	36	20.800	11.120	38
Semana 4	30.333	21.555	29	21.417	12.881	38
Semana 5	25.776	17.747	31	17.454	9.770	42
Semana 6	25.896	18.826	27	17.648	10.770	38
Semana 7	29.680	19.701	34	20.333	10.982	42

Los sólidos volátiles en el afluente presentan valores iniciales más altos durante todas las semanas de análisis. Esto indica una mayor carga de materia orgánica en los fangos mixtos antes de entrar al digester anaerobio. Los valores en el afluente varían entre 21.887 mg/L en la primera semana y 20.333 mg/L en la última semana.

Los valores de sólidos totales en el afluente del digestor anaerobio son mayores que los valores de sólidos totales en el efluente debido a los procesos de degradación y transformación de la materia orgánica durante la digestión anaerobia. Obteniendo así un % Materia Seca eliminada positiva, es decir, hace referencia al rendimiento de los Sólidos Totales, presentando un valor promedio de las 7 semanas de investigación de 31,57%.

Al realizar el análisis de los resultados de los sólidos volátiles en los efluentes de fangos digeridos en un digestor anaerobio a lo largo de un período de 7 semanas, se observa una variación significativa en los valores obtenidos en las semanas 5 y 6, esto es debido a la disminución de la DQO y, por tanto, la disminución de los sólidos volátiles.

En el efluente, los sólidos volátiles se asemejan a los sólidos en suspensión volátiles presentes en el efluente, es decir, el conteo de sólidos volátiles en el efluente proporciona una estimación directa del número total de microorganismos presentes en el sistema

Estos microorganismos son los comensales encargados de llevar a cabo la degradación anaerobia del ácido acético, produciendo metano y dióxido de carbono, lo que resulta en la generación de biogás. Además, también desempeñan un papel crucial en el proceso de fermentación, ya que son responsables de las reacciones acidogénicas e hidrolíticas, que son etapas fundamentales para la conversión de la materia orgánica compleja en compuestos más simples y fácilmente fermentables.

En otras palabras, el conteo de sólidos volátiles en el efluente proporciona una estimación directa del número total de microorganismos presentes en el sistema. Estos microorganismos son una comunidad diversa y compleja que cumple funciones esenciales en el proceso de digestión anaerobia, desde la degradación inicial de la materia orgánica hasta la producción final de biogás.

El conocimiento de la población de microorganismos y su actividad en el sistema es fundamental para evaluar y optimizar el rendimiento del digestor anaerobio. Un equilibrio adecuado en la población de microorganismos y una alta actividad biológica contribuirán a una mayor eficiencia en la producción de biogás y una operación estable del proceso de digestión anaerobia.

Los rendimientos obtenidos en términos de % Materia Volátil eliminada muestran una estabilidad sobresaliente, ya que se mantienen en torno al 40%, con valores máximos alcanzados en el rango del 38% al 42%. Aunque en las primeras semanas pudo haber experimentado un arranque más lento, con valores de 34% y 32%, estos resultados todavía se encuentran dentro de los rangos esperados para un proceso de digestión anaerobia mesófila. Sin embargo, el sistema ha demostrado un excelente rendimiento en general, ya que ha logrado funcionar de manera muy eficiente.

Los valores de % Materia Volátil eliminada cercanos al 40% son un indicador positivo de la capacidad del digester anaerobio para degradar la materia orgánica presente en el sustrato. La estabilidad y consistencia de estos resultados, junto con los valores máximos alcanzados, indican que el sistema está operando de manera óptima.

A continuación, el gráfico 3 se presenta la evolución de sólidos volátiles en el afluente y efluente del digester anaerobio en funcionamiento mesófilo.

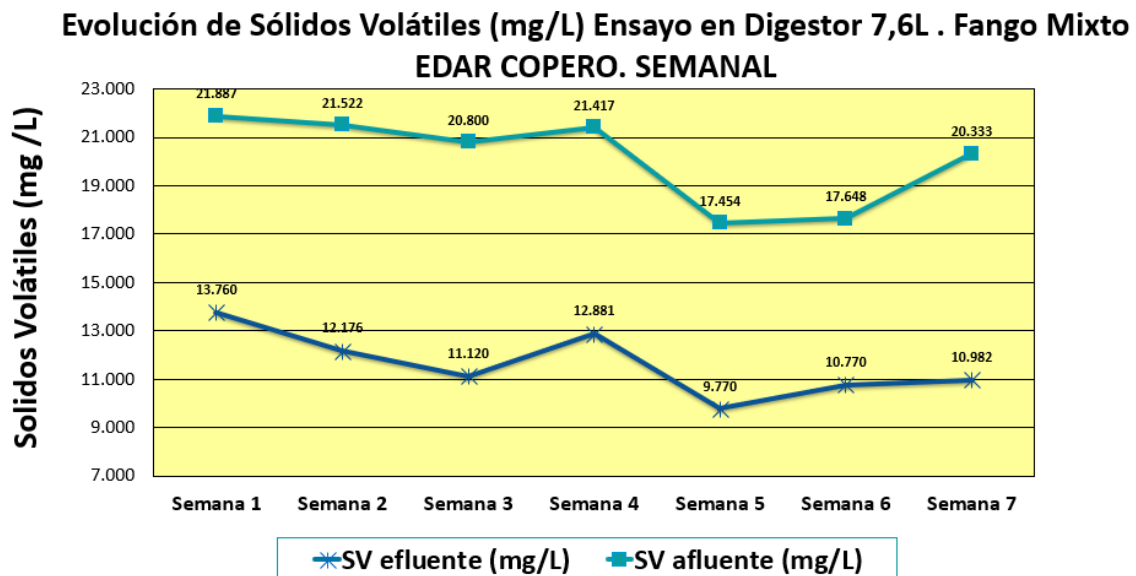


Gráfico 3. Representación de SV afluentes y efluentes. Fuente: propia

Al realizar un análisis exhaustivo del gráfico 4, el porcentaje de reducción de sólidos volátiles varía entre el 30% y el 45%, el digester anaerobio está completamente equilibrado, se observa un incremento en la producción de biogás.

El hecho de que el rendimiento haya mejorado progresivamente desde las primeras semanas hasta las últimas semanas del estudio muestra una adaptación y ajuste exitoso del sistema. Esto sugiere que el proceso de digestión anaerobia mesófila ha alcanzado un equilibrio óptimo, lo que se traduce en una producción de biogás y eliminación de materia orgánica eficiente y sostenible.

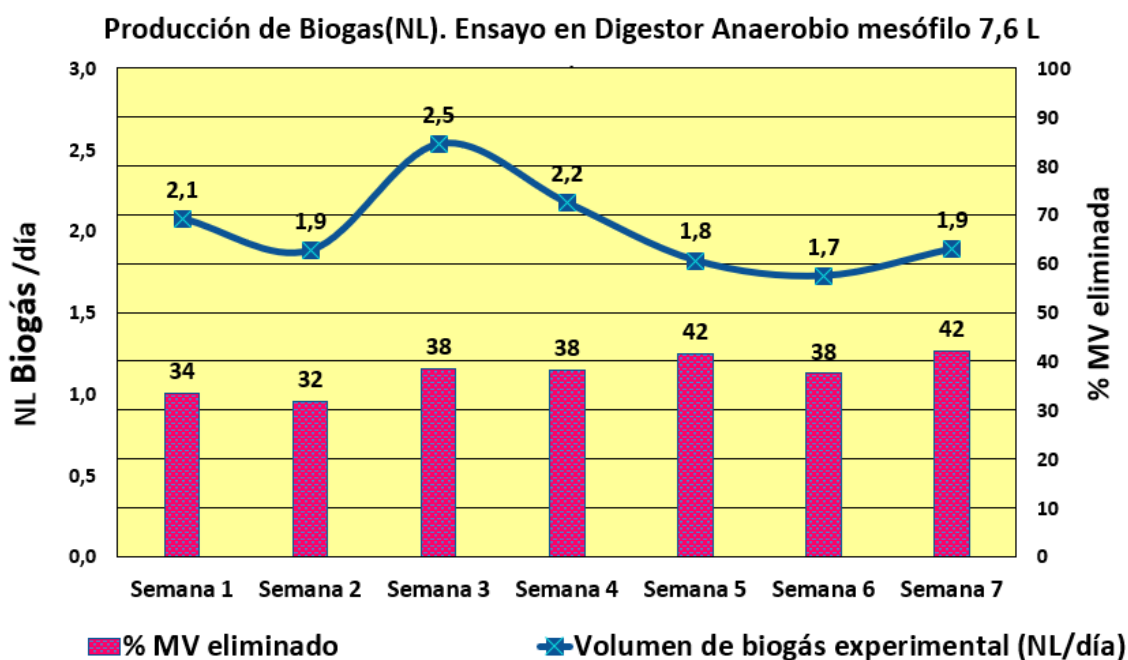


Gráfico 4. %MV eliminado VS volumen biogás experimental. Fuente: propia

- Determinación de Acidez Total y Alcalinidad y Relación Acidez Total/Alcalinidad en el efluente

Tabla 13. Resultados de Alcalinidad, Acidez Total en la alimentación. Fuente: propia

Semana	Alcalinidad (mg CaCO ₃ /L) alimentación	Acidez Total ((mg CaCO ₃ /l) alimentación)	Acidez Total (mg /L CH ₃ -COOH) alimentación
Semana 1	2.764	1.596	1.916
Semana 2	2.580	1.571	1.885
Semana 3	2.408	1.882	2.258
Semana 4	2.626	1.826	2.706
Semana 5	2.167	1.504	3.303
Semana 6	2.135	1.447	2.952
Semana 7	2.589	1.581	2.593

Tabla 14. Resultados de Alcalinidad, Acidez Total y su Relación en el efluente. Fuente: propia

Semana	Alcalinidad (mg CaCO₃/L)	Acidez Total (mg /L CH₃ - COOH)	Relacion Acidez Total/Alcalinidad efluente
Semana 1	4.346	1.138	0,22
Semana 2	4.346	1.138	0,22
Semana 3	4.508	1.303	0,24
Semana 4	5.188	1.190	0,19
Semana 5	6.587	1.625	0,21
Semana 6	5.255	1.460	0,23
Semana 7	4.927	1.422	0,24

Durante las 7 semanas de estudio, los valores de alcalinidad del efluente no presentan variabilidad, ya que están dentro de los intervalos correspondientes que oscilan entre 4.000 y 6.000 mg CaCO₃/L. Son parámetros totalmente estables en el estudio de digestión anaerobia mesófila tras consultar la bibliografía.

Estos resultados indican que el CaCO₃ del efluente tiene una capacidad moderada para neutralizar ácidos presentes en el sistema de digestión anaerobia ya que el rango de pH obtenido es entre 6 y 8.

La concentración de alcalinidad obtenida es superior a la acidez total, lo cual indica que el pH del sistema no disminuye acidificándose. Este equilibrio entre la alcalinidad y la acidez total es un indicador de una buena estabilidad en el proceso de digestión anaerobia.

La alcalinidad juega un papel fundamental en el mantenimiento de un pH adecuado en el sistema de digestión anaerobia. Al ser superior a la acidez total, se asegura que el proceso no se vuelva demasiado ácido, lo que podría inhibir la actividad microbiana y afectar negativamente la eficiencia del proceso.

Esta superioridad de la alcalinidad sobre la acidez total es esencial para mantener un entorno favorable para las bacterias anaerobias responsables de la degradación de la materia orgánica y la producción de biogás.

En cuanto a la Acidez Total, se observa valores que oscilan entre 1.303 y 1.900 mg CH₃COOH/L, también se encuentran dentro de un rango aceptable para el proceso de digestión anaerobia. Esto significa que no se produce una desestabilización del proceso y, como consecuencia, no se espera una disminución significativa en la producción de biogás.

Además, al no haber una entrada significativa de inhibidores en el afluente, se minimiza el riesgo de interrupción o deterioro del proceso de digestión anaerobia. La presencia de inhibidores en el afluente, como ciertos compuestos químicos o sustancias tóxicas, puede tener un impacto negativo en la actividad microbiana y la producción de biogás.

El mantenimiento de los valores de Acidez total dentro de un rango adecuado es esencial para garantizar un equilibrio químico adecuado en el digester anaerobio.

Cabe resaltar que la relación AGV/ALCALINIDAD está expresada en función de CaCO₃ para obtener un valor adimensional en su unidad.

Al analizar el gráfico 5, se observa que la relación AGV/ALCALINIDAD se encuentra dentro del intervalo de 0,19-0,24. Este rango está dentro del intervalo 0,3-0,4, lo que indica que el proceso de digestión anaerobia no sufre inhibición. Es importante destacar que mantener la relación AGV/ALCALINIDAD dentro de este intervalo es crucial para asegurar un funcionamiento óptimo del proceso.

Los valores de la relación Acidez Total/Alcalinidad en el efluente se mantienen relativamente constantes a lo largo de las 7 semanas, sin apenas diferencias entre 0,19 y 0,24. Esto indica estabilidad perfecta y equilibrio adecuado en el digester anaerobio en funcionamiento mesófilo.

Además, este intervalo nos brinda información sobre la producción de biogás. Al estar en un rango moderado de producción de biogás 0,2-0,3, indica que el sistema está generando una cantidad adecuada de biogás en relación con la cantidad de ácidos grasos volátiles presentes en el efluente.

Un problema potencial que se podría haber enfrentado es el caso de que aumentase la acidez total, provocando una disminución en la producción de biogás. Este escenario se debe a que el incremento de acidez puede generar un mayor acúmulo de ácido acético, resultado de la actividad de las bacterias

acidogénicas. Sin embargo, las bacterias metanogénicas, encargadas de convertir el ácido acético en metano, podrían no estar consumiendo lo suficiente debido a factores como una disminución en el pH del sistema o una concentración de AGV superior a la Alcalinidad Total

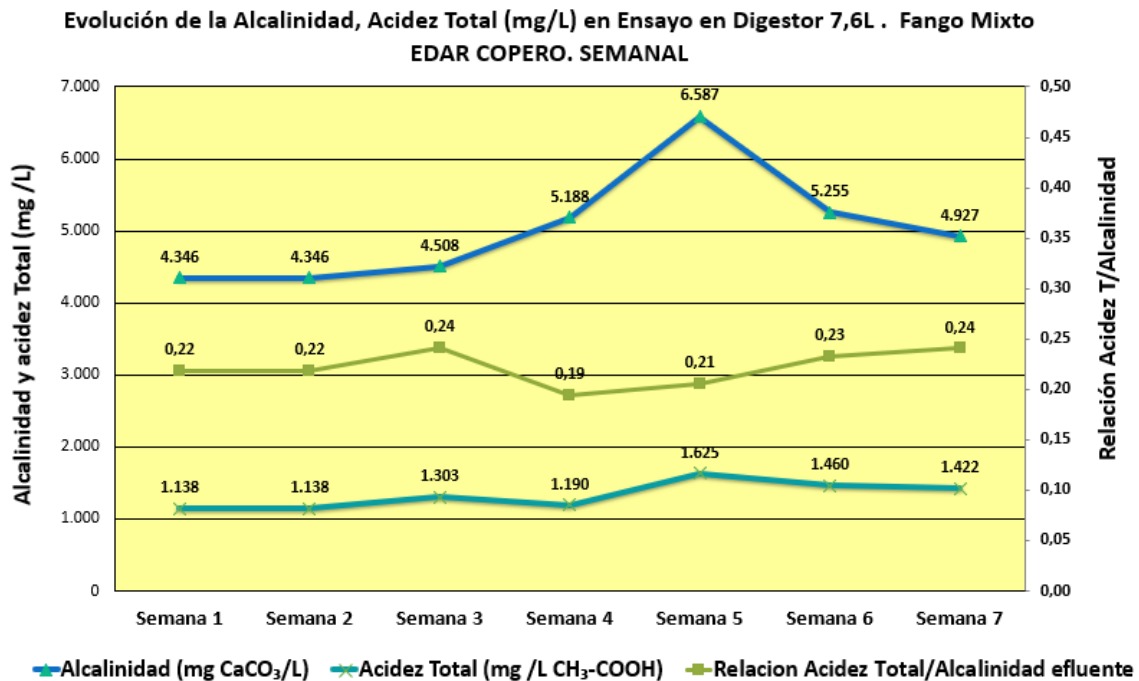


Gráfico 5. Alcalinidad, Acidez Total y su Relación en el efluente. Fuente: propia

- Determinación de Fósforo Total

Tabla 15. Resultados Fósforo Total. Fuente: propia

Semana	Fósforo total afluente (mg/L)	Fósforo total efluente (mg/L)	% Fósforo total Eliminado
Semana 1	1.060	834	21
Semana 2	1.190	756	36
Semana 3	1.095	648	41
Semana 4	1.064	542	49
Semana 5	965	754	22
Semana 6	940	804	14
Semana 7	1.036	624	40

En cuanto al % Fósforo Total eliminado, se observa una tendencia general hacia valores positivos, lo que indica una eliminación neta de fósforo durante el periodo de 7 semanas.

Es importante destacar que este parámetro está fuertemente influenciado por la composición del fango mixto utilizado como alimentación en el digester anaerobio. En ocasiones, se logra eliminar una cantidad significativa de fósforo, mientras que en otras situaciones puede que no se elimine nada.

La concentración de fosfatos en la alimentación se ha estudiado como variable crítica a controlar. Un exceso de fosfatos en la alimentación puede inhibir el funcionamiento óptimo del digester al afectar la actividad de las bacterias. Por lo tanto, es esencial medir y controlar la concentración de fosfatos en el sustrato de alimentación.

A continuación, en el gráfico 7, se representa de la evolución semanal de Fósforo Total, en función de su afluente y efluente:

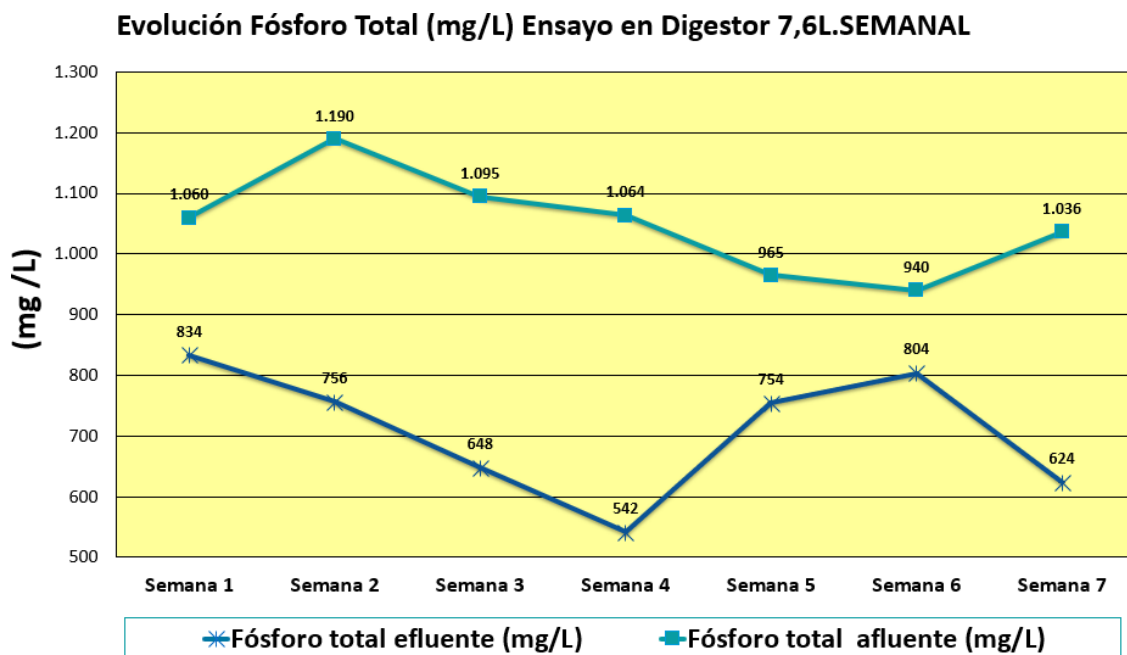


Gráfico 6. Evolución del Fósforo Total efluente y afluente. Fuente: propia

5. CONCLUSIONES

Una primera conclusión de este Trabajo Fin de Grado radica en comprender la realidad experimental y aplicar ingeniería con tus propias manos. Se aprende a tener la habilidad de resolver los desafíos cotidianos que surgen en el proceso de digestión anaerobia, gracias al conocimiento exhaustivo de todas las partes del digestor anaerobio y su funcionamiento intrínseco además de sus variables a controlar, adaptándose a las circunstancias presentes en el laboratorio, maximizando la utilización de los recursos disponibles y asegurando la sostenibilidad de este proceso experimental de autoconstrucción y montaje de digestores anaerobio de laboratorio.

Asimismo, se logra un aprendizaje importante en cuanto a la paciencia requerida para enfrentar la serie de problemas que pueden surgir, así como para encontrar soluciones eficientes.

También se profundiza en la comprensión de los microorganismos que trabajan en el digestor anaerobio, lo cual resulta fundamental para el éxito del proceso.

Una segunda conclusión de este Trabajo Fin de Grado es la comprobación exhaustiva del funcionamiento del digestor anaerobio alimentado mediante fangos mixtos. Los resultados obtenidos han demostrado que el digestor ha operado dentro de los valores esperados, lo que permite concluir que su desempeño ha sido eficiente. Esta afirmación se respalda con los resultados obtenidos durante el estudio.

Estos resultados confirman la viabilidad y eficiencia del digestor alimentados con fangos mixtos, destacando su capacidad para producir biogás y eliminar la materia orgánica de manera óptima. Los datos obtenidos a lo largo de este estudio proporcionan una base sólida para respaldar la solución adoptada y sus beneficios en términos de sostenibilidad y gestión de residuos.

Una tercera conclusión de este Trabajo Fin de Grado es aprender a dejar nuestra propia huella ecológica, ya que este residuo se valoriza convirtiéndose en materia prima de otro proceso, generando así un desarrollo sostenible ante los

residuos que contribuye a la economía circular del ciclo de agua en las estaciones depuradoras, reduciendo así impacto ambiental del cauce receptor.

En la Actualidad existe una tendencia de desarrollo orientada hacia el ciclo urbano del agua para ser autosostenible y que minimice el requerimiento de energía y la aportación de residuos al medio natural. Por ello la importancia de regresar el agua que se toma de la naturaleza en una condición “aceptable” para que siga su camino dentro del gran ciclo hidrológico.

El uso de lodo en la agricultura contribuirá a aliviar la salud de los suelos españoles tan necesitados en materia orgánica. Estas aplicaciones mejorarán las características de los suelos dotándolos de mayor capacidad para protegerse de la erosión y en último término de la desertificación, que afecta una superficie muy significativa de España.

Este reciclaje de lodos en los suelos supone crear un ciclo natural que conecta la ciudad con el campo. Los alimentos, procedentes de la agricultura, en los domicilios son ingeridos y mezclados con el agua, por la red de alcantarillado llegarán a las depuradoras, donde serán generados los lodos que serán utilizado en abono en los cultivos. Estamos, por tanto, ante un proceso de aprovechamiento de los residuos generados en las depuradoras de eminente carácter sostenible, un claro ejemplo de economía circular.

6. LINEAS FUTURAS

La digestión anaerobia termófila persigue maximizar la eficiencia en la valorización energética de lodos de EDAR y otros residuos orgánicos, contribuyendo a la eliminación más efectiva de patógenos presentes en los residuos orgánicos, lo que resulta en un digestato más seguro para su uso directo en la agricultura, cumpliendo con los estrictos estándares de seguridad y calidad según viene recogido BOJA nº156 de 13/08/2018.¹¹

Al lograr este nivel de seguridad sanitaria, se abre la posibilidad de utilizar el digestato como fertilizante agrario directo, lo que representa una valiosa estrategia de gestión sostenible de residuos y una alternativa ecoeficiente para el mejoramiento de suelos agrícolas.

En el ámbito de las EDAR se necesita una mejora sustancial en la eficiencia y rendimiento del proceso de tratamiento de lodos orgánicos mediante la implementación de la digestión anaerobia mesófila. En este sentido, se ha iniciado un enfoque de estudio para explorar y comparar el potencial de la digestión anaerobia en el rango termófilo en contraste con la tradicional digestión anaerobia mesófila.

En las EDAR se busca una superioridad al uso de la digestión anaerobia, buscando el estudio del rango termófilo frente al mesófilo, se les está quedando pequeño y corto la digestión anaerobia mesófila

La búsqueda de la superioridad del proceso termófilo radica en aprovechar estas condiciones termófilas, siendo más efectivas en la descomposición rápida y eficiencia de los sustratos orgánicos presentes en los lodos de depuradoras, generando una mayor degradación de la materia orgánica.

A medida que las EDAR enfrentan un creciente volumen de residuos orgánicos y una demanda cada vez mayor de valorización energética, se ha vuelto evidente que la digestión anaerobia mesófila está alcanzando sus límites de capacidad y rendimiento.

7. BIBLIOGRAFÍA

1. ESPAÑA. Real Decreto 509/1996, de 15 de marzo de 1996, de desarrollo del Real Decreto-Ley 11/1995., de 28 de diciembre, por el que se establecen las normas aplicables al tratamiento de las aguas residuales urbanas. *Boletín Oficial del Estado*, 29 de marzo de 1996. 77.
2. Mendoza Sánchez, L., José, F. & Perrino, F. I-166-ESTABILIZACIÓN DE LODOS MUNICIPALES POR DIGESTIÓN ANAEROBIA TERMÓFILA: METODOLOGÍA DE SEGUIMIENTO DE LAS BACTERIAS METANÓGENAS POR PCR (REACCIÓN EN CADENA DE LA POLIMERASA) DURANTE LA ADAPTACIÓN DE UN INÓCULO MESÓFILO A LAS CONDICIONES TERMÓFILAS. [consulta: 5 de mayo 2023]. Disponible en: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov>.
3. ANGELIDAKI, I., SANDERS, W. Assessment of the anaerobic digestion biodegradability of macropollutants. *Rev. Environ. Sci. Biotechnol.* 3, 114-129.
4. Guyot, J.P. (1992). "Introducción a la microbiología de los reactores anaerobios". *Bioprocesos anaerobios para el tratamiento de efluentes industriales*, Iztapalapa (Méjico), 1-17.
5. Archer, D.B. y Kirsop, B.H. (1990). "The microbiology and control of anaerobic digestion". *Anaerobic digestion: a waste treatment technology*, Wheatley A., ed., Elsevier applied science, 43-87.
6. Ahring, B.K., Sandberg, M., Angelidaki, I. (1995). Volatile fatty acids as indicators of process imbalance in anaerobic digestors. *Applied Microbiology and Biotechnology* 43(3), 559-565.
7. ZINDER, S.H. Physiological ecology of methanogenesis. In *Methanogenesis: Ecology, Physiology, Biochemistry and Genetics* (Ferry, J.G., ed.). New York, Chapman and Hall, pp: 128-206. (1993).
8. Lemos Chernicharo, C. A. *Anaerobic Reactors*. (2007).
9. Cuba, L., Acosta, Y. ;, Abreu, O. & Cristina, M. ICIDCA. *Sobre los Derivados de la Caña de Azúcar*.

10. *Biomasa: Digestores anaerobios*: Madrid. Octubre de 2007. ISBN 13:978-84-966680-21-0.
11. Boletín Oficial de la Junta de Andalucía BOJA CONSEJERÍA DE LA PRESIDENCIA, ADMINISTRACIÓN LOCAL Y MEMORIA DEMOCRÁTICA Secretaría General Técnica. [consulta: 7 de mayo 2023]. Disponible en: <http://www.juntadeandalucia.es/eboja1.Disposicionesgenerales>.
12. Torrella, S. B. Para una correcta selección y explotación de digestores anaerobios. *Rev. prod. anim* 20, 102–109 (2008).
13. MARTOS AGUILÓ, P. *XXXVII CURSO sobre TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES Y EXPLOTACIÓN DE ESTACIONES DEPURADORAS*. Tomo III. Barcelona. Noviembre de 2019.
14. CAICEDO, MESA, F.J *Recuperación de fósforo en lodos de depuración mediante cristalización de estruvita. Diseño, construcción y arranque de un reactor U.A.S.B. piloto para el tratamiento de lixiviados* [en línea]. Trabajo Final de Grado. Universidad Nacional de Colombia. Colombia. 2006 [consulta: 14 de mayo 2023]. Disponible en: <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/3413>
15. Carceller Rosa, J.M. Depuración anaerobia de aguas residuales. Su aplicación en la industria alimentaria. [consulta: 14 de mayo de 2023], (pp:1-8). Disponible en: http://www.bibliotecagbs.com/archivos/ta_263_1_05.pdf
16. Aguapedia. Lebrato Martínez, J. [en línea] [fecha de consulta: 20 de mayo 2023]. Disponible en: <https://aula.aguapedia.org/>
17. MARTÍN JIMENEZ, M. *Valorización de fangos de EDAR via digestión y cogeneración del biogás*. [en línea]. Trabajo Final de Grado. Universidad de Valladolid, Valladolid. 2018 [consulta: 15 de mayo 2023]. Disponible en: <https://uvadoc.uva.es/bitstream/handle/10324/31341/TFG-P-875.pdf?sequence=1>
18. UDABE AMORENA, A. *XXXVII CURSO sobre TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES Y EXPLOTACIÓN DE ESTACIONES DEPURADORAS*. Tomo III. Mancomunidad de la Comarca de Pamplona. Noviembre de 2019.

19. MARTOS AGUILÓ, P. XXXVII CURSO sobre TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES Y EXPLOTACIÓN DE ESTACIONES DEPURADORAS. Tomo III. Barcelona. Noviembre de 2019.
20. Mahamud, M., Guiérrez, A. & Sastre, H. Ingeniería del Agua. Vol.3 Num 3. vol. 3 (1996).
21. Yopez, L. E., Escuela, M., Panamericana, A. & Honduras, Z. Evaluación del incremento de la temperatura en la digestión anaeróbica de King Grass y gallinaza para la producción de metano. (2017).
22. Ozalla Sánchez, M., Mosteo, R., Jairo, A. & Muñoz, G. Trabajo Fin de Grado. (2022).
23. ESPAÑA. Directiva del Consejo, de 21 de mayo de 1991, sobre el tratamiento de las aguas residuales urbanas. *Boletín Oficial del Estado*. 30 de mayo de 1991. 135.
24. ESPAÑA. Directiva 2000/60/CE, 23 de octubre de 2000, del Parlamento Europeo y del consejo, por la que se establece un marco comunitario de actuación en el ámbito de la política de aguas. *Boletín Oficial del Estado*, 22 de diciembre de 2000. 327.
25. ESPAÑA. Directiva 2008/105/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 16 de diciembre de 2008, relativa a las normas de calidad ambiental en el ámbito de la política de aguas, por la que se modifican y derogan ulteriormente las Directivas 82/176/CEE, 83/513/CEE, 84/491/CEE y 86/280/CEE del Consejo, y por la que se modifica la Directiva 2000/60/CE. *Boletín Oficial del Estado*, 24 de diciembre de 2008. 348.
26. ESPAÑA. Directiva 2006/44/CE, 6 de septiembre de 2006, del Parlamento Europeo y del Consejo, de 6 septiembre, relativa a la calidad de las aguas continentales que requieren protección o mejora para ser aptas para la vida de los peces. *Boletín Oficial del Estado*, 25 de septiembre de 2006. 264.
28. ESPAÑA. Real Decreto Legislativo 1/2001, 20 de julio de 2001, por el que se aprueba el texto refundido de la Ley de Aguas. *Boletín Oficial del Estado*, 24 de julio de 2001. 176.

29. ESPAÑA. Real Decreto 817/2015, 11 de septiembre de 2015, por el que se establecen los criterios de seguimiento y evaluación del estado de las aguas superficiales y las normas de calidad ambiental. *Boletín Oficial del Estado*, 12 de septiembre de 2015. 219
30. ESPAÑA. Real Decreto-ley 11/1995, 28 de diciembre, por el que se establecen las normas aplicables al tratamiento de las aguas residuales urbanas. *Boletín Oficial del Estado*, 30 de diciembre de 1995. 312
31. ESPAÑA. Resolución de 25 de mayo de 1998, de la Secretaría de Estado de Aguas y Costas, por la que se declaran las "zonas sensibles" en las cuencas hidrográficas intercomunitarias. *Boletín Oficial del Estado*, 30 de junio de 1998. 155.
32. ESPAÑA. Resolución de 10 de julio de 2006, de la Secretaría General para el territorio y la Biodiversidad, para la que se declaran las Zonas Sensibles en las Cuencas Hidrográficas Intercomunitarias. *Boletín Oficial del Estado*, 28 de julio de 2006. 179.
33. ESPAÑA. Resolución de 30 de junio de 2011, de la Secretaría de Estado de Medio Rural y Agua, por la que se declaran las zonas sensibles en las cuencas intercomunitarias. *Boletín Oficial del Estado*, 28 de julio de 2011. 180.
34. ESPAÑA. Real Decreto 1620/2007, 7 de diciembre de 2007, por el que se establece el régimen jurídico de la reutilización de las aguas depuradas. *Boletín Oficial del Estado*, 8 de diciembre de 2007. 294.
35. ESPAÑA. Real Decreto 1310/1990, de 29 de octubre, por el que se regula la utilización de los lodos de depuración en el sector agrario. *Boletín Oficial del Estado*, 1 de noviembre de 1990. 262.
36. ESPAÑA. Orden AAA/1072/2013, de 7 de junio, sobre utilización de lodos de depuración en el sector agrario. *Boletín Oficial del Estado*, 14 de junio de 2013. 142.
37. PEREZ REAL, L. *Recuperación de fósforo en lodos de depuración mediante cristalización de estruvita* [en línea]. Trabajo Final de Grado. Universidad de Sevilla, Sevilla. 2022 [consulta: 10 de mayo 2023]. Disponible en: <https://idus.us.es/handle/11441/136659>

38. Peña, E., Pérez, A. R., Miranda, A. J. & Sánchez, J. H. Modelado de un reactor químico tipo CSTR y evaluación del control predictivo aplicando Matlab-Simulink. Rev. INGENIERÍA UC vol. 15 (2008).

39. Dolors, M. & Vilalta, G. UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DE REACTORES DISCONTINUOS Y SEMICONTINUOS: MODELIZACIÓN Y COMPROBACIÓN EXPERIMENTAL. (1999).

40. LCK 014 Demanda Química de Oxígeno Preparación para el análisis Almacenamiento del test Antes de comenzar. www.hach.com (2019).

41. LCK350 Fósforo total / Fosfato orto DOC312.61.94022 2.0-20.0 mg/L PO 4-P, 6.0-60.0 mg/L PO 4 o 4.5-45.0 mg/L P 2 O 5 LCK350 Preparación para el análisis Almacenamiento del test. (2019).