



**UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA
BARCELONATECH**

Escola Superior d'Agricultura de Barcelona



VALORIZACIÓN AGRONÓMICA DE LODOS DEPURADOS PROCEDENTES DE UN MATADERO DE PORCINO

TRABAJO FINAL DE GRADO

INGENIERÍA DE SISTEMAS BIOLÓGICOS

Autora: Andrea Terán Palacios

Tutores: Nuria Cañameras Riba, Jordi Comas Angelet

Setiembre 2019

RESUMEN

Cada año en Cataluña se genera medio millón de toneladas de lodos provenientes de los residuos urbanos e industriales (Agència Catalana de l'Aigua, 2019). Su gestión se lleva a cabo por distintas vías, siendo la valorización agronómica una disposición eficaz en cuanto a retribución al medio ambiente y reducción de la contaminación.

Para el estudio del potencial de los lodos depurados como fertilizantes para uso agrícola, se ha elegido utilizar lodos procedentes de la industria alimentaria en lugar de los lodos urbanos, debido a que estos han mostrado mayores índices de contaminación y acumulación de tóxicos (Bayona, et. al., 2017).

El estudio se centró en evaluar la línea de depuración que se realiza en una estación depuradora de aguas residuales procedentes de un matadero de porcino con el objeto de examinar la calidad de los lodos depurados, así como analizar otros aspectos relevantes para su uso, como lo son: el grado de estabilidad y el potencial agronómico de los lodos.

Para la determinación del grado de estabilidad, se utilizaron dos métodos: el método Klanson (MAB, 1971), el cual fue utilizado por la Agència Residus de Catalunya para establecer el parámetro exigible en cuanto a grado de estabilidad (GE), y el método Van Soest (Binner, 1997) para contrastar ambos métodos.

Por último, se realizó un ensayo en invernadero donde se analizó el efecto de los fangos depurados en el rendimiento y evolución del cultivo de rábanos rojos (*Raphanus sativus*) comparándolos con un fertilizante mineral o un cultivo control.

ABSTRACT

Every year in Catalonia, half a million tons of sludge from urban and industrial waste is generated (Agència Catalana de l'Aigua, 2019). Its management is carried out in different ways, with agronomic valorization being an effective disposition in terms of environmental compensation and pollution reduction.

For studying the potential of sewage sludge as fertilizer for agricultural use, it has been chosen the use of sewage sludge from food industry instead of urban sludge, as these have shown higher rates of toxic contamination and accumulation (Bayona, et .al., 2017).

The study is focused on evaluating the depuration process that is carried out in a industrial water treatment plant from pig slaughterhouse sewage in order to examine the quality of the sludge, as well as analyses other aspects relevant to its use, such as: the stability degree and the agronomic potential of the sludge.

For the determination of the stability degree, there were used two methods: The Klanson method (MAB, 1971), which had been used by the Agència de Residus de Catalunya to establish the required parameter in terms of stability degree (GE), and the Van Soest method (Binner, 1997) in order to contrast both methods.

Finally, a test was conducted where the effect of purified sludge on the performance and evolution of a radish crop (*Raphanus sativus*) in a greenhouse was analyzed and compared to a mineral fertilizer or a control crop.

RESUM

Cada any a Catalunya es genera mig milió de tones de fangs procedents de residus urbans i industrials (Agència Catalana de l'Aigua, 2019). La seva gestió es porta a terme per diferents vies, sent la valorització agronòmica una disposició eficaç quant a retribució del Medi Ambient y reducció de la contaminació.

Per l' estudi del potencial dels fangs depurats com a fertilitzants per a ús agrícola, s'ha escollit utilitzar fangs procedents de la indústria alimentària en comptes de fangs urbans, degut a que aquests han mostrat majors índex de contaminació i acumulació de tòxics (Bayona, et. al., 2017).

L'estudi es centrà en avaluar la línia de depuració que es realitza en una estació depuradora d' aigües residuals procedents d' un escorxador porcí amb l'objecte d' examinar la qualitat dels fangs depurats, així como analitzar altres aspectes rellevants pel seu ús, tals com: el grau d' estabilitat i el potencial agronòmic dels fangs.

Per la determinació del grau d'estabilitat, s'han utilitzat dos mètodes: el mètode Klanson (MAB, 1971), el qual va utilitzar l' Agència de Residus de Catalunya per establir el paràmetre exigible quant a grau d' estabilitat (GE), i el mètode Van Soest (Binner, 1997) per contrastar ambdós mètodes.

Finalment, es realitzà un assaig en hivernacle on s' analitzà l'efecte dels fangs depurats en el rendiment i evolució del cultiu de rave vermell (*Raphanus sativus*) en comparació amb un fertilitzant mineral o un cultiu control.

AGRADECIMIENTOS

Me gustaría comenzar agradeciendo al Dr. Jordi Comas por creer en este proyecto y alentarme a profundizar sobre el tema. A la Dra. Nuria Cañameras por todas las horas compartidas, por todos los detalles revisados, pero sobretodo, por tomar la batuta del proyecto y acompañarme hasta el final.

A la Dra. Nuria Carazo por su ayuda en la parte experimental, a María Julià y Olga Gener por la colaboración y soporte en los laboratorios.

A Màxim Munté, por su plena colaboración y aliento para que el proyecto pueda ser lo más completo posible.

A Àlex, por su compañía y las horas de revisión dedicadas.

A Belén, Camila, Jaime y Nory, la inspiración de mi esfuerzo y dedicación.

Contenido

1.	Introducción	1
1.1	Alcance de la investigación	1
1.2	Contexto del trabajo y antecedentes	1
1.3	Marco legal	2
2.	Objetivos.....	6
2.1	Objetivo principal	6
2.2	Objetivos específicos	6
3.	Materiales Y Métodos.....	8
3.1	Evaluación del agua residual.....	8
3.1.1	Volumen de aguas residuales a tratar.....	11
3.1.2	Producción de lodos	11
3.2	Ensayo en laboratorio.....	12
3.2.1	Materia orgánica	12
3.2.2	Procedimiento	12
3.2.3	Determinación del grado de estabilidad.....	15
3.3	Ensayo en invernadero.....	16
3.3.1	Material vegetal	16
3.3.2	Características del suelo.....	16
3.3.3	Agua de riego	16
3.3.4	Fertilizantes	16
3.3.5	Tratamientos realizados	17
3.3.6	Diseño del experimento.....	18
a)	Orgánico	18
b)	Mineral	18
3.3.7	Procedimiento del montaje	19
3.3.8	Determinación de la biomasa	22
3.3.9	Determinación de las clorofilas.....	22

3.4	Tratamiento estadístico de los resultados	23
4.	Resultados y discusión	25
4.1	Evaluación del agua residual.....	25
4.2	Grado de estabilidad.....	27
4.3	Ensayo en invernadero.....	28
4.3.1	Evolución del crecimiento vegetal	28
4.3.2	Biomasa final	31
4.3.3	Determinación de clorofilas	34
5.	Conclusiones.....	38
6.	Bibliografía	40
	Anexo 1: cálculos de las DOSIS DE los fertilizantes: mineral y orgánico	43

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Criterios aplicables a los productos fertilizantes elaborados con residuos y otros componentes orgánicos	2
Tabla 2: Valor límite de concentración de metales pesados en los suelos (mg/kg materia seca).....	3
Tabla 3: Valor límite de concentración de metales pesados en los lodos destinados a su utilización agraria (mg/kg de materia seca).....	3
Tabla 4: Condiciones deseables para la valorización agronómica de residuos orgánicos. (s.m.s = sobre materia seca).	4
Tabla 5 Caudal de tratamiento en la estación depuradora de aguas residuales	11
Tabla 6: Analítica de una muestra refrigerada de lodos tratados. (sms: sobre muestra seca).	17
Tabla 7: Dosificaciones de fertilizante orgánico.....	18
Tabla 8: Tipos de fertilizantes (UF = Unidad fertilizante kg/ha).....	18
Tabla 9: Dosificaciones de fertilizante mineral.....	19
Tabla 10: Posiciones de los contenedores	20
Tabla 11 Características del agua residual de un matadero de porcino (Fuente: proporcionada por el propio matadero).....	25
Tabla 12 Características del agua depurada (Fuente: proporcionada por el propio matadero)	25
Tabla 13 Análisis de las características de los lodos secundarios.	26
Tabla 14 Valores del grado de estabilidad según metodología analítica aplicada (valores no significativos)	27
Tabla 15: Resultados de la determinación de la cantidad de hojas según las dosis aplicadas. (DM1: dosis mineral 1, DM2: dosis mineral 2, DM3: dosis mineral 3, DF1= dosis fango 1, DF2= dosis fango 2, DF3: dosis fango 3, IC= índice de confianza). <i>Resultados no significativos. p-valor: 0.95</i>	29
Tabla 16: Resultados de la determinación de longitud de la hoja más larga de cada dosis. (DM1: dosis mineral 1, DM2: dosis mineral 2, DM3: dosis mineral 3, DF1= dosis fango 1, DF2= dosis fango 2, DF3: dosis fango 3, IC= índice de confianza). <i>Resultados no significativos. p-valor: 0.95</i>	30
Tabla 17: Resultados estadísticos del peso fresco total. (N= número de repeticiones, IC= índice de confianza, Dev.Est = desviación estándar). <i>Resultados no significativos.</i>	31
Tabla 18: Resultados estadísticos del peso fresco aéreo. (N= número de repeticiones, IC= índice de confianza, Dev.Est = desviación estándar). <i>Resultados no significativos.</i>	32
Tabla 19: Resultados estadísticos del peso fresco de la raíz (N= número de repeticiones, IC= índice de confianza, Dev.Est = desviación estándar). <i>Resultados no significativos. p-valor:0.79</i>	32

Tabla 20: Resultados estadísticos del peso seco total de la planta. (N= número de repeticiones, IC= índice de confianza, Dev.Est = desviación estándar). *Resultados no significativos*. 32

Tabla 21: Resultados estadísticos del peso seco de la parte aérea de la planta. (N= número de repeticiones, IC= índice de confianza, Dev.Est = desviación estándar). *Resultados no significativos*.... 33

Tabla 22: Resultados estadísticos del peso seco de la parte radicular de la planta. (N= número de repeticiones, IC= índice de confianza, Dev.Est = desviación estándar). *Resultados no significativos*.... 33

Tabla 23 Resultados de la clorofila a. (IC= índice de confianza, Dev.Est = desviación estándar). *Resultados significativos*. 34

Tabla 24 Resultados de la clorofila b. (IC= índice de confianza, Dev.Est = desviación estándar). *Resultados significativos*. 34

Tabla 25 Resultados de la clorofila total. (IC= índice de confianza, Dev.Est = desviación estándar). *Resultados no significativos*. 35

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Sistema de flotación por aire disuelto (DAF) de fangos secundarios	10
Figura 2 Centrífuga para la deshidratación de los fangos	11
Figura 4 Muestra secándose en la placa calefactora	12
Figura 3 Muestra a la salida de la estufa	12
Figura 5 Tamiz de luz de malla de 150 micras	13
Figura 6 Primera hidrólisis del método Klanson	13
Figura 7 Método Klanson (MAB, 1971)	14
Figura 8 Método Van Soest modificado por Binner et. at.1997	15
Figura 9 Aspiración al vacío para la filtración de la última hidrólisis del método Van Soest	15
Figura 10 Reflujo de las muestras del método Van Soest	15
Figura 11 Montaje del ensayo en invernadero	19
Figura 12 Ubicación de las plantas en el invernadero	21
Figura 13 Evolución del número de hojas según las dosis de tratamiento. DM1: dosis mineral 1, DM2: dosis mineral 2, DM3: dosis mineral 3, DF1= dosis fango 1, DF2= dosis fango 2, DF3: dosis fango 3.	28
Figura 14 Evolución de la longitud de la hoja más grande según tratamiento. (DM1: dosis mineral 1, DM2: dosis mineral 2, DM3: dosis mineral 3, DF1= dosis fango 1, DF2= dosis fango 2, DF3: dosis fango 3).	29
Figura 15 Hoja del cultivo DM3, dañada por gusanos	30
Figura 16 Hoja con presencia de pulgones	30

INTRODUCCIÓN

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Alcance de la investigación

El alcance de la investigación viene dado por la problemática de la alta producción y muy escasa gestión de lodos provenientes de estaciones depuradoras del sector cárnico, en especial, el sector de mataderos en Cataluña.

La depuración de las aguas residuales provenientes de mataderos ha incrementado en estos últimos 7 años debido a las altas demandas y restricciones por parte de la Agència Catalana de l'Aigua (ACA) para evitar la contaminación a ríos y cauces en todo el territorio catalán.

El tratamiento de dichas aguas y las tecnologías usadas han beneficiado la depuración parcial o total de las aguas (con hasta un 95% de efectividad), por lo cual, la generación de lodos ha incrementado notablemente.

Debido a este incremento, la Agència de Residus de Catalunya (ARC) ha impuesto dos tipos de tratamientos para poder valorizarlos. La gestión promovida por la ARC se centra en el compostaje y la digestión anaerobia.

La alta producción, como se menciona, proviene de elementos como las tecnologías utilizadas para la separación de sólido y líquido en el proceso de depuración que cada vez son más eficaces. Según las cifras de la ACA, son medio millón de toneladas de lodos producidos al año en Cataluña y la capacidad de valorización de dichos lodos es menor al 80% de la producción (Agència Catalana de l'Aigua, 2019), por el cual, podemos percibir la insuficiencia de capacidad de tratamiento de las mismas. Dicha problemática, genera un aumento del coste de gestión y por el cual, los mataderos buscan alternativas para poder valorizar dichos excedentes sin que repercuta en el precio de producción de sus productos.

1.2 Contexto del trabajo y antecedentes

En este Trabajo Final de Grado (TFG) está previsto abordar la justificación de la valorización agronómica directa de los lodos depurados de una estación depuradora que trata aguas provenientes de un matadero de porcino. En este trabajo no se citará el nombre del matadero debido a la confidencialidad que se ha establecido con la empresa.

Los lodos provenientes de la empresa mencionada, cumplen con parámetros de las normativas vigentes para su uso agrario y sin embargo no pueden ser valorizadas como tal debido a las exigencias de tratamiento posterior de los lodos.

Dichos tratamientos, son mencionados en el Real Decreto 1310/1990, y sólo pueden ser mediante 3 tipos: La digestión anaerobia, la estabilización aerobia y el compostaje.

La paradoja de la reglamentación y normativas establecidas es que se aplican a todo tipo de lodo depurado, ya sea municipal o industrial. Sería aconsejable tener en cuenta la caracterización de cada tipo de lodo y el tipo de depuración realizado para tratar adecuadamente el lodo antes de su aplicación agronómica con el fin de evitar problemas microbiológicos. A este respecto, existen varias directivas europeas tales como las mencionadas en el apartado 1.3.

1.3 Marco legal

Para poder contextualizar el estudio, se mencionan las diferentes normativas y condicionantes a cerca de la valorización de lodos tratados y su uso como fertilizante:

- Legislación europea

DIRECTIVA DEL CONSEJO (86 / 278 / CEE) de 12 de junio de 1986, relativa a la protección del medio ambiente y, en particular, de los suelos, en la utilización de los lodos de depuradora en agricultura.

- Legislación estatal

REAL DECRETO 506/2013, de 28 de junio, sobre productos fertilizantes. En este RD se reflejan los criterios aplicables a los productos fertilizantes elaborados con residuos y otros componentes orgánicos (Tabla 1).

Tabla 1: Criterios aplicables a los productos fertilizantes elaborados con residuos y otros componentes orgánicos

Metal pesado	Límites de concentración de sólidos (mg/kg de materia seca)		
	Líquidos mg/kg		
	Clase A	Clase B	Clase C
Cadmio	0,7	2	3
Cobre	70	300	400
Níquel	25	90	100
Plomo	45	150	200
Zinc	200	500	1000
Mercurio	0,4	1,5	2,5
Cromo (total)	70	250	300
Cromo (VI)	No detectable según método oficial	No detectable según método oficial	No detectable según método oficial

REAL DECRETO 1310/1990, de 29 de octubre, por el que se regula la utilización de los lodos de depuración en el sector agrario. En este RD se expresan los valores límites de metales pesados en el suelo y en los lodos para destinación agraria (Tablas 2 y 3).

Tabla 2: Valor límite de concentración de metales pesados en los suelos (mg/kg materia seca)

Parámetros	Valores límite	
	Suelos con pH menor de 7	Suelos con pH mayor de 7
Cadmio	1	3
Cobre	50	210
Níquel	30	112
Plomo	50	300
Zinc	150	450
Mercurio	1	1,5
Cromo	100	150

Tabla 3: Valor límite de concentración de metales pesados en los lodos destinados a su utilización agraria (mg/kg de materia seca)

Parámetros	Valores límite	
	Suelos con pH menor de 7	Suelos con pH mayor de 7
Cadmio	20	40
Cobre	1.000	1.750
Níquel	300	400
Plomo	750	1.200
Zinc	2.500	4.000
Mercurio	16	25
Cromo	1.000	1.500

- Legislación autonómica

En Cataluña el órgano responsable y sancionador de las leyes europeas y estatales sobre residuos recae en la Agència de Residus de Catalunya (ARC).

Dado el caso, la entidad propone, en el catálogo de residuos, el criterio general orientativo, las características y propiedades de los residuos orgánicos a tener en cuenta para considerar su valorización agrícola potencial (Tabla 4).

Tabla 4: Condiciones deseables para la valorización agronómica de residuos orgánicos. (s.m.s = sobre materia seca).

Características o propiedades	Condiciones deseables para un uso óptimo	Tratamiento de los suelos que produzca un beneficio en la agricultura o una mejora ecológica de estos suelos
Variabilidad en la composición	Constancia en la composición a lo largo del año y de los años	
pH	Evitar pH extremos	4,5-8,5
Salinidad	Baja	$\leq 8 \delta\Sigma/\mu$
Contenido mínimo de materia orgánica (s.m.s.) y Grado de estabilidad (GE) de la materia orgánica	Contenido mínimo de materia orgánica	$\geq 40\%$
	Grado de estabilidad (GE) de la materia orgánica	$\geq 25\%$
Elementos nutritivos	Conocimiento del contenido y la facultad de asimilación	N total, P total o K total 2% s.ms.
Metales pesados	Contenidos inferiores a los legalmente establecido	Límites legales del RD 1310/1990
Micro contaminantes orgánicos e inorgánicos	Niveles que aseguren la inocuidad del producto	
Impurezas (plásticos, vidrios...)	Ausencia	-

OBJETIVOS

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo principal

El objetivo principal del presente estudio es valorar si los lodos depurados procedentes de matadero porcino se adecuan al marco legal vigente para su aplicación agronómica y determinar además su potencial como fertilizante orgánico.

2.2 Objetivos específicos

Para poder alcanzar el objetivo general, se definen los objetivos específicos en relación a la investigación y experimentación del presente estudio.

- Describir la línea de tratamiento de la EDAR
- Determinar el grado de estabilidad del lodo tratado
- Cuantificar la biomasa producida al usar el lodo tratado como fertilizante
- Evaluar el contenido de clorofila del cultivo

MATERIALES Y MÉTODOS

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Evaluación del agua residual

Para la caracterización de los lodos provenientes del matadero de porcino que se usaran en este TFG, es necesario conocer las características físico-químicas de las aguas que lo han generado, es decir, de las aguas residuales que llegan y salen de la depuradora. El análisis de los parámetros evaluados ha sido realizado por la empresa Eix Ambiental.

La línea de depuración aplicada a este tipo de aguas residuales se describe a continuación:

Homogeneización

Las aguas residuales, procedentes del matadero, entran directamente a la balsa de homogeneización. Se trata de una balsa construida en hormigón, con capacidad para 2.000 m³.

El tiempo de retención hidráulico de la balsa de homogeneización es superior a 12 horas, lo cual permite uniformizar el caudal.

La balsa contiene dos aireadores sumergibles autoaspirantes que aportan aire (oxígeno) al agua almacenada, con la finalidad de evitar la presencia de bacterias sulfato reductoras que a su vez consiguen una oxidación química y biológica preliminar. El depósito también, va provisto de 2 agitadores sumergibles para evitar sedimentaciones.

Flotación por aire disuelto (DAF) de fangos primarios

Desde el homogeneizador, las aguas residuales llegan a la celda de flotación DAF mezcladas con una solución floculante y coagulante. Dicha celda está fabricada en acero inoxidable y tiene un volumen de 75 m³.

El objetivo del sistema de flotación por aire disuelto de fangos primarios, es separar las aguas residuales de la mayoría de los sólidos y grasas fácilmente decantables. Se trata de un proceso físico-químico de flotación forzada de aire presurizado de alta presión, mediante la inyección de aire y agua a presión desde el fondo de la celda de flotación, las partículas fácilmente decantables se adhieren a las finas burbujas de aire, disminuyendo la densidad del flóculo aglomerado y, por tanto, favoreciendo su flotación.

Los flóculos aglomerados son extraídos superficialmente mediante unas palas rascadoras accionadas por un juego de cadenas y que los acercan hacia la zona de descarga, y éstos caerán por gravedad al depósito de almacenamiento de fangos primarios (acumulador de lodos).

El equipo dispone de un sistema de tornillo separador de sólidos sedimentados que los extrae y los envía al desarenador (línea de lodos).

El agua que sale de la celda de flotación es enviada por gravedad al reactor biológico.

Tratamiento biológico

El reactor biológico es de tipo "carrusel", tiene una capacidad de 18.000 m³, con una zona anóxica (sin aireación) y una zona aerobia (aireada), con un tiempo de retención hidráulica (TRH) de aproximadamente unos 6-8 días. Dicho reactor se caracteriza por producir fangos activos cuyo objetivo es la eliminación de la carga contaminante disuelta que forma la demanda química de oxígeno (DQO) y los compuestos de moléculas nitrogenadas (amonio, nitritos y nitratos).

Para llevar a cabo la eliminación de los contaminantes mencionados, en la zona aeróbica, el reactor cuenta con cuatro soplantes, todos dotados con un sistema de parrillas de difusores tubulares, los cuales suministran una concentración de oxígeno en la zona aerobia de entre 0,6 y 1 mg O₂ / L.

Para facilitar el movimiento del agua en el carrusel y evitar la sedimentación de sólidos, se dispone de seis agitadores de baja velocidad.

El agua tratada es bombeada mediante dos conducciones hacia el sistema de decantación y extracción de lodos, llamado sistema de flotación de lodos secundarios, donde se separa la materia en suspensión del agua.

Flotación por aire disuelto (DAF) de fangos secundarios

El objetivo del sistema de flotación por aire disuelto de fangos secundarios, es separar del agua procedente del reactor biológico todos los sólidos que están presentes después de las reacciones biológicas. (Fig.1)

Desde el reactor biológico y mediante cuatro bombas de impulsión con una capacidad de 120 m³/h, la masa de agua tratada es enviada al sistema de flotación por aire disuelto de fangos secundarios.

El sistema dispone de dos unidades de flotación, con un volumen de 75m³ cada uno.

El funcionamiento es el mismo que el de la Flotación por Aire Disuelto primaria.

Los lodos separados son enviados al tanque homogeneizador de los fangos secundarios (línea de lodos), una parte se envía al sistema de deshidratación de fangos y la otra recircula al reactor biológico para alimentar el reactor con los llamados lodos activados.

El agua clarificada pasará a través de un equipo que mide la turbidez del agua (turbidímetro), que se encuentra calibrado de manera que, si se supera un determinado valor de unidades de turbidez, impide el vertido y devuelve toda el agua al reactor biológico.

Finalmente, el agua es enviada hacia el canal Parshall para su vertido al alcantarillado municipal.



Figura 1 Sistema de flotación por aire disuelto (DAF) de fangos secundarios

Línea de lodos

El objetivo de la línea de fangos es extraer los fangos y sólidos generados en todo el proceso de depuración y posteriormente deshidratarlos para disminuir su contenido de humedad (hasta alrededor de un 80% de humedad), facilitando así, su posterior gestión.

La instalación de la línea de fangos, está preparada para tratar los lodos primarios (DAF primario, desarenador y el separador de sólidos sedimentados en el interior del DAF primario) y los secundarios (DAFs secundarios) de manera totalmente separada.

El motivo de la diferenciación de las dos líneas se promueve por el claro potencial uso final de cada lodo. Los fangos secundarios presentan una ausencia de patógenos, lo que lo hacen apto para su potencial uso directo en campos de cultivo.

En ambos casos de los lodos, se envían a dos depósitos homogeneizados de 75 m³ de capacidad cada uno y posteriormente son bombeados hacia a la centrifuga para su deshidratación. (Fig. 2)

Durante la impulsión, se añade una mezcla de floculante procedente de la central de floculante de centrifugas, para mejorar el rendimiento del proceso de separación sólido-líquido.

Las aguas obtenidas del proceso de deshidratación, son enviadas por gravedad al pozo de bombeo y volverán a comenzar la depuración.



Figura 2 Centrífuga para la deshidratación de los fangos

3.1.1 Volumen de aguas residuales a tratar

El volumen de agua a tratar diariamente se estima en 3.350 m³ (Tabla 5).

Tabla 5 Caudal de tratamiento en la estación depuradora de aguas residuales

Caudal de vertido				
Nº de horas/día con vertido	Nº de días/año con vertido	Caudal anual m ³ /año	Caudal medio vertido m ³ /día	Caudal máximo vertido m ³ /hora
24	365	874.350	3.350	250

3.1.2 Producción de lodos

La producción de lodos totales en la EDAR es de 70 toneladas/día, de los cuales el 70% son lodos primarios y el 30% lodos secundarios (depurados).

3.2 Ensayo en laboratorio

El ensayo en laboratorio consistió en la realización de una hidrólisis química con ácido sulfúrico para evaluar el contenido de materia recalcitrante en el lodo depurado con la finalidad de poder determinar el grado de estabilidad de la muestra orgánica.

3.2.1 Materia orgánica

Para el experimento se utilizó el lodo proveniente de una EDAR que depura las aguas de un matadero de porcino.

3.2.2 Procedimiento

3.2.2.1 *Preparación de la muestra*

La muestra llegó al laboratorio con un porcentaje de humedad del 96% y fue refrigerada en una cámara frigorífica a 4 °C hasta su secado.

El secado de la muestra se realizó en dos procesos. En primer lugar, se evaporó el agua en exceso mediante una placa calefactora a 150 °C alrededor de 170 min (Fig.4). A continuación, se introdujo la muestra en una estufa de aire forzado durante 24 horas a 105 °C (Fig 3) (Ramírez, 2011; Solina, 2019).

Una vez seca, se molturó manualmente con un mortero hasta obtener un tamaño de partícula menor a 0,15 mm y se tamizó para obtener mejor uniformidad (Fig 5). Se repartió la muestra en 6 vasos de plástico, conteniendo 1,5 g cada vaso (3 por experimento) y fueron guardados en una estufa a 70 °C para mantener la sequedad de las muestras.

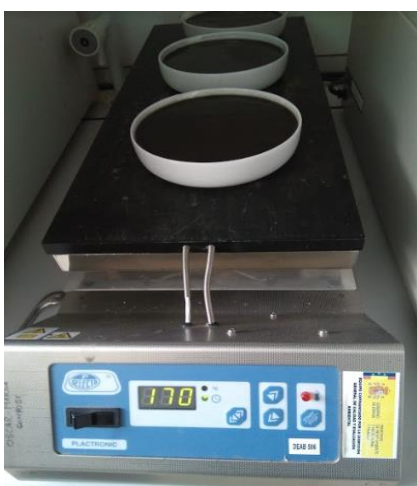


Figura 3 Muestra secándose en la placa calefactora



Figura 4 Muestra a la salida de la estufa



Figura 5 Tamiz de luz de malla de 150 micras

3.2.2.2 Hidrólisis por Método Klanson

Para la realización de la hidrólisis ácida por el método Klanson, se tomaron las directrices de estudios anteriores (Klanson ,1910; MAB, 1971; Ramírez, 2011; Solina, 2019) para poder realizar las dos etapas de las que consta dicho método: hidrólisis 1 e hidrólisis 2 (Fig. 7).

En la primera hidrólisis, se tomó la muestra de 1,5 g ($\pm 0,1$ mg) y se agregaron 15 mL de H₂SO₄ 26 N, se mantuvo a temperatura ambiente y se agitó la mezcla cada 15 minutos durante 3 h para uniformizar la composición (Fig 6).

Pasadas las 3 horas, la muestra se traspasó a un Erlenmeyer de 1000 mL al que se le añadieron 400 mL de agua destilada y se sometió a una segunda hidrólisis mediante reflujo (a temperatura de 180°C) durante 5 horas. Al finalizar el reflujo, se filtró el contenido del Erlenmeyer usando crisoles filtrantes de 40-70 μ m. Se lavó con agua destilada los residuos dentro del Erlenmeyer y se filtraron junto al contenido.

Finalmente, los crisoles con el contenido no hidrolizado se secaron a 105°C durante 24 horas en la estufa y una vez secos, se determinó su masa (Ramírez, 2011).



Figura 6 Primera hidrólisis del método Klanson

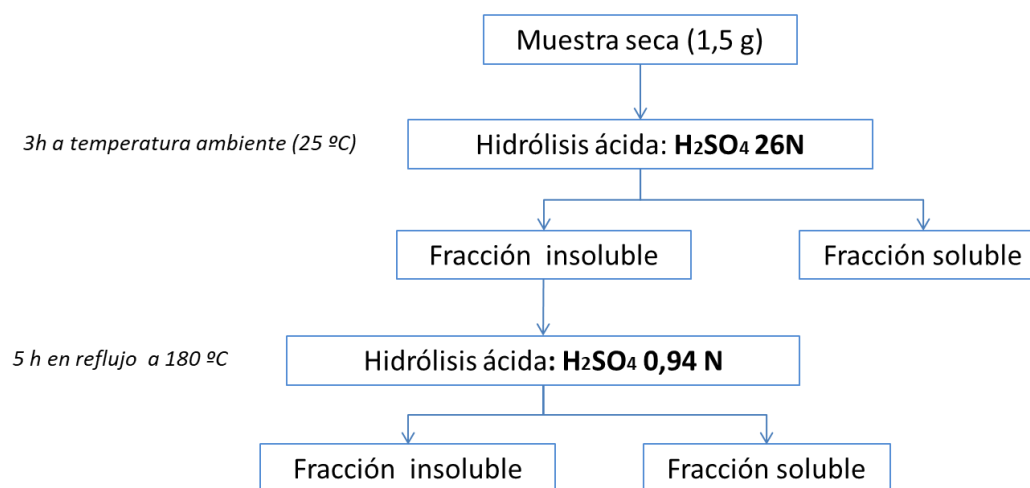


Figura 7 Método Klanson (MAB, 1971)

3.2.2.3 Hidrolisis por el Método Van Soest & Goering

El método Van Soest y Goering, que se utilizó para el experimento, fue la versión adaptada de Binner, et al. (1997).

El procedimiento de este método también contó con dos etapas de hidrolización; la primera consistía en tomar una muestra de 1,5 g ($\pm 0,1$ mg) seca y molida (0,15mm), se agregó 100 mL de una solución ácida que contiene detergente (20g de cetiltrimetil-amonio-bromuro disuelto en H_2SO_4 0,94 N + 2 mL de decahidronaftaleno) y se mantuvo a reflujo durante 1 hora a 180 °C. La fracción no hidrolizada de la muestra se separó por filtración mediante unos papeles filtrantes de 8 micras. Dichos papeles, que contenían la fracción no hidrolizada, fueron sometidos a la segunda hidrólisis, al añadir en un vaso el papel filtrado y 15 ml de H_2SO_4 13 M que se dejó reaccionar durante 3 horas a temperatura ambiente y fue removido cada 15 minutos para uniformizar la degradación (Solina, 2019).

Una vez acabadas las 3 horas, la muestra se traspasa a un crisol de 35 micras de poro para poder realizar la filtración mediante la aspiración al vacío.

Una vez filtrada la muestra en el crisol, se lleva a la estufa por lo menos 20 horas hasta que esté totalmente seco. El experimento termina cuando se compara el peso seco final y el peso del crisol sin la muestra hidrolizada (Fig 8-10).

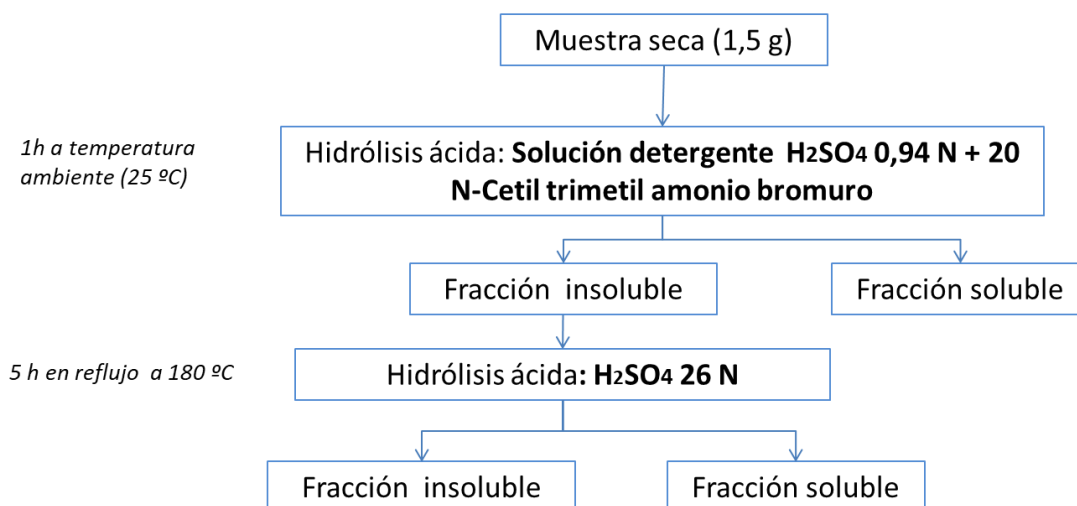


Figura 8 Método Van Soest modificado por Binner et. al. 1997



Figura 10 Reflujo de las muestras del método Van Soest



Figura 9 Aspiración al vacío para la filtración de la última hidrólisis del método Van Soest

3.2.3 Determinación del grado de estabilidad

Para la determinación del grado de estabilidad se tomó la fórmula [1] utilizada en el estudio de López *et al.* (2010) que sirvió de base para determinar el parámetro exigido por la Agència de Residus de Catalunya (ARC).

$$[1] \%SD = \%ROM / \%TOM * 100$$

Donde %SD: grado de estabilidad en porcentaje, %ROM= porcentaje de materia orgánica, %TOM: porcentaje de materia orgánica total

3.3 Ensayo en invernadero

3.3.1 Material vegetal

El material vegetal utilizado fue rábano (*Raphanus sativus*) variedad “Rabanito Redondo” de la empresa Semillas Fitó.

Se emplearon un total de 140 semillas que fueron sembradas en grupos de 4 en cada contenedor cilíndrico de cristal opaco de 2,5 L con forma de botella invertida (Calderón-Preciado, 2012; Nadal, 2015; Hurtado et al. 2016; Jaray, 2019).

3.3.2 Características del suelo

La fracción de suelo que se utilizó para el experimento procedía de una parcela situada en la finca experimental Agròpolis de la Universitat Politècnica de Catalunya (Camí de Les Filipines 110, 08840 Viladecans - Barcelona (UTM: 41.289183, 2.044762)).

Para facilitar el drenaje, previamente a la incorporación del suelo al contenedor, el mismo fue tamizado a 5 mm y mezclado con arena en proporción 3:1 en volumen

3.3.3 Agua de riego

Para el riego de las plantas, se utilizó un sistema de riego por goteo. El agua suministrada provenía de un depósito donde se almacenaban las aguas pluviales, procedentes de la cubierta del invernadero y agua de red pública.

3.3.4 Fertilizantes

Los fertilizantes utilizados en el experimento fueron los siguientes:

3.3.4.1 Fertilizante mineral

Nitrato amónico (34% N)
Superfosfato (43.6% P₂O₅)
Sulfato potásico (54% K₂O)

3.3.4.2 Fertilizante orgánico

1.1 Lodo tratado proveniente de una EDAR de matadero de porcino.

Dichos lodos fueron analizados por el laboratorio Braut Eix Ambiental, S.L. y sus resultados se muestran en la Tabla 6

Tabla 6: Análítica de una muestra refrigerada de lodos tratados. (sms: sobre muestra seca).

Parámetro	Unidades	Resultado
Materia seca	%	4,1
Materia orgánica	% sms	86,3
Cenizas (materia mineral)	% sms	13,7
Nitrógeno Kjeldhal	% N sms	8,37
Nitrógeno amoniacal	% N-NH ₄ ⁺ sms	0,15
Relación C/N	-	5,2
Cadmio	mg Cd/kg sms	<0,7
Cobre	mg Cu/kg sms	95,4
Cromo total	mg Cr/kg sms	<10
Nitratos	mg/kg N-NO ₃ ⁻ sms	680
Mercurio	mg Hg/kg sms	<0,2
Níquel	mg Ni/kg sms	10,6
Plomo	mg Pb/kg sms	16,4
Zinc	mg Zn kg sms	378
Nitritos	mg/kg N-NO ₂ ⁻ sms	50,6
Fósforo total	% P sms	0,13
Potasio	% K sms	0,04

3.3.5 Tratamientos realizados

En este ensayo las variables analizadas fueron:

- 3 Tipos de fertilización (control, mineral y orgánica)
- 3 Dosis para cada tipo de fertilizante mineral u orgánico

En consecuencia, el número de tratamientos fueron 7:

(2 fertilizantes x 3 dosis) + Control = 7 tratamientos

Asimismo, para cada tratamiento se realizaron 5 repeticiones. Así el número total de contenedores utilizado fue de 35.

3.3.6 Diseño del experimento

3.3.6.1 Dosificación de fertilizantes

El diseño se basó en la dosificación del fertilizante según la cantidad de extracción de nitrógeno en el rábano. La extracción media de N que se consideró fue de 80 UF (kg/ha) (Pomares y Ramos, 2010).

a) Orgánico

En base a esta extracción se optó por formular de 3 dosis (Tabla 7) una inferior a la extracción, otra la propia extracción y otra superior. Las cantidades de lodo incorporadas al cultivo se calcularon en base su contenido en Nitrógeno Kjeldhal (N_{NTK}).

Tabla 7: Dosificaciones de fertilizante orgánico

Nº de dosis Lodo	% Extracción	UF	g dosis/planta
D1	50%	40	29
D2	100%	80	58
D3	200%	160	116

El cálculo detallado de las dosificaciones se encuentra en el **Anexo 1**.

b) Mineral

En cuanto a la dosificación del fertilizante mineral, se utilizaron las proporciones de especificadas anteriormente de acuerdo a sus extracciones (Tabla 8).

Tabla 8: Tipos de fertilizantes (UF = Unidad fertilizante kg/ha)

Fertilizantes		UF
Nitrato amónico	N	80
Superfosfato	P ₂ O ₅	30
Sulfato potásico	K ₂ O	90

Por lo tanto, las dosis finales aplicadas al cultivo se describen en la Tabla 9.

Tabla 9: Dosificaciones de fertilizante mineral

Dosis mineral	Nitrato amónico	Superfosfato	Sulfato potásico
	g /planta		
D1	0,39	0,06	0,14
D2	0,78	0,11	0,28
D3	1,56	0,22	0,56

3.3.7 Procedimiento del montaje

El procedimiento de montaje del experimento se basó en el empleado en dos estudios anteriores (Nadal, 2015; Jaray, 2019) realizado con una diferente especie, pero con el mismo tipo de contenedor y en condiciones de invernadero (Fig 11); el procedimiento fue el siguiente:

1. Limpieza y enumeración de todos los contenedores.
2. Mezcla de suelo y fertilizante.
3. Colocación de un filtro de lana de roca en el cuello de la botella para evitar pérdidas de suelo.
4. Llenado de los contenedores con el suelo y disposición de los mismos en un soporte de madera.
5. Plantación de los rábanos, según sorteo aleatorio.
6. Colocación de los frascos de recogida del agua de drenaje conectado mediante tubo de plástica al cuello de los contenedores.
7. Conexión del sistema de riego por goteo a cada contenedor.



Figura 11 Montaje del ensayo en invernadero

3.3.7.1 Distribución de los tratamientos

Para evitar diferencias en los resultados de crecimiento y contenidos de clorofila, se decidió posicionar los 35 contenedores (7 tratamientos x 5 repeticiones) al azar, independientemente de su dosificación para evitar posibles variaciones ambientales del invernadero. En la Tabla 10 y Figura 12 se observa la localización final de cada planta-contenedor según su tratamiento.

Tabla 10: Posiciones de los contenedores

Tratamientos	Control	Dosis 1 mineral	Dosis 2 mineral	Dosis 3 mineral	Dosis 1 fango	Dosis 2 fango	Dosis 3 fango
Repeticiones	Nº posición contenedores						
1	31	13	18	25	26	9	1
2	35	6	3	20	28	29	19
3	23	7	15	16	24	11	30
4	4	27	17	37	12	39	2
5	8	14	21	5	10	22	33

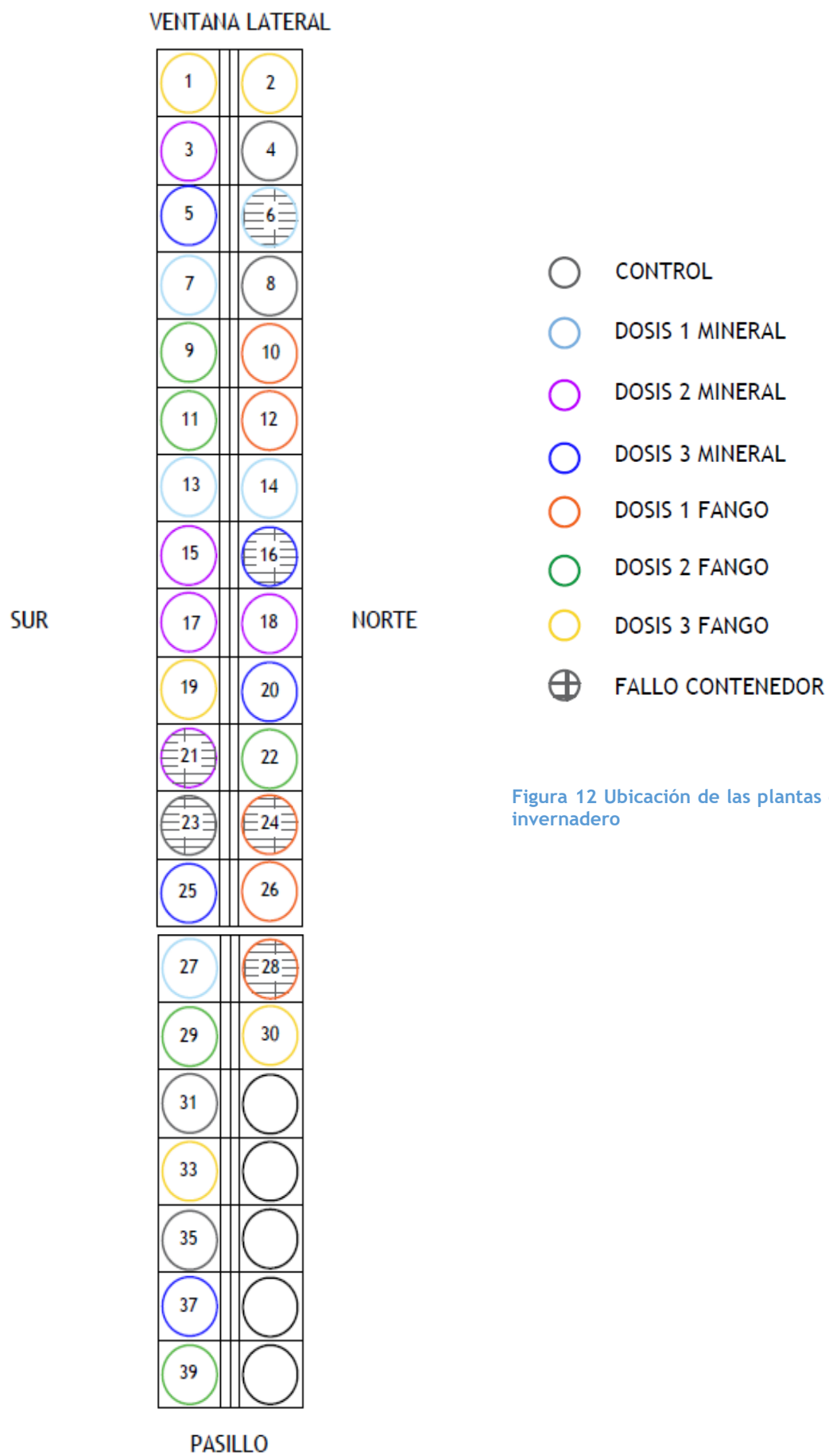


Figura 12 Ubicación de las plantas en el invernadero

3.3.7.2 Duración y condiciones del cultivo

El experimento en el invernadero comenzó el día 29/05/2019 con la siembra de las semillas de rábano y un primer riego manual (de 200 ml agua).

Cada semana se hizo un control evolutivo visual y a partir de la segunda semana, se empezaron a contar las hojas y a medir la de mayor tamaño.

Las plantas en la primera semana, se regaron 2 minutos por día y a partir de la segunda, se regaron 3 veces al día por dos minutos cada vez.

El experimento culminó el día 28/06/2019. La duración total del cultivo en el invernadero fue de 31 días.

En todo el tiempo que el cultivo estuvo en el invernadero, no se hizo falta realizar ningún tipo de tratamiento fitopatológico.

3.3.8 Determinación de la biomasa

La estimación de la biomasa final se determinó mediante el peso fresco y seco del cultivo. Después de cosechar los rábanos, cada uno fue pesado por partes (raíz y hojas) y también en conjunto.

En el caso del peso seco, los cultivos tuvieron que pasar previamente por un secado térmico a 80°C hasta peso constante en la estufa del laboratorio de fitotecnia de la ESAB.

3.3.9 Determinación de las clorofilas

Para llevar a cabo la determinación de las clorofilas a, b y total, se utilizó el aparato OPTI-SCIENCES CCM-200 para un total de 3 lecturas foliares por planta. Se muestrearon hojas plenamente desarrolladas.

Para la medición de la clorofila, se usaron valores de absorbancia transformados por Alvarado (2019) [1] [2] [3], quien calculó la recta de calibración que relaciona la concentración de clorofilas totales con la lectura del aparato.

$$\text{Clorofila A} \quad \rightarrow \quad y = 0.0154 * \ln(x) - 0.0172 \quad [1]$$

$$\text{Clorofila B} \quad \rightarrow \quad y = 0.003 * \ln(x) - 0.004 \quad [2]$$

$$\text{Clorofila total} \quad \rightarrow \quad y = 0.0193 * \ln(x) - 0.0212 \quad [3]$$

3.4 Tratamiento estadístico de los resultados

El tratamiento estadístico consistió en un análisis de varianzas y medias de los resultados en cuanto a coeficientes de grado de estabilidad, crecimiento de biomasa y medición de clorofilas.

El análisis de varianzas (ANOVA) se llevó a cabo mediante el método Tukey, que contó con un nivel de significación del 5% para el cálculo del p-valor; y finalmente, un test LSD para la agrupación de resultados similares.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Evaluación del agua residual

La analítica realizada con el agua residual entrante de la depuradora y que genera los lodos utilizados en este TFG se observan en la Tabla 11. Las características analíticas de estas aguas son las propias de una industria cárnica (Bohdziewicz & Sroka, 2006). Por esta razón, la carga contaminante es básicamente orgánica.

Tabla 11 Características del agua residual de un matadero de porcino (Fuente: proporcionada por el propio matadero)

Parámetro	Valor	Unidad
pH	5.-9.5	u. pH
Conductividad	2.800	µS/cm
MES	3.800	mg/l
DQO _{nd}	8.800	mg/l
DQO _d	3.700	mg/l
Nitrógeno Kjeldahl (NTK)	480	mg/l
Aceites y grasas	1.500	mg/l
Fósforo total	70	mg/l
Materias Inhibidoras	10	equitox

En la tabla 12, se muestra la analítica de los parámetros de salida de las aguas depuradas. Se observa que la eficiencia de la depuración es de al menos 90% en cuanto a degradación y eliminación de contaminantes.

Tabla 12 Características del agua depurada (Fuente: proporcionada por el propio matadero)

Parámetro	Valor	Unidad
pH	7	u. pH
Conductividad	2.500	µS/cm
MES	40	mg/l
DQO _d	40	mg/l
Nitrógeno Kjeldahl (NTK)	12,5	mg/l
Aceites y grasas	10	mg/l
Fósforo total	5,9	mg/l
Materias Inhibidoras	<2	equitox

Así como estas aguas depuradas presentan valores muy inferiores de contaminación, respecto al Decreto 130/2003, los lodos secundarios producidos muestran valores por debajo de los requerimientos de la ARC y de la normativa estatal (RD 1310/1990) en cuanto a los límites permitidos de metales pesados, contaminantes microbiológicos y características físico químicas, para la valorización y utilización de lodos como fertilizante orgánico (Tabla 13).

Tabla 13 Análisis de las características de los lodos secundarios.

Parámetro	Unidades	Resultado
Materia seca	%	4,1
Materia orgánica	% sms	86,3
Cenizas (materia mineral)	% sms	13,7
Nitrógeno Kjeldhal	% N sms	8,37
Nitrógeno amoniacal	% N-NH ₄ ⁺ sms	0,15
Relación C/N	-	5,2
Cadmio	mg Cd/kg sms	<0,7
Cobre	mg Cu/kg sms	95,4
Cromo total	mg Cr/kg sms	<10
Nitratos	mg/kg N-NO ₃ ⁻ sms	680
Mercurio	mg Hg/kg sms	<0,2
Níquel	mg Ni/kg sms	10,6
Plomo	mg Pb/kg sms	16,4
Zinc	mg Zn kg sms	378
Nitritos	mg/kg N-NO ₂ ⁻ sms	50,6
Fósforo total	% P sms	0,13
Potasio	% K sms	0,04
Escherichia Coli	u.f.c./g	<10
Salmonella spp.	Presencia/Ausencia en 25 g	Ausencia

No se disponen resultados de la caracterización de los lodos primarios, no obstante, es de esperar que su composición presente mayor grado de contaminación que los lodos secundarios antes señalados.

4.2 Grado de estabilidad

El grado de estabilidad obtenido por cada uno de los métodos utilizados ha sido inferior al propuesto por la ARC que es de un 25% (Departament de Territori i Sostenibilitat, 2017). Cabe señalar que este valor referencial que toma la ARC corresponde a diversos análisis realizados por López et al. (2010) y que en ningún caso contemplaron lodos depurados provenientes de la industria cárnica.

Los valores obtenidos en nuestro ensayo son en torno a un 9% para ambas metodologías que no han presentado resultados significativamente distintos (Tabla 14).

Tabla 14 Valores del grado de estabilidad según metodología analítica aplicada (valores no significativos)

Método analítico	Media	Desv.Est.
Klanson	9,62	2,16
Van Soest	9,23	2,16

En nuestro ensayo, el tiempo de aspiración del método Van Soest fue de 3 días y para el método Klanson aproximadamente 6 días. Esta duración generó que la materia no hidrolizada se pudiera haber degradado más de lo debido y en consecuencia perder más capacidad de estabilización. Asimismo, el hecho de que el tiempo de aspiración para ambos métodos sea mayor al que se previó, pudo deberse al alto contenido en nitrógeno de las muestras. Según el estudio realizado por Norman *et al.* (1934) cuando hay un alto contenido de nitrógeno en las muestras, en la segunda hidrólisis se tiende a precipitar la materia recalcitrante, haciendo que se formen proteínas y que sean difíciles de degradar; en consecuencia, se toman como materia orgánica no hidrolizada (lignina) cuando no lo es. Este hecho pudo actuar en nuestro caso como un efecto tapón ya que la materia no hidrolizada retuvo la parte soluble de la hidrólisis y permitió que se produjera una lentitud en la aspiración hasta después de varios días de degradarse.

Aun así, se compararon nuestros resultados con los obtenidos por Solina (2019). En su trabajo se calcula el grado de estabilidad para estaciones depuradoras de aguas urbanas. La comparación indica que los resultados del grado de estabilidad son similares en cuanto a lodos secundarios.

La regularización en cuanto al uso de lodos para la agricultura propuesta por la Agencia de Protección del Medio Ambiente (EPA) no considera la necesidad de analizar el grado de estabilidad como parámetro limitante en la calidad del lodo (USEPA, 1994).

El Real Decreto 1310/1990, tampoco considera al grado de estabilidad como un parámetro limitante para su valorización como lodos.

4.3 Ensayo en invernadero

Debido a las altas temperaturas (Dell' Aquilla, 2005; Abdel, 2015) que se presentaron en el tiempo de siembra, hubo contenedores donde las semillas de rábano no germinaron, por ende, se tomaron como fallos y fueron retirados de la experimentación. La dosis DF1 fue la más afectada ya que se tuvieron que eliminar dos de las cinco repeticiones que teníamos. Asimismo, las dosis: Control, DM1 y DM2 también se vieron afectadas, quedando así 4 repeticiones por cada una.

En general, los contenedores afectados estaban localizados en una misma zona del ensayo.

4.3.1 Evolución del crecimiento vegetal

Como se mencionó en el apartado 3.3.7.2, cada semana se tomó nota de la evolución de los cultivos, fue a partir de la segunda semana cuando se empezó a realizar el conteo de hojas, y a partir de la tercera semana, la medición en longitud de la hoja más larga de cada cultivo.

En las gráficas de las figuras (Figura 13, Figura 14) se pueden observar las evoluciones de crecimiento de los rábanos durante toda la fase de experimentación en cuanto a número de hojas y el crecimiento de la hoja más grande de cada repetición. El número máximo de hojas desarrolladas fue entre 6 y 8, aunque no se detectaron diferencias significativas (Tabla 15 y 16). No obstante, en valores absolutos se observó que todos tratamientos con dosis mineral y DF2 presentaron el mayor número de hojas. En relación a la longitud de la hoja más desarrollada sobresale al final del experimento que las plantas abonadas con DM2 presentaron una mayor elongación. Cabe resaltar que las plantas desarrolladas con dosis mineral DM3 fueron perjudicados debido a la presencia de orugas y pulgones (posiblemente pertenecientes a los géneros *Pieris* y *Aphis*, respectivamente) que se encontraron en algunos contenedores y que evitaron el crecimiento de algunas hojas de la planta (Fig. 15 y 16).

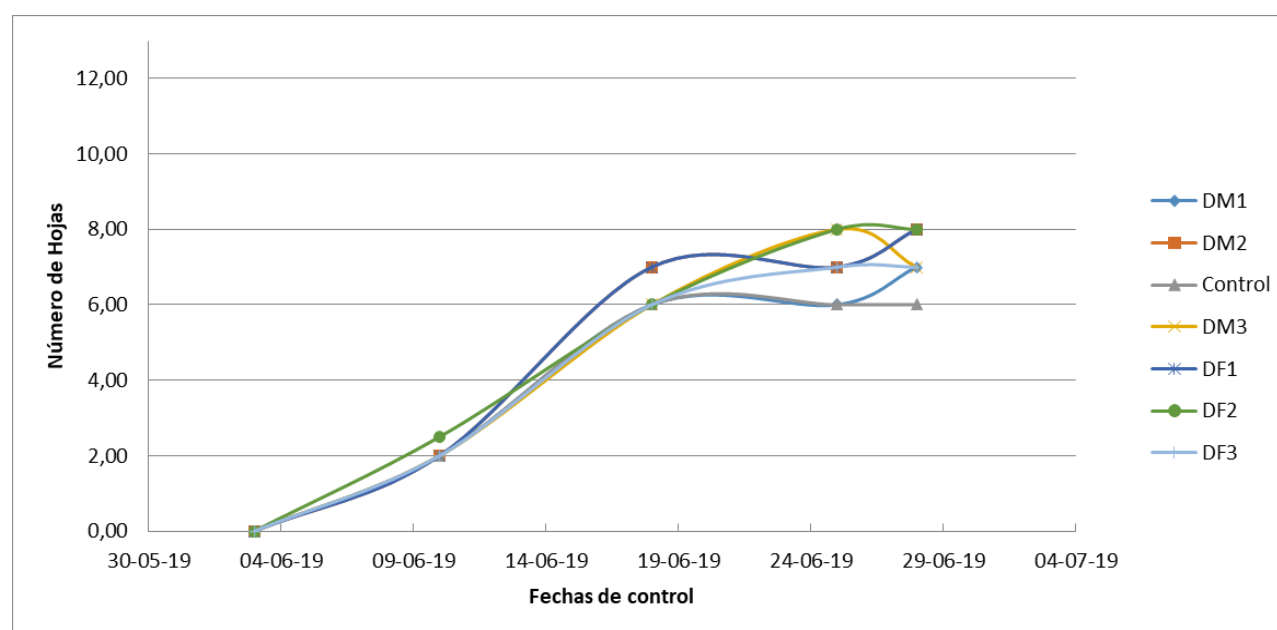


Figura 13 Evolución del número de hojas según las dosis de tratamiento. DM1: dosis mineral 1, DM2: dosis mineral 2, DM3: dosis mineral 3, DF1= dosis fango 1, DF2= dosis fango 2, DF3: dosis fango 3.

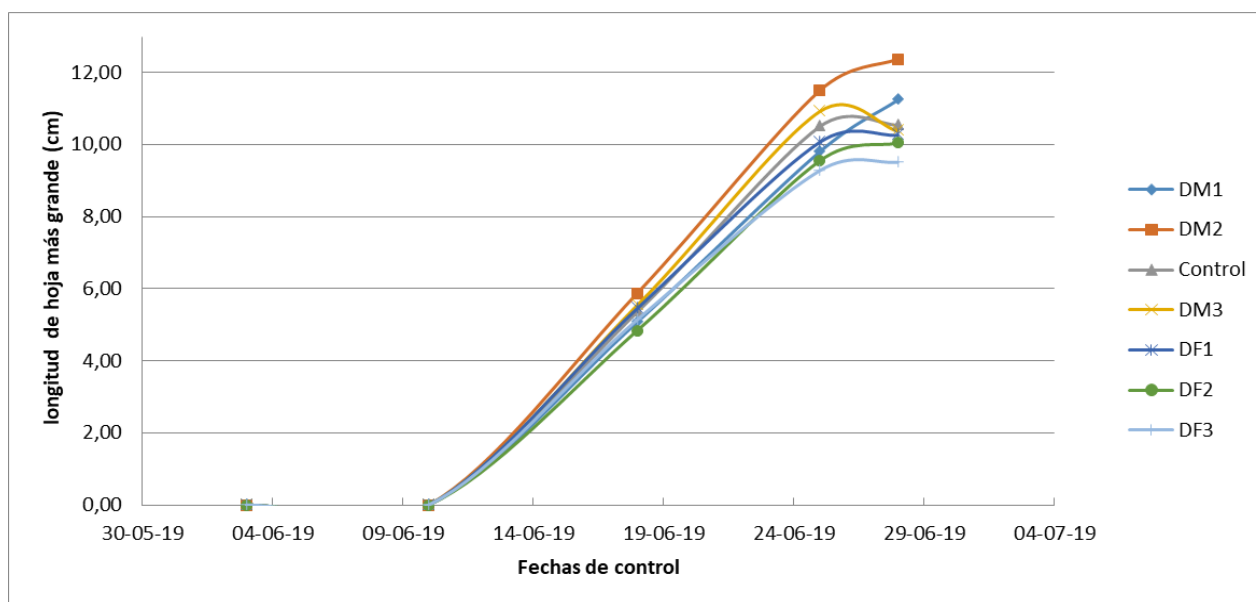


Figura 14 Evolución de la longitud de la hoja más grande según tratamiento. (DM1: dosis mineral 1, DM2: dosis mineral 2, DM3: dosis mineral 3, DF1= dosis fango 1, DF2= dosis fango 2, DF3: dosis fango 3).

Tabla 15: Resultados de la determinación de la cantidad de hojas según las dosis aplicadas. (DM1: dosis mineral 1, DM2: dosis mineral 2, DM3: dosis mineral 3, DF1= dosis fango 1, DF2= dosis fango 2, DF3: dosis fango 3, IC= índice de confianza). Resultados no significativos. p-valor: 0.95

DOSIS	Media del número de hojas	Desv.Est.	IC de 95%
Control	4	2,83	(0,96; 7,04)
DM1	4	3,03	(1,16; 7,24)
DM2	5	3,56	(1,76; 7,84)
DM3	5	3,44	(1,56; 7,64)
DF1	5	3,56	(1,76; 7,84)
DF2	5	3,54	(1,86; 7,94)
DF3	4	3,21	(1,36; 7,44)

Tabla 16: Resultados de la determinación de longitud de la hoja más larga de cada dosis. (DM1: dosis mineral 1, DM2: dosis mineral 2, DM3: dosis mineral 3, DF1= dosis fango 1, DF2= dosis fango 2, DF3: dosis fango 3, IC= índice de confianza). Resultados no significativos. p-valor: 0.95

DOSIS	Media del número de hojas	Desv.Est.	IC de 95%
Control	5	5,26	(0,48; 10,08)
DM1	5	5,29	(0,43; 10,02)
DM2	6	5,98	(1,16; 10,75)
DM3	5	5,33	(0,57; 10,16)
DF1	5	5,09	(0,36; 9,95)
DF2	5	4,90	(0,09; 9,68)
DF3	5	4,70	(-0,01; 9,58)



Figura 15 Hoja del cultivo DM3, dañada por gusanos



Figura 16 Hoja con presencia de pulgones

A pesar de la presencia de gusanos y pulgones en algunos en los tiestos, los resultados no variaron significativamente en cuanto a longitudes y pesos de los cultivos.

En cuanto a la distribución de los tratamientos, algunos de los cultivos posicionados al sur, cerca del pasillo, no pudieron germinar. Los cultivos DF1, DM1 y DM3 que se encontraban cerca a los cultivos fallados, coincidentemente, son los que contienen mayor clorofila. Posiblemente sea debido a que, en la zona central, la captación de luz era más directa ya que no tenía momentos de sombra.

4.3.2 Biomasa final

Para poder ponderar los resultados de la biomasa final, se pesaron las plantas enteras (totales) y por partes (aérea y radicular).

No se observaron diferencias significativas entre tratamientos en relación a la biomasa final fresca y seca (Tablas 17-19). No obstante, en valores absolutos se observa que las plantas fertilizadas con DM2 y DF1 son las que presentaron un mayor peso fresco y seco total.

Tampoco se han observado diferencias significativas en cuanto a los pesos secos y frescos de la parte aérea y radicular de los rábanos (Tablas 20-22). Los mayores pesos totales (fresco y seco) comentados anteriormente para los tratamientos DM2 y DF1 son debidos a un mayor desarrollo radicular, aunque no significativo.

Tabla 17: Resultados estadísticos del peso fresco total. (N= número de repeticiones, IC= índice de confianza, Dev.Est = desviación estándar). *Resultados no significativos.*

Peso fresco total	N	Media	Desv.Est.	IC de 95%
CONTROL	4	10,382	4,82	(5,91; 14,86)
DM1	4	9,262	5,90	(4,78; 13,73)
DM2	4	13,141	4,52	(8,67; 17,61)
DM3	5	10,175	3,64	(6,17; 14,16)
DF1	3	12,991	5,74	(7,83; 18,15)
DF2	5	9,374	3,82	(5,37; 13,37)
DF3	5	10,604	2,07	(6,60; 14,60)

Tabla 18: Resultados estadísticos del peso fresco aéreo. (N= número de repeticiones, IC= índice de confianza, Dev.Est = desviación estándar). *Resultados no significativos.*

Peso fresco aéreo	N	Media	Desv.Est.	IC de 95%
CONTROL	4	2,821	1,224	(1,88; 3,76)
DM1	4	3,0723	1,393	(2,13; 4,00)
DM2	4	3,224	1,061	(2,29; 4,16)
DM3	5	3,605	0,611	(2,76; 4,44)
DF1	3	3,725	1,042	(2,64; 4,80)
DF2	5	2,130	0,621	(1,29; 2,97)
DF3	5	2,210	0,171	(1,37; 3,05)

Tabla 19: Resultados estadísticos del peso fresco de la raíz (N= número de repeticiones, IC= índice de confianza, Dev.Est = desviación estándar). *Resultados no significativos. p-valor:0.79*

Peso fresco raíz	N	Media	Desv.Est.	IC de 95%
CONTROL	4	7,564	4,231	(3,64; 11,49)
DM1	4	6,191	5,054	(2,26; 10,12)
DM2	4	9,923	3,582	(5,99; 13,84)
DM3	5	6,564	3,631	(3,05; 10,08)
DF1	3	9,275	4,803	(4,73; 13,80)
DF2	5	7,242	3,344	(3,73; 10,75)
DF3	5	8,391	2,212	(4,876; 11,902)

Tabla 20: Resultados estadísticos del peso seco total de la planta. (N= número de repeticiones, IC= índice de confianza, Dev.Est = desviación estándar). *Resultados no significativos.*

Peso seco total	N	Media	Desv.Est.	IC de 95%
CONTROL	4	1,071	0,261	(0,718; 1,425)
DM1	4	1,054	0,559	(0,700; 1,408)
DM2	4	1,385	0,369	(1,031; 1,739)
DM3	5	1,199	0,263	(0,882; 1,515)
DF1	3	1,180	0,395	(0,771; 1,588)
DF2	5	0,929	0,347	(0,612; 1,245)
DF3	5	0,920	0,135	(0,6036; 1,2366)

Tabla 21: Resultados estadísticos del peso seco de la parte aérea de la planta. (N= número de repeticiones, IC= índice de confianza, Dev.Est = desviación estándar). *Resultados no significativos.*

Peso seco aéreo	N	Media	Desv.Est.	IC de 95%
CONTROL	4	0,414	0,152	(0,2679; 0,5600)
DM1	4	0,471	0,238	(0,325; 0,617)
DM2	4	0,535	0,189	(0,3885; 0,6806)
DM3	5	0,558	0,115	(0,4271; 0,6883)
DF1	3	0,426	0,105	(0,2577; 0,5950)
DF2	5	0,290	0,089	(0,1594; 0,4207)
DF3	5	0,279	0,036	(0,1485; 0,4098)

Tabla 22: Resultados estadísticos del peso seco de la parte radicular de la planta. (N= número de repeticiones, IC= índice de confianza, Dev.Est = desviación estándar). *Resultados no significativos.*

Peso seco raíz	N	Media	Desv.Est.	IC de 95%
CONTROL	4	0,583	0,419	(0,277; 0,890)
DM1	4	0,583	0,419	(0,277; 0,890)
DM2	4	0,850	0,186	(0,5442; 1,1564)
DM3	5	0,641	0,278	(0,367; 0,915)
DF1	3	0,753	0,308	(0,400; 1,107)
DF2	5	0,639	0,271	(0,365; 0,913)
DF3	5	0,641	0,127	(0,3672; 0,9148)

A pesar de que no se contemplan diferencias significativas, se observó que los lodos a bajas dosis son los que muestran valores más altos.

Se puede señalar que las dosis más altas de lodos fueron las que menor peso total obtuvieron. Comparando con otro estudio en rábanos (Martinez, 2012) el poco de crecimiento podría deberse a algún tipo de fitotoxicidad por altas dosis de lodos, mas no debido al contenido de metales pesados, ya que su contenido es inferior a los límites propuestos por la normativa estatal (RD 506/2013). Según el estudio de Pérdomo (2019), quien también utilizó rábanos y lodos de depuradora de aguas municipales con dosis altas de metales pesados, no observó diferencias entre dosis de lodos altas y bajas en invernadero.

4.3.3 Determinación de clorofilas

El análisis estadístico de los resultados del contenido de clorofila (a, b y total) se muestran en las tablas 23-25. Para este parámetro los resultados obtenidos son significativamente diferentes entre tratamientos.

Los tratamientos control, minerales y DF1 son los que muestran mayor contenido de clorofila a, b y total. No obstante, las concentraciones de clorofilas de las dosis control y mineral no son significativamente distintas.

Según los resultados de la clorofila b, las dosis DM2, DF3 y Control, muestran unos resultados significativamente inferiores a las otras dosis DM1, DM3 y DF1 que concurrentemente, muestran un mayor contenido en clorofila b.

Finalmente, el análisis estadístico de los resultados de la clorofila total, muestra las diferencias significativas de todas las dosis, pero concordando que las dosis con mayor contenido de clorofila son las DM1, DM3 y DF1.

Siendo en cada caso la dosis DF1 la que mayor contenido de clorofila presenta.

Tabla 23 Resultados de la clorofila a. (IC= índice de confianza, Dev.Est = desviación estándar). *Resultados significativos.*

Clorofila a	Media	Desv.Est.	IC de 95%
Control	0,49054 abc	0,03171	(0,46600; 0,51509)
DM1	0,5174 ab	0,0485	(0,4929; 0,5419)
DM2	0,4794 abc	0,0415	(0,4548; 0,5039)
DM3	0,5174 ab	0,0484	(0,4928; 0,5419)
DF1	0,53139 a	0,01017	(0,50305; 0,55974)
DF2	0,4474 c	0,0596	(0,4255; 0,4694)
DF3	0,47313 bc	0,03141	(0,45117; 0,49508)

Tabla 24 Resultados de la clorofila b. (IC= índice de confianza, Dev.Est = desviación estándar). *Resultados significativos.*

Clorofila b	Media	Desv.Est.	IC de 95%
Control	0,008858 abc	0,000803	(0,008237; 0,009480)
DM1	0,009539 ab	0,001227	(0,008917; 0,010160)
DM2	0,008576 ab	0,001051	(0,007954; 0,009197)
DM3	0,009538 ab	0,001226	(0,008917; 0,010160)
DF1	0,009893 a	0,000257	(0,009175; 0,010611)
DF2	0,007767 c	0,00151	(0,007211; 0,008323)
DF3	0,008417 bc	0,000795	(0,007861; 0,008973)

Tabla 25 Resultados de la clorofila total. (IC= índice de confianza, Dev.Est = desviación estándar). Resultados no significativos.

Clorofila total	Media	Desv.Est.	IC de 95%
Control	0,04243 abc	0,00397	(0,03991; 0,04496)
DM1	0,0458 ab	0,00607	(0,04194; 0,04966)
DM2	0,04103 abc	0,0052	(0,03773; 0,04434)
DM3	0,0458 ab	0,00607	(0,04194; 0,04965)
DF1	0,047552 a	0,001274	(0,046573; 0,048532)
DF2	0,03703 c	0,00747	(0,03289; 0,04117)
DF3	0,04025 bc	0,00394	(0,03807; 0,04243)

Se contrastaron los resultados con el estudio de Alvarado (2019) quien utilizó la misma especie de cultivo, pero con otro tipo de fertilizantes orgánicos (purines y compost). Se comprobó que el contenido de clorofilas totales en este experimento es significativamente mayor a comparación de los resultados del estudio mencionado. Asimismo, el estudio realizado por Khaliq, et. al. (2017) en rábanos, también muestra valores inferiores en comparación a los resultados de este experimento.

Estos hechos se podrían justificar con algunos estudios que mencionan que existe una relación positiva entre nivel de nitrógeno y el contenido de clorofilas de los cultivos (Yu-Kui et al., 2009; Rambo et al., 2010) Por lo que se podría deducir que la acumulación de nitrógeno fue mayor con los lodos del experimento.

COMENTARIO FINAL:

Si bien los lodos “poco estabilizados” pueden generar un exceso en el contenido de fósforo y nitrógeno del suelo, también se ha demostrado que puede beneficiar el crecimiento vegetal de diferentes tipos de cultivos. (Bernat et. al., 2001)

En general, la ACA, ARC y este estudio, concuerdan que la apuesta por la valorización de los lodos depurados es una opción muy factible para evitar los sobrecostes y la pérdida energética que suponen los diferentes tratamientos de lodos y que, en casos como la industria cárnica, la calidad de sus lodos demuestra su potencial agronómico y su casi nula incidencia en cuanto a contaminantes inorgánicos, metales pesados y contaminantes microbiológicos.

De la misma forma, es necesario adecuar las dosificaciones de los lodos en cuanto a los criterios agronómicos y en lo que respecta a la calidad de suelo, para poder asegurar su buen uso como fertilizante y evitar cualquier riesgo derivado a toxicidades; aunque en la mayoría de casos, su contenido no sea significativo (Smith, 2009).

CONCLUSIONES

5. CONCLUSIONES

Las principales conclusiones de este trabajo, se justifican en los siguientes puntos:

- El agua residual de un matadero de porcino es propia de una industria alimentaria.
- El grado de estabilidad del lodo depurado es de 9%, el cual no lo hace apto para su valorización agronómica en Cataluña de acuerdo a la legislación vigente.
- Los ensayos de invernadero mostraron resultados no significativos en cuanto al número de hojas producidas, la longitud de las hojas más grandes, pesos totales, pesos radiculares y aéreos, según el tipo de fertilizante administrado. Aun así, se observa una tendencia de mayor crecimiento con bajas dosificaciones de lodos.
- Los resultados de contenido en clorofilas (a,b y totales) mostraron valores significativos con la dosis más baja de lodos, demostrando así su potencial acumulador de nitrógeno en el cultivo de rábanos.

REFERENCIAS



6. BIBLIOGRAFIA

- Abdel, C. G. (2015). *Germination performance of four Radish (Rhanus sativus L . Var sativus) seeds under varying temperatures.* (May), 355-360.
- Agència Catalana de l'Aigua. 2019. *La gestió dels biosòlids a Catalunya.* Retrieved from http://aca.gencat.cat/web/.content/10_ACA/J_Publicacions/07-estudis-informes/10_gestio_biosolids_a_catalunya.pdf
- Agència de Residus de Catalunya. 2019. Nova guia sobre la codificació, la classificació i les vies de gestió dels residus a Catalunya. Publicada el 26 de febrero de 2019.
- Alvarado, A. 2019, Efecte de la incorporació de diferents adobs orgànics en el desenvolupament i contingut de lípids, sucres i clorofil·les en cultiu d'hortalisses. (No publicado)
- Bayona, J.M., Matamoros, V., 2017. Dinámica de la acumulación de antibióticos, metales y genes de resistencia bacteriana en cultivos agrícolas por fertilización orgánica. Implicaciones en la producción vegetal y seguridad alimentaria. Memoria científica técnica del proyecto AGL2017-89518-R., pp 20.
- Binner, E., Lechner, P., Winderi, M. y Zach, A. 1997. Labor test methods Characterizing the biological reactivity of wastes. 6th international Landfill Symposium. SARDINIA. October 13-17. Cagliari/Italy.
- Bohdziewicz, J., & Sroka, E. 2006. Application of hybrid systems to the treatment of meat industry wastewater. *Desalination*, 198(1-3), 33-40. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2006.09.006>
- Dell' Aquila A. 2005. The use of image analysis to monitor the germination of seeds of broccoli (Brassica oleracea) and radish (Raphanus sativus). *Annals of Applied Biology*, 146:545-550
- Departament de Territori i Sostenibilitat. 2017. Decret 152/2017, de 17 d'octubre, sobre la classificació, la codificació i les vies de gestió dels residus a Catalunya. *Diari Oficial de La Generalitat de Catalunya*, 1-70. Retrieved from http://mediambient.gencat.cat/ca/05_ambits_dactuacio/patrimoni_natural/fauna-autoctona-protegida/centres-fauna-salvatge-animals-ferits/funcions-centres-recuperacio/cria-en-captivitat/trencalos/
- Harrison, E. Z., McBride, M. B., & Bouldin, D. 1999. Land application of sewage sludges: an appraisal of the US regulations. *International Journal of Environment and Pollution*, Vol 11, no 1, 1999. Disponible en < <https://ecommons.cornell.edu/handle/1813/5299>> Visto en 7/07/19
- Khalig, S. J. A., Al-Busaidi, A., Ahmed, M., Al-Wardy, M., Agrama, H., & Choudri, B. S. (2017). The effect of municipal sewage sludge on the quality of soil and crops. *International Journal of Recycling of Organic Waste in Agriculture*, 6(4), 289-299.
- Klason, P. 1908. Chemical composition of deal (Fir Wood). *Ark. Kemi, Mineral Geol.* 3:1-10.
- Klason, P., 1910. Determination of lignin in sulphite wood pulp. *Papierfabr*, 8: 1285-1286.
- López, M., Huerta-Pujol, O., Martínez-Farré, F. X., & Soliva, M. (2010). Approaching compost stability from Klason lignin modified method: Chemical stability degree for OM and N quality assessment. *Resources, Conservation and Recycling*, 55(2), 171-181.
- Lu, Qin; He, Zhenli L.; Stofella, Peter J. Land application of biosolids in the USA: A review. *Applied and Environmental Soil Science*, 2012, vol. 2012.

- M.A.B. 1971. Ministère de l'Agriculture de Belgique. Mtde. Convention pour l'Analyse des Engrais et des Amendements du sol. Div. B Ad. Services Economiques d'Inspection des Matières Premières. Part. II. pp. 202-203.
- Martinez, Y. (2012). *Evaluación de la fitotoxicidad de lodos residuales de industrias alimenticias y papeleras*. (April). <https://doi.org/10.13140/2.1.3001.6007>
- Norman, A. G. y Jekins, S. H. 1934a. The determination of lignin. II. Errors introduced by the presence of certain proteins. *Biochem J.* 28:2160-2168
- Pérdomo, A. 2019. Efecte de la presencia de metalls pesants (Zn i Cu) en el desenvolupament i contingut de lípids, sucres i clorofil·les en cultiu d'hortalisses. (No publicado)
- Rambo, L., Ma, B.L., Xiong, Y., da Silvia, P.R.F., 2010. Leaf and canopy optical characteristics as crop-n-status indicators for field nitrogen management in corn. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 173: 434-443. <https://doi.org/10.1002/jpln.200900022>
- Ramírez M. G. 2011 Determinación de la mineralización del Nitrógeno del purín de cerdo secado térmicamente mediante hidrólisis, incubaciones y ensayos de campos, incubaciones y ensayos de campo. Tesis doctoral UPC-DEAP.
- Smith, S. R. (2009). Organic contaminants in sewage sludge (biosolids) and their significance for agricultural recycling. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 367(1904), 4005-4041. <https://doi.org/10.1098/rsta.2009.0154>
- Solina M. 2019. Comparació de dos mètodes d'hidròlisi àcida per estimar l'estabilitat de la matèria orgànica en fangs de depuradora. (No publicado)
- USEPA. (1994). EPA A Plain English Guide to the EPA Part 503 Biosolids Rule Excellence in compliance through. *Epa-832/R-93/003*, (September).
- Yu-Kui, R., Yun-Feng, P., Zheng-Rui, W., Jian-Bo, S., 2009. Stem perimeter, height and biomass of maize (*Zea mays* L.) grown under different N fertilization regimes in Beijing, China. *Int. J. Plant Prod.* 3: 85-90.

ANEXO 1: CÁLCULOS DE LAS DOSIS DE LOS FERTILIZANTES MINERAL Y ORGÁNICO

ANEXO 1: CÁLCULOS DE LAS DOSIS DE LOS FERTILIZANTES: MINERAL Y ORGÁNICO**Cultivo de rábanos en invernadero****- Características de contenedores:**

- De acuerdo con la tesis de Carlos Hurtado: el Volumen 2,5 L / botella y se llena con 2,3 kg de tierra secada al aire.

- Necesidades de suelo:

- Tratamientos (control + 1 orgánico + 1 mineral)
 - Fertilización (Control + 1 orgánico (lodos EDAR) + 1 mineral)
 - Dosis de fertilizante: 3 (Extracción, ½ extracción, doble extracción)

Total tratamientos = 7

- Repeticiones/tratamiento: 5 → total contenedores= 35
- Total 35 contenedores x 2,5 L de suelo/contenedor ≅ 87.5 L de suelo (90 kg aprox.)

- Extracciones de rábano:

- Extracciones del rábano:

N = 80-100 kg/ha; P₂O₅ = 30-50 kg/ha, K₂O = 160-210 kg/ha (Pomares y Ramos, 2010)

$$\frac{100 \text{ kg N}}{\text{ha}} \times \frac{1 \text{ ha}}{1.500 \text{ m}^3} \times \frac{1000 \text{ g N}}{1 \text{ kg N}} \times \frac{1 \text{ m}^3}{1000 \text{ L}} \times \frac{2,5 \text{ L}}{\text{planta}} = 0,17 \text{ g/planta}$$

Para 80 kg N/ha

$$\frac{80 \text{ kg N}}{\text{ha}} \times \frac{1 \text{ ha}}{1.500 \text{ m}^3} \times \frac{1000 \text{ g N}}{1 \text{ kg N}} \times \frac{1 \text{ m}^3}{1000 \text{ L}} \times \frac{2,5 \text{ L}}{\text{planta}} = 0.133 \text{ g/planta}$$

- **Lodos secundarios de depuradora (EDAR Matadero de porcino)**

- **Características lodos:**

- M.O. 86,3 % (sms) i 95,9 % humedad
- N = 5,58 (2/3 de 8,37) % sms
- Materia seca= 4.1 %

- **N=80 kg/Ha : Dosis 1 (1/2 extracción) N = 0.0665 g/planta**

$$\frac{0,0665 \text{ g N}}{\text{planta}} \times 5 \text{ repeticiones} \times \frac{100 \text{ g lodo seco}}{5.58 \text{ g N}} \times \frac{100 \text{ g lodo húmedo}}{4,1 \text{ g lodo seco}}$$

= 145 g lodos húmedos (29 g lodos húmedos/planta)

Dosis lodos	Lodos (g)/contenedor
Dosis 1 (0.0665)	29
Dosis 2 (0.133)	56
Dosis 3 (0.266)	126

○ Dosis Mineral

Nitrato amónico

$$\frac{0,0665 \text{ g N}}{\text{planta}} \times \frac{100 \text{ g ácido}}{34 \text{ g N}} \times \frac{1}{0,5 \text{ eficiencia}} = 0,39 \frac{\text{g NH}_4\text{NO}_3}{\text{planta}} \quad D1 \times 5$$

$$\frac{0,133 \text{ g N}}{\text{planta}} \times \frac{100 \text{ g ácido}}{34 \text{ g N}} \times \frac{1}{0,5 \text{ eficiencia}} = 0,78 \frac{\text{g NH}_4\text{NO}_3}{\text{planta}} \quad D2 \times 5$$

$$\frac{0,266 \text{ g N}}{\text{planta}} \times \frac{100 \text{ g ácido}}{34 \text{ g N}} \times \frac{1}{0,5 \text{ eficiencia}} = 1,56 \frac{\text{g NH}_4\text{NO}_3}{\text{planta}} \quad D2 \times 5$$

Dosis	nitrato amónico (g)/contenedor
Dosis 1 (0.0665)	0,39
Dosis 2 (0.133)	0,78
Dosis 3 (0.266)	1,56

Superfosfato

$$\frac{30 \text{ kg } P_2O_5}{\text{Ha}} \times \frac{1 \text{ Ha}}{1.500 \text{ m}^3} \times \frac{1.000 \text{ g } P_2O_5}{1 \text{ kg } P_2O_5} \times \frac{1 \text{ m}^3}{1.000 \text{ l.}} \times \frac{2,5 \text{ l.}}{\text{planta}} = 0,055 \frac{\text{g } P_2O_5}{\text{planta}} \quad D1 \times 5$$

$$\frac{0,05 \text{ g } P_2O_5}{\text{planta}} \times \frac{100 \text{ g fertilizante}}{45,8 \text{ g } P_2O_5} = 0,11 \frac{\text{g } P_2O_5}{\text{planta}} \quad D2 \times 5$$

$$\frac{0,11 \text{ g } P_2O_5}{\text{planta}} \times \frac{100 \text{ g fertilizante}}{45,8 \text{ g } P_2O_5} = 0,22 \frac{\text{g } P_2O_5}{\text{planta}} \quad D3 \times 5$$

Dosis	superfosfato (g) /contenedor
Dosis 1 (0.0665)	0,055
Dosis 2 (0.133)	0,11
Dosis 3 (0.266)	0,22

Sulfato potásico

$$\frac{90 \text{ kg } K_2SO_4}{\text{Ha}} \times \frac{1 \text{ Ha}}{1.500 \text{ m}^3} \times \frac{1.000 \text{ g } K_2SO_4}{1 \text{ kg } K_2SO_4} \times \frac{1 \text{ m}^3}{1.000 \text{ l.}} \times \frac{2,5 \text{ l.}}{\text{planta}} = 0,14 \frac{\text{g } K_2SO_4}{\text{planta}} \quad D1 \times 5$$

$$\frac{0,14 \text{ g } K_2SO_4}{\text{planta}} \times \frac{100 \text{ g fertilizante}}{45,8 \text{ g } K_2SO_4} = 0,28 \frac{\text{g } K_2SO_4}{\text{planta}} \quad D2 \times 5$$

$$\frac{0,28 \text{ g } K_2SO_4}{\text{planta}} \times \frac{100 \text{ g fertilizante}}{45,8 \text{ g } K_2SO_4} = 0,56 \frac{\text{g } K_2SO_4}{\text{planta}} \quad D3 \times 5$$

Dosis	sulfato potásico (g) /contenedor
Dosis 1 (0.0665)	0,14
Dosis 2 (0.133)	0,28
Dosis 3 (0.266)	0,56