

Memoria Libre

Índice

1. OBJETO 4

2. PLANIFICACIÓN DE LOS TRABAJOS 5

3. DESARROLLO DEL PROYECTO 7

3.1. ACTIVIDAD 1: ESTUDIOS PREVIOS. 7

3.1.1. Caracterización del proceso productivo de la explotación 7

3.1.2. Estudio de la generación de residuos en la comarca 11

3.1.3. Caracterización fisicoquímica de los residuos 16

3.2. ACTIVIDAD 2: VALORIZACIÓN DE LOS RESIDUOS MEDIANTE DIGESTIÓN ANAEROBIA 18

3.2.1. Diseño y construcción del sistema de digestión anaerobia 19

3.2.2. Determinación del potencial metanogénico de cada uno de los sustratos 19

3.2.3. Evaluación y análisis del proceso de digestión anaerobia en la planta piloto 21

3.2.4. Estudio de viabilidad técnico-económica del proceso de digestión anaerobia en granjas de pollo 22

3.3. ACTIVIDAD 3: PRODUCCIÓN DE BIOCHAR MEDIANTE PIRÓLISIS 23

3.3.1. Estudio del proceso de secado natural de la pollinaza 23

3.3.2. Caracterización fisicoquímica de la pollinaza 23

3.3.3. Ensayos de pirolisis a diferentes temperaturas y estudio del rendimiento a biochar 25

3.3.4. Caracterización físicoquímica del biochar 28

3.3.5. Estudio de viabilidad técnico-económica del proceso de pirolisis en granjas de pollo 30

3.4. ACTIVIDAD 4: VALORIZACIÓN AGRONÓMICA 31

3.4.1. Ensayo con patata: pollinaza, digestato y biochar 31

3.4.2. Ensayo trigo invierno: biochar 37

3.4.3. Ensayo trigo primavera: pollinaza y digestato 38

3.5. ACTIVIDAD 5: DIVULGACIÓN 40

3.5.1. Materiales Desarrollados: logo, tríptico y cartelería. 40

3.5.2. Presentación del proyecto en jornadas, ferias y congresos. 44

3.5.3. Publicaciones a través de notas de prensa y artículos divulgativos. 45

3.5.4. Generación de noticias y contenidos en web y redes sociales. 46

3.5.5. Organización de eventos: evento virtual de presentación y jornada de resultados. 48

4. ANEXOS 53

1. Objeto

Este documento tiene como objeto describir las tareas realizadas dentro del proyecto “APROAVI - APROVECHAMIENTO INTEGRAL DE LA POLLINAZA PARA LA MEJORA DE LA SOSTENIBILIDAD Y COMPETITIVIDAD DEL SECTOR AVÍCOLA – FEADER 2022/010B” y justificar técnicamente los resultados obtenidos.

El proyecto APROAVI pretende aplicar los criterios de economía circular mediante la gestión y tratamiento sostenibles de las deyecciones generadas en el sector avícola, mejorando así la competitividad y sostenibilidad de dicho sector promoviendo la obtención y uso de energía renovable, así como de fertilizantes aditivados. Para todo ello se evaluaron dos alternativas tecnológicas. Por un lado, se llevó a cabo la digestión anaerobia de la pollinaza mezclada con residuos agrícolas mayoritarios de la zona de estudio, con objeto de maximizar la generación de biogás y la obtención de fertilizantes en forma de digestato anaerobio. Por otro lado, se evaluó el uso de la pollinaza como biocombustible en un proceso de pirólisis, en el que además de un gas con poder calorífico se generó biochar. En una última etapa del proyecto se estudió y comparó la capacidad fertilizante tanto de la pollinaza como del digestato anaerobio y el biochar mediante pruebas de valorización agronómica en el campo.

Para todo ello, se contó con la participación de ADEGAL, Centro Tecnológico EnergyLab, el Centro Tecnolóxico da Carne y Silvares de Grou S. Coop. Galega con su granja A Pendurada.

A Pendurada es una granja de pollos de engorde con capacidad para 15.000 animales e integrada en COREN. Adquirida por Silvia Fernández Delgado, agricultora, y Davide Antón Outeiro Castiñeira, veterinario, en el año 2018 evitando así su cierre por falta de relevo generacional.

2. Planificación de los trabajos

El proyecto se dividió en una serie de actividades, relacionadas entre sí, pero organizadas en función de los objetivos perseguidos.

A lo largo de la ejecución del proyecto se han ido desarrollando las diferentes actividades conducentes a obtener los resultados planteados y que dieron lugar a la generación de diferentes informes técnicos.

La información de dichos documentos se ha empleado para la elaboración de esta memoria libre, pero debido a la extensión de algunos de ellos, se hará un pequeño resumen en el apartado correspondiente y se incluye como Anexo a final del documento.

Actividad 1: Estudios previos

En esta actividad se tomaron datos del proceso productivo de la granja y se caracterizó la pollinaza obtenida. Asimismo, se estudiaron los residuos agrícolas generados tanto a nivel comunidad, como provincial y en la comarca, con objeto de seleccionar y caracterizar dos residuos agrícolas para su uso en los procesos de valorización energética. Se obtuvieron los datos de generación de la patata y mezcla de residuos hortícolas y se realizó su caracterización junto con la pollinaza.

La información más detallada se encuentra en los anexos:

- Informe de generación de residuos en la comarca
- Informe de viabilidad técnico-económica del proceso de digestión anaerobia con pollinaza

Actividad 2: Valorización de los residuos mediante digestión anaerobia

Se evaluó el proceso de digestión anaerobia para la valorización de los sustratos seleccionados. Se partió de los datos de caracterización y de determinación de potencial para determinar la generación de metano. Se diseñó y construyó un sistema piloto de digestión anaerobia para su uso en la explotación avícola en el que se evaluó el proceso empleando diferentes mezclas de pollinaza + sustratos de forma que se pudo obtener un biogás con más del 65% de metano. Finalmente se evaluó la viabilidad técnico-económica del proceso, viendo que debido a la economía de escala no es viable la instalación de una planta de digestión anaerobia para sólo esta explotación.

La información más detallada se encuentra en los anexos:

- Informe de caracterización fisicoquímica y determinación del potencial metanogénico de los residuos

- Informe de evaluación del proceso de DA en planta piloto
- Estudio de viabilidad técnico-económica del proceso de DA

Actividad 3: Producción de biochar mediante pirólisis

Se evaluó la pirólisis como sistema de valorización de la pollinaza. Inicialmente se realizó el estudio del proceso de secado de la pollinaza, para lograr la reducción de la humedad de 40 a 14%. Se llevaron a cabo ensayos en un reactor de pirólisis de lecho fijo a 3 temperaturas diferentes determinando el rendimiento a biochar y syngas y las propiedades de los mismos. Finalmente se estudió la viabilidad técnico-económica de la implantación del proceso.

La información más detallada se encuentra en los anexos:

- Estudio del proceso de secado natural de la pollinaza
- Informe de caracterización de la pollinaza para pirólisis
- Ensayos de pirólisis a diferentes temperaturas y caracterización del biochar
- Estudio de viabilidad técnico-económica del proceso de pirólisis

Actividad 4: Valorización agronómica

Se realizó un análisis de los sustratos para el suelo (pollinaza, digestato y biochar) y de los suelos de cada parcela empleada en el estudio (macro elementos, materia orgánica, pH, metales pesados). Se realizó el estudio edafoclimático y se establecieron los planes de fertilización correspondientes, empleando patata, trigo invierno y trigo primavera como cultivos. Finalizada la etapa de crecimiento y el cosechado se analizó la calidad obtenida según el sustrato y el cultivo empleado.

La información más detallada se encuentra en los anexos:

- Ensayo de fertilización en patata
- Ensayo trigo de invierno: biochar, cal, control
- Ensayo trigo primavera: pollinaza, digestato, química

Actividad 5: Plan de divulgación

Se hizo una recopilación, análisis y tratamiento de los resultados obtenidos y todos ellos fueron difundidos mediante diferentes medios (web, redes sociales...) intentando llegar al máximo público posible, especialmente en el sector de interés.

La información más detallada se encuentra en:

- Anexo de divulgación

3. Desarrollo del proyecto

A continuación, se presenta de manera resumida las distintas tareas y resultados obtenidos para cada una de las actividades del plan de trabajo del proyecto.

3.1. Actividad 1: Estudios previos.

3.1.1. Caracterización del proceso productivo de la explotación

A Pendurada es una granja de pollos de engorde con capacidad para 15.000 animales e integrada en COREN.

Junto con la producción apícola y los servicios técnicos, forma en la actualidad parte fundamental de Silvares de Grou S. Coop. Gallega.

Su modernización, especialmente en el área de eficiencia energética, reducción de insumos y valorización del estiércol, son sus objetivos principales.

La nave objeto del presente informe se encuentra en la parroquia de GROU, ayuntamiento de LOBIOS, provincia de OURENSE. La construcción se encuentra reconocida como construcción destinada la actividad agraria al amparo de la Ley 9/2002, de 30 de diciembre, de ordenación urbanística y protección del medio rural de Galicia y así reconocido por parte de la Consellería de Política Territorial, Obras Públicas y Transportes el 19 de junio de 2006.

Según medición efectuada la nave consta de NOVECIENTOS TREINTA Y SEIS (936) metros cuadrados útiles repartidos en una parcela que posee 922 metros de tierras arables y la mensura restante ocupada por terrenos considerados como improductivos.

Se trata de una nave de engorde de pollos, variedad Broiler, destinado al sacrificio con una producción media anual de 192.000 kg de pollo que se reparte en 5,5 camadas de pollo al año. Los últimos dos años los ciclos se vieron alterados debido tanto a la crisis sanitaria del coronavirus como a la crisis energética posterior y en la que nos encontramos inmersos actualmente.

La nave cuenta con estructura resistente de hormigón armado, cubierta de chapa, y paredes y cierres en bloque de hormigón.



Figura 1. Explotación A Pendurada

Posee ventilación estática y dinámica y un sistema de calefacción forzada por cañón de propano. Tiene un generador eléctrico alimentado por gasóleo con conexión automática en caso de fallo eléctrico. En la actualidad están iniciados los trámites para la colocación de 14 placas fotovoltaicas.

Los sistemas de alimentación de las aves están mecanizados.

El suelo y solera están realizados en hormigón de cimentación, de capa simple, con áridos y cemento, con armado y zuncho perimetral. La construcción se realizó en dos fases y en la actualidad no consta ninguna reforma que afectara a su carácter estructural ni sus capacidades resistentes. Su estado de conservación es correcto.

Cada ciclo de engorde comienza desde la retirada del estiércol (pollinaza) de la camada anterior.

Acciones previas a la recepción de los pollitos

- Limpieza, lavado y desinfección de la instalación y de su equipamiento y maquinaria.

- Verificación del correcto funcionamiento de equipos y maquinaria y subsanación de averías. Comprobación del nivel de propano para calefacción.

- Revisión de las medidas de bioseguridad complementarias: desinfección accesos, desratización, desinsectación y acondicionamiento exterior y del perímetro.

- Introducción del material de la cama y distribución dejando una profundidad de 5 cm. Se sitúa material de reposición en pacas o bigbag para su uso durante el engorde (en A Pendurada se usa viruta de chopo y/o cáscara de arroz en función de la disponibilidad y precio).

- Instalación y verificación de los comederos y bebederos automáticos y adicionales.

- Acotación y separación de la “Zona de Cría” correspondiente a 1/3 de la nave.

- Activación de los sistemas de calefacción, ventilación mínima y verificación y corrección de parámetros ambientales y alarmas en el ordenador.

Recepción de los pollitos

- Vigilar mantenimiento de los parámetros ambientales: temperatura, higrometría, ventilación mínima e iluminación.

- Vigilar medidas de bienestar y bioseguridad en la descarga.

- Pesado de una muestra representativa.

- Prestar atención al comportamiento de los pollos y notificar incidencias en caso de haberlas.

- Gestión de la documentación y actualización de censo en el libro de explotación y en los servicios oficiales autonómicos.

Transcurso del ciclo

Las tareas desarrolladas durante el transcurso del ciclo son las siguientes:

0 a 3 días

- Extremar vigilancia de las condiciones ambientales y comportamiento
- Verificar correcta ingesta en los pollitos evaluando el llenado del buche

4 a 6 días

- Ajuste de las condiciones ambientales según comportamiento
- Transición de los bebederos y comederos complementarios a los automáticos

7 a 13 días

-Expansión del área de cría o apertura al resto de la nave en función de las condiciones ambientales, cantidad de animales y comportamiento

- Control de peso y bajas
- Ajuste de condiciones ambientales
- Ajuste de altura de bebederos y acceso a los comederos

14 a 27 días

- Control de las transiciones en los tipos de alimento de inicio, crecimiento y terminado
- Control periódico de peso y bajas
- Vigilancia del estado general de los animales, uniformidad y digestión del alimento
- Ajustes necesarios de condicionalidad y ambiente
- Reposición de cama siempre que sea necesario

Hasta el final

- Controles de peso y bajas
- Ajuste de parámetros ambientales con especial cuidado a la ventilación en verano. Uso de sistemas de refrigeración por aspersión se necesario
- Ajuste en la altura de los bebederos y comederos

Día de la recogida de los pollos

- Calcular el período de retirada del alimento y reposicionar los comederos.
- Mantener acceso el agua hasta el momento de la recogida.
- Garantizar el acceso seguro del personal y maquinaria de recogida.
- Reducir iluminación al mínimo.
- Mantener ventilación efectiva.
- Velar por el bienestar de los animales y la seguridad del personal.
- Gestión de documentación y registros oficiales.

Retirada de la pollinaza

Teniendo en la explotación superficie agrícola y forestal suficiente para la valorización de los estiércoles, la ausencia de infraestructuras de acceso y la distribución y tamaño de las parcelas, hace poco viable la correcta mecanización de las operaciones necesarias. Es por ello que, después de la salida de los pollos, un **operador autorizado** para la gestión del estiércol procede a la retirada. La pollinaza permanecerá almacenada en la propia nave hasta la recogida. La recogida no supone ningún coste para la granja, ya que el gestor realiza acopios en estercoleros y posteriormente se reparte en parcelas.

En ese tiempo, es fundamental garantizar la correcta ventilación empleando los mecanismos de control de la propia instalación. También se debe velar por el máximo cuidado en la retirada con el fin de garantizar la mayor limpieza en la nave y la ausencia de vertidos durante la operación. Deben evitarse las condiciones meteorológicas adversas, así como proceder a la limpieza inmediata de residuos en el exterior en la última carga.

En cada camada salen de media 45 m^3 de estiércol, con pesos variable segundo el grado de humedad segundo las condiciones climáticas. Teniendo así una producción anual aproximada de 247,5 m^3 de pollinaza.

3.1.2. Estudio de la generación de residuos en la comarca

3.1.2.1. Residuos agrícolas

El concepto de **biomasa residual agrícola** se refiere a la fracción o fracciones de un cultivo que no constituyen la cosecha propiamente dicha y a aquella parte de la

cosecha que no cumple con los requisitos de calidad mínima para ser comercializada como tal. Según esta definición, entran en esta categoría los tallos, raíces, hojas y frutos no aprovechables. De igual modo, los **restos de poda** de los cultivos leñosos se consideran asimismo residuos vegetales de origen agrícola. Todos estos materiales presentan un contenido de humedad variable, un elevado contenido en materia orgánica y una fracción mineral con notables diferencias según la naturaleza del residuo.

Uno de los **principales problemas** relacionados con la producción de residuos agrícolas es su **producción estacional** que conlleva la generación de grandes cantidades de residuos concentrada en determinados meses del año. Una gran parte de estos residuos siguen una estacionalidad marcada, por ejemplo, en los periodos de recogida, cosecha y poda. Esto se traduce en que los mayores volúmenes de residuos se producen en periodos de tiempo muy cortos, lo que podría dificultar su gestión.

La superficie agrícola gallega se destina principalmente a **cultivos cerealeros, hortícolas, frutícolas y forrajeros.** La agricultura de Galicia tiene una fuerte orientación hacia la alimentación del ganado, ya que en las tierras cultivadas predominan los cultivos forrajeros y los prados y pastos.

Dentro del cultivo de cereales, en Galicia destaca el cultivo de **trigo y maíz**, con más de 29.000 ha de superficie, y una producción global de más de 132.000 t/a de grano. En cuanto a los cultivos hortícolas, destacan las **patatas**, con más de 16.000 ha y una producción cercana a 284.000 t/a.

En función de cada **tipología de cultivo** se producen **residuos diferentes**, que pueden abarcar desde los **restos de la cosecha** (como por ejemplo la paja de cereal), **restos de poda** y **restos de producción** (destríos de frutas y vegetales). Cada uno de ellos tendrá una vía de **valorización principal diferente**, priorizando la valorización biológica mediante digestión anaerobia de los residuos con mayor humedad, como los de cereales, frutas y hortalizas, y la valorización térmica de los residuos con mayor carácter leñoso, como los restos de poda.

Como para las comarcas de A Limia y A Baixa Limia no se dispone de datos concretos sobre la superficie y producción de cada cultivo en particular, y la evaluación de la generación de residuos producidos en el sector agrícola y su correspondiente potencial energético se ha realizado a partir de los datos disponibles para la provincia de Ourense, a la cual pertenecen ambas comarcas.

Teniendo en cuenta las producciones estimadas de los principales cultivos en las comarcas de A Limia y A Baixa Limia, se ha establecido una aproximación de los principales residuos en ambas comarcas. En la Tabla 1 se presentan los resultados de generación de residuos de los cultivos principales de la comarca de A Limia.

Tabla 1. Producción de cultivo y generación de residuos A Limia

Tipo	Producto	Producción (t/a)	Residuos (t/a)
Cerealeros	**Maíz grano**	488	708
	Trigo	17.941	8.971
Tubérculos	**Patata**	55.259	3.316
Resto de hortalizas	**Hortícolas**	5.037	302
	Residuos totales		13.297

En la Tabla 2 se presentan los residuos asociados a los principales cultivos de la comarca de A Baixa Limia.

Tabla 2. Producción de cultivo y generación de residuos A Baixa Limia

Tipo	Producto	Producción (t/a)	Residuos (t/a)
Cerealeros	**Maíz grano**	1.036	1.502
	Trigo	46	23
Tubérculos	**Patata**	3.140	188
Resto de hortalizas	**Hortícolas**	1.875	113
	Residuos totales		1.826

En la comarca de A Limia destaca la generación de residuos asociados al cultivo de trigo y en A Baixa Limia los residuos asociados al maíz en grano, pero teniendo en cuenta que presentan un contenido en humedad más bajo que el resto de residuos, no sería el más adecuado para ser empleado como co-sustrato con pollinaza. Por lo tanto, los residuos más interesantes serían los asociados a la patata y a las hortalizas.

Los mayores volúmenes vendrán dados por patatas no comerciales, que no tiene el tamaño comercial que va desde 40 mm hasta 85 mm, cortadas, con defectos, etc. En las Figura 2, se pueden apreciar un ejemplo de las patatas que no cumplen con el tamaño comercial, en la primera de ellas se puede apreciar un ejemplo de patatas menores de 40 mm, mientras que en la segunda se distinguen patatas con un tamaño mayor de 85 mm, no aptas para comercializar.



Figura 2. Patata menor de 40 mm, no apta para consumo humano y patata mayor de 85 mm de tamaño, no apta para comercializar

En el caso de los residuos hortícolas, estos también están asociados al incumplimiento de estándares comerciales. En la Figura 3, se observa una partida de hortalizas no apta para consumo humano.



Figura 3. Partida de hortalizas no apta para consumo humano

La **puesta en valor de la biomasa residual agrícola**, además de ser una alternativa a las quemas agrícolas, supondría una oportunidad de desarrollo económico, ya que contribuiría a generar puestos de trabajo en el entorno rural, donde están localizados los recursos biomásicos, y sería una **oportunidad de desarrollo** para municipios de marcado carácter agrícola. Asimismo, su valorización permitiría reducir el riesgo de incendios, la aparición de plagas y, en definitiva, representaría una ventaja para el agricultor al pasar de considerarse un residuo a un recurso con un valor comercializable siempre y cuando esté convenientemente comprobado que la biomasa empleada **no tiene usos alternativos.**

Hay que tener en cuenta que el desarrollo de los procesos de valorización de la biomasa residual agrícola depende de la demanda y el consumo que de ella se realice. Por ejemplo, en el contexto de la **valorización térmica**, en la actualidad este consumo está ligado casi exclusivamente a las **plantas de generación eléctrica** con biomasa forestal. No obstante, dada la creciente necesidad de biomasa existente en Galicia debido a la creación de plantas de generación de energía, así como al creciente consumo por parte de la industria forestal, la valorización de la biomasa agrícola residual se muestra como una opción altamente atractiva.

En el caso de la **valorización por vía biológica**, hay que tener en cuenta la posibilidad de valorización combinando la biomasa residual agrícola con otros sustratos como pueden ser los residuos de origen ganadero (**co-digestión**), lo que permitiría la construcción de plantas más rentables económicamente.

3.1.2.2. RESIDUOS AVÍCOLAS

En el marco del proyecto APROAVI también se realizó una evaluación de la disponibilidad de residuos avícolas.

El sector avícola está basado principalmente en la ganadería de gallinas, y se divide en el subsector de **avícola de puesta** y el de **avícola de carne**.

En el caso de avícola de puesta, la adaptación del sector a la normativa de bienestar animal en el año 2012 supuso una reconversión del sector productor, polarizado en dos modelos de producción: por una parte, unas explotaciones industriales de gran dimensión que alojan las gallinas ponedoras, y por otra un número creciente de explotaciones de carácter alternativo (ecológico y campero).

La capacidad de estas granjas permitirá establecer el volumen máximo de animales en su interior (Tabla 3)

Tabla 3. Capacidad de las explotaciones en Galicia (año 2020)

	A Coruña (nº)	Lugo (nº)	Ourense (nº)	Pontevedra (nº)	Galicia (nº)
Cría para carne	33.824	229.926	61.070	816.989	**1.141.809**
Cría para huevos	0	189.841	198.496	1.279.718	**1.668.055**
Multiplicación para carne	0	257.601	598.311	38.000	**893.912**
Multiplicación para huevos	0	0	270.760	0	**270.760**
Producción para carne	1.515.123	4.407.728	8.771.782	5.262.802	**19.957.435**
Producción para huevos campera	321.851	218.060	0	86.949	**626.860**
Producción para huevos en jaula	78.903	911.668	40.976	215.482	**1.247.029**
Producción para huevos ecológica	65.482	33.346	0	36.528	**135.356**
Selección para carne	0	0	0	0	**0**
Incubadoras	0	135.000	591.600	0	**726.600**
Total (nº aves)	**2.015.183**	**6.383.170**	**10.532.995**	**7.736.468**	**26.667.816**

Por lo tanto, en **Galicia**, si todas las explotaciones trabajasen en el máximo de su capacidad (plazas), podría haber más de **26,6 millones de efectivos**. En el caso de **Ourense** habría más de **10,5 millones.**

Según la tipología de explotación, se producen deyecciones con características diferentes. En algunos casos se recoge directamente de los cubículos de las aves mediante cintas transportadoras, mientras que, en otros casos, debe ser recogida del suelo y viene mezclada con materiales como el serrín o la cáscara de arroz usada como cama (yacija).



Figura 4. Explotaciones avícolas

El sector avícola no suele disponer de terrenos propios para la gestión de las deyecciones, por lo que depende de la demanda de los agricultores de las zonas próximas y puede suponer un grave problema de gestión.

Las estimaciones realizadas indican que en Galicia se podrían producir más de 480 mil toneladas anuales, con 195 mil en la provincia de Ourense. Teniendo en cuenta las explotaciones en las comarcas de A Limia y A Baixa Limia, se ha establecido una aproximación de la generación de residuos en ambas comarcas y en Ourense, tal como se muestra en la Tabla 4.

Tabla 4. Generación de residuos de las explotaciones

	Capacidad (nº aves)	Generación (t/a)
A Limia	5.170.595	93.070,7
A Baixa Limia	790.187	14.223,4

3.1.3. Caracterización fisicoquímica de los residuos

Las muestras seleccionadas como sustratos más interesantes para valorizar fueron la pollinaza (y las camas), los restos de hortalizas y una mezcla de restos hortícolas. La identificación de las muestras es la siguiente:

- Pollinaza (viruta)
- Restos de tomate
- Restos de patata
- Restos de cebolla
- Mezcla de restos hortícolas

En la Figura 5 se puede observar la muestra de pollinaza procedente de Silvares de Grou S. Coop. Gallega.



Figura 5. Imagen de la muestra de pollinaza

En la Figura 6 se presentan fotografías de las muestras hortícolas, donde se pueden observar las diferencias físicas entre unas y otras.



Figura 6. Imagen de las muestras a) Restos de tomate, b) Restos de patata, c) Restos de cebolla, d) Mezcla de restos hortícolas

Las muestras recibidas presentan un contenido en sólidos, con relaciones SV/ST que a priori las hacen adecuada para la digestión anaerobia, y con un contenido en materia orgánica elevado.

La concentración de sólidos ha sido expresada en unidades de porcentaje de sólidos totales (ST) y volátiles (SV). Como se observa en la Tabla 5, los residuos presentan un valor de SV en el rango del 4,2 a 18,9 % en el caso de los restos de hortalizas, mientras que la pollinaza presenta un valor de SV más elevado de 37,8 %.

El ratio SV/ST se emplea como una aproximación al contenido en materia orgánica de la muestra y, por lo tanto, a una posible mayor biodegradabilidad cuanto más se aproxime a la unidad. Se considera que una muestra es adecuada para el proceso de digestión anaerobia si el valor SV/ST es superior a 0,60. En este caso, el ratio SV/ST es superior a 0,78 en todas los muestras, lo que indica que, a priori, **todas son adecuadas para el proceso de digestión anaerobia**.

Tabla 5. Contenido en sólidos y humedad

Muestra	ST (%)	SV (%)	Ratio (SV/ST)	Humedad (%)
Restos de tomate	5,3 ± 0,1	4,2 ± 0,3	0,78	94,7 ± 0,1
Restos de patata	20,6 ± 0,1	18,9 ± 0,1	0,91	79,4 ± 0,1
Restos de cebolla	10,3 ± 0,1	9,1 ± 0,1	0,88	89,7 ± 0,1
Mezcla de restos hortícolas	6,6 ± 0,1	5,3 ± 0,1	0,80	93,4 ± 0,1
Pollinaza	44,8 ± 1,0	37,8 ± 1,0	0,84	55,2 ± 1,0

Teniendo en cuenta el contenido en humedad, la pollinaza es el sustrato más adecuado para la pirólisis, y si se combina en las proporciones adecuadas con residuos agrícolas como los estudiados podrá valorizarse mediante digestión anaerobia.

3.2. Actividad 2: valorización de los residuos mediante digestión anaerobia

La digestión anaerobia, también conocida como biometanización, es un proceso natural que sucede en condiciones de ausencia de oxígeno. En este proceso microbiológico se fermenta la materia orgánica transformándola por la acción bacteriana en biogás (compuesto por CH_4 y CO_2 principalmente) y produciendo un fertilizante rico en nutrientes mineralizados y por tanto en disposición inmediata para las plantas. Los digestores, también conocidos como biodigestores, son reactores cerrados que facilitan la digestión anaerobia proporcionando una atmósfera anaeróbica para los organismos responsables de dicho proceso.

La digestión anaerobia es un proceso multi-etapa y de reacciones paralelas donde diferentes tipos de bacterias degradan la materia orgánica sucesivamente. Se

identifican cinco grandes poblaciones bacterianas, las cuales actúan catalizando tres procesos consecutivos: hidrólisis, acidogénesis (formación de ácidos) y metanogénesis (formación de metano), constituyendo cuatro etapas.

3.2.1. Diseño y construcción del sistema de digestión anaerobia

Teniendo en cuenta las características de los residuos a alimentar y las necesidades del proceso, se optó por plantear un diseño de un reactor de mezcla completa (CSTR), de una etapa y operando en régimen mesofílico.

Una vez concluida la adecuación de la nave para recibir la planta se pudo hacer el traslado de los distintos equipos que la conforman y todo el material necesario para hacer las conexiones.

Tras realizar el replanteo de la bancada se llevó a cabo la instalación de las tuberías y del conexionado eléctrico.

A continuación, se muestran algunas imágenes de la planta piloto instalada en la explotación A Pendurada.



Figura 7. Planta piloto instala

3.2.2. Determinación del potencial metanogénico de cada uno de los sustratos

El ensayo batch (régimen discontinuo) se llevó a cabo según las condiciones establecidas en la metodología estándar. Se realizó el ensayo para determinar el potencial metanogénico empleando el digestato procedente del digestor anaerobio de lodos de la EDAR de Bens (A Coruña) como inóculo y las muestras recibidas como sustrato.

En la Figura 8 se pueden observar los resultados obtenidos en el ensayo en discontinuo. Los valores se muestran como volumen de metano acumulado por unidad de concentración de masa.

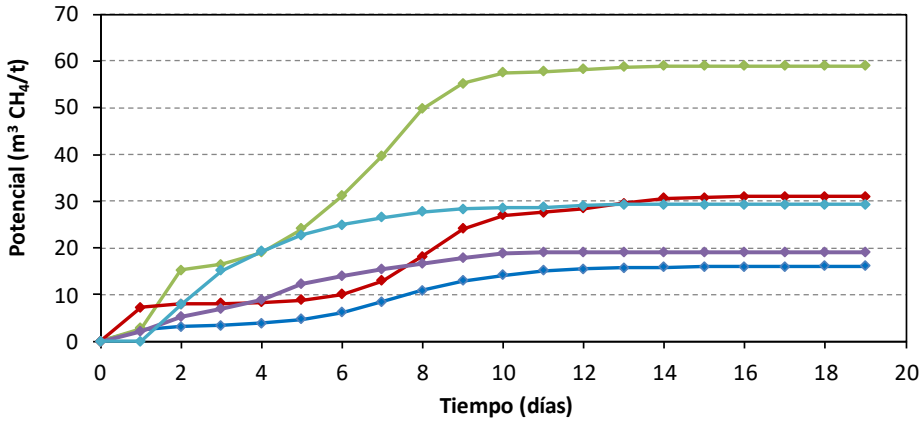


Figura 8. Potencial de producción de metano (Nm^3CH_4/t) de las muestras: (◆) Restos de tomate, (◆) Restos de patata, (◆) Restos de cebolla, (◆) Mezcla de restos hortícolas y (◆) Pollinaza.

Las muestras vegetales analizadas produjeron metano desde el inicio del ensayo, mientras que la muestra de pollinaza empezó a producir a partir del día 1 de ensayo, como indicativo de una pequeña fase de retardo. En la Figura 8 se observa como las muestras tienen curvas de generación de metano diferentes en cuanto a la producción acumulada. La velocidad de producción de metano (pendiente de la curva) disminuye en torno al día 10 para todas las muestras, pero en el caso de los restos de cebolla posteriormente se produjo un nuevo aumento hasta el día 15.

En la Tabla 6 se muestran todos los potenciales y rendimientos de producción de metano, usando las diferentes bases de cálculo. Adicionalmente se presenta el porcentaje de biodegradabilidad, calculado como el porcentaje de la materia orgánica (DQO_{total}) que se degrada y convierte en metano frente al valor máximo teórico de 0,35 Nm^3 CH_4/kg DQO.

Tabla 6. Resultados del rendimiento y biodegradabilidad

Muestra	Potencial (Nm^3 CH_4/t)	Potencial (Nm^3 CH_4/t SV)	Biodegradabilidad (%)
Restos de tomate	16,1 ± 0,1	389,9 ± 2,5	85,0 ± 0,6
Restos de patata	58,9 ± 0,7	312,2 ± 3,5	95,9 ± 1,1
Restos de cebolla	31,0 ± 0,2	342,3 ± 1,9	84,2 ± 0,5
Mezcla de restos hortícolas	19,1 ± 0,7	360,2 ± 12,5	45,9 ± 1,6
Pollinaza	53,0 ± 3,3	140,1 ± 8,7	74,7 ± 4,7

Puede observarse que la biodegradabilidad alcanzada a los 19 días de ensayo se sitúa en torno al 85 % en el caso de los restos de tomate, en un 96 % en los restos de patata, en un 84 % en los restos de cebolla, en un 46 % en la mezcla de restos hortícolas y en un 75 % en la pollinaza.

Por lo tanto, los restos de patata son el cosustrato más propicio para realizar la mezcla de codigestión con la pollinaza. Ya que es el residuo agrícola estudiado que presenta un mayor potencial, así como también un mayor porcentaje en metano y biodegradabilidad. Además, de que ya se había visto anteriormente en el estudio de generación de residuos agrícolas que en la comarca destacaba la producción de patatas.

La mezcla de residuos hortícolas también puede resultar un sustrato interesante atendiendo a su menor contenido en humedad.

3.2.3. Evaluación y análisis del proceso de digestión anaerobia en la planta piloto

Se ensayaron tres mezclas o recetas diferentes. En todos los casos se mantuvo la mayor proporción de pollinaza, por ser el residuo más abundante en la región.

Teniendo en cuenta la variabilidad estacional, asociada a los cultivos, con picos de generación en épocas concretos del año estos ratios disminuyen, por lo que se ha tenido en cuenta en la elaboración de la receta. Adicionalmente fue necesario hacer modificaciones sobre las mezclas establecidas, surgidas por motivos operacionales, y ante la falta de suministro de algunos sustratos.

Las recetas estudiadas son las siguientes:

- Receta 1: con pollinaza, patata y restos hortícolas, y agua
- Receta 2: con sólo pollinaza, patata y agua
- Receta 3: con pollinaza, patata y restos hortícolas, y agua

Las proporciones ensayadas para cada una se presentan en la Tabla 7.

Tabla 7. Recetas mezcla empleadas

	Pollinaza (%)	Patata (%)	Restos hortícolas (%)	Agua (%)
Receta 1	18,59	1,81	0,48	79,12
Receta 2	19,03	0,00	0,00	80,97
Receta 3	18,25	5,69	1,51	74,55

La adición de agua a cada receta se realizó con el objetivo de disminuir el contenido en sólidos de la alimentación, para que pudiese ser bombeable.

Se fijaron los parámetros operacionales para el funcionamiento de la planta piloto (velocidad de carga de sólidos, temperatura, tiempo de residencia, masa alimentada, etc) y durante un periodo de más de 300 días se realizó el seguimiento en función de los parámetros estándar para un digestor anaerobio.

Aunque no se observaron problemas significativos al trabajar con las tres recetas ensayadas durante la fase de operación, cabe destacar que fue necesario incrementar el contenido en agua para poder hacer una mezcla bombeable. En el caso de una operación a escala industrial, es necesario disponer de un buen sistema de recirculación de corriente líquida para disminuir la entrada de agua fresca.

Se ha podido comprobar que el uso de co-sustratos mejora la operación del digestor, de forma que aumenta la cantidad de metano obtenido. El tratamiento de una corriente sólo de pollinaza da lugar a una mayor liberación de compuestos amoniacales, lo que conduce a una ligera inhibición de la fase metanogénica.

La degradación de la materia orgánica se evaluó también en términos de degradación de sólidos volátiles, y se pudo comprobar que en la Etapa 1 y Etapa 3 los valores se mantuvieron en 60 % y 66 %, disminuyendo en la Etapa 2 a 46 %.

Se ha conseguido obtener un biogás con un porcentaje de CH_4 superior al 65% en la Etapa 1 y Etapa 3 de operación, siendo ligeramente más bajo en la Etapa 2.

3.2.4. Estudio de viabilidad técnico-económica del proceso de digestión anaerobia en granjas de pollo

Para evaluar la viabilidad técnico-económica de la instalación de una planta de digestión anaerobia en la granja se ha analizado el residuo generado así como los consumos eléctricos y térmicos de la granja.

Se han analizado las tipologías de plantas de digestión, sobre todo las que puedan ser de menor tamaño, el análisis de costes y el de beneficios.

Considerando la cantidad anual de pollinaza producida en la granja (198 t/a) junto con otros residuos de la zona (patata y restos hortícolas) **no se alcanza la viabilidad económica mínima** para que la planta resulte rentable, ya que solamente se estarían produciendo unos 3 m^3/h de biogás.

Se considera que para que exista cierta viabilidad sería necesaria una producción de 100 m^3/h, y por eso se decidió ampliar la mezcla de residuos, empleando el **9% de residuos** similares de la zona de **Limia**.

Con este caudal, se procedió a realizar el **plan de viabilidad económica**, en el cual se consideró que el **biometano generado** se iba a emplear para **sustituir el propano** empleado la granja y el excedente se iba a **inyectar a red**.

En cuanto al **digestato** producido, consideró que se podría emplear como fertilizante y como consecuencia de ello, se produciría un **ahorro en los fertilizantes** que actualmente se están empleando en los terrenos colindantes.

Para completar el plan, en el **estudio financiero**, se supuso que no había ninguna subvención y que el 20% del dinero necesario para la inversión, procedía de fondos propios y el 80% de un crédito.

Con todo ello, el periodo de retorno de la inversión fue de **8 años**. Aunque es un retorno adecuado para una planta a escala reducida, es necesario el desarrollo de nuevas tecnologías de purificación que **resulten más sencillas y económicas**, **y que faciliten el uso del biometano y su inyección en la red gasista.**

3.3. Actividad 3: producción de biochar mediante pirólisis

3.3.1. Estudio del proceso de secado natural de la pollinaza

Normalmente, los estiércoles procedentes de plantas de producción avícola (pollinaza) presentan un **elevado contenido de humedad**. La humedad plantea una serie de problemas en el acondicionado para su utilización con fines energéticos, y en el caso de realizarse una transformación y acondicionado del material, debe ser de forma que el incremento de valor del producto final compense los gastos de transformación del material. Por este motivo se optó por realizar un estudio de secado natural.

En la granja de pollos de engorde A Pendurada, fue posible lograr el objetivo de reducir la humedad hasta valores adecuados para llevar a cabo la pirólisis, pero con plazos diferentes en función de la época del año y el valor de partida de la pollinaza. Para alcanzar un nivel de humedad de la pollinaza del 14% a partir de un contenido de humedad del 40% y a través de un método de secado natural con volteos, fueron necesarios entre 152 y 164 días. Mientras que al partir de un contenido de humedad del 24%, en los meses más cálidos, solo fueron necesarios 48 días para que el contenido de humedad fuera inferior al 20%.

3.3.2. Caracterización fisicoquímica de la pollinaza

Las muestras analizadas fueron **pollinaza con viruta de madera y con cáscara de arroz**. El material de la cama de los animales se alterna entre estos según disponibilidad, por lo que debido a las posibles diferencias en la composición final y al ser esta altamente influyente en los procesos de valorización termoquímica consecuentes, se ha llevado a cabo la caracterización fisicoquímica de ambas clases de pollinaza, así como del material de las camas limpio, es decir, sin deyecciones. De esta forma, se podrán comparar los resultados obtenidos de composición de los materiales de las camas y de las mezclas de estos con deyecciones avícolas.

La cantidad de carbono de la pollinaza es menor que la de la cama en el caso de viruta de madera, cuyo contenido de este elemento es elevado en comparación con la cáscara de arroz. La cantidad de hidrógeno es menor en ambos casos para la pollinaza. Estos dos elementos son indicativos del poder calorífico, por lo que es de esperar que el potencial energético de la pollinaza sea menor que el de los materiales de la cama.

Tabla 8. Resultados del análisis elemental de las muestras.

(% m/m b.s.)	Pollinaza (viruta)	Viruta de madera	Pollinaza (cáscara)	Cáscara de arroz
Carbono (C)	< 48,0 (42,9)	50,3 ± 3,5	< 48,0 (42,2)	> 48,0 (55,3)
Hidrógeno (H)	< 5,0 (4,9)	> 6,5 (7,0)	5,7 ± 0,9	6,2 ± 0,9
Nitrógeno (N)	2,37 ± 0,36	0,28 ± 0,04	2,48 ± 0,07	0,64 ± 0,10
Azufre (S)	> 0,100 (0,323)	< 0,020 (0,013)	> 0,100 (1,661)	0,060 ± 0,020
Cloro (Cl)	> 0,100 (0,471)	< 0,015 (0,013)	> 0,100 (3,157)	> 0,100 (0,385)

Los resultados obtenidos del análisis de elementos inorgánicos de las muestras muestran tendencias dispares. Algunos elementos están claramente presentes en la **alimentación de los animales** y las cantidades iniciales en los materiales de la cama son mucho menores que los que se encuentran en la pollinaza, lo que se vincula con un alto contenido de estos elementos en las deyecciones. Este es el caso del **cobre** o del **fósforo**, por ejemplo.

Los resultados de caracterización de la pollinaza revelan propiedades que se deben tener en cuenta de cara a la valorización de este material mediante un proceso de pirólisis.

Tal como se mencionó previamente, la **humedad** debe reducirse por debajo del límite de 20% establecido para este tipo de procesos termoquímicos, ya que la humedad inicial del estiércol es superior a este valor. El **contenido y composición de las cenizas** indica un posible proceso catalítico en el que se degradará el material a temperaturas más bajas debido, principalmente, a su alto contenido en potasio y calcio. Además, el biochar resultante posiblemente cuente con cantidades relevantes de estos elementos si la temperatura escogida para el proceso de pirólisis se mantiene por debajo de los 600ºC, ya que de este modo la energía aportada al material no será suficiente para romper los compuestos carbonatados que lo conformen.

La temperatura del proceso de pirólisis también influirá en el resultado por la **temperatura de fusión de las cenizas** de la pollinaza, que ha sido evaluada en el presente informe. Para evitar dentro de lo posible la reducción de área superficial del biochar resultante, la temperatura de pirólisis debe mantenerse en todo caso

por debajo de 710ºC, que es la temperatura inicial de deformación más baja de acuerdo con los resultados de las analíticas realizadas.

El contenido en humedad y cenizas del estiércol avícola reduce su **poder calorífico** en comparación con otros combustibles y con los materiales de la cama, por lo que las deyecciones producen esta reducción en el contenido energético del material. Este hecho también se pone de manifiesto al observar el **contenido en carbono e hidrógeno** de cada material ya que ambos están directamente relacionados con el poder calorífico. El contenido de estos elementos es más bajo para la pollinaza en comparación con el material libre de deyecciones.

Por último, los **altos contenidos en nitrógeno, azufre y cloro** indican posibles emisiones contaminantes durante procesos térmicos. Las emisiones de amoníaco, compuestos de azufre y cloro suponen un riesgo medioambiental y, además, pueden dar lugar a problemas de corrosión de los equipos.

Con todo, los resultados presentados en este informe de la caracterización de la pollinaza no son suficiente para evaluar los productos que se podrán obtener mediante el proceso de pirólisis, ya que influirán notablemente las condiciones del mismo.

3.3.3. Ensayos de pirolisis a diferentes temperaturas y estudio del rendimiento a biochar

El estiércol de aves de corral se puede procesar mediante algún tratamiento térmico como la pirólisis para recuperar energía y producir productos de valor agregado.

En el caso de la pirólisis, que consiste en la descomposición térmica de materia orgánica en ausencia o con una cantidad limitada de oxígeno , se puede obtener un **gas con poder calorífico, bio-aceite y biochar**, este último con propiedades aclamadas como sustrato para el suelo y que asimismo permite una reducción importante del volumen de pollinaza inicial, lo cual permite no sólo evitar los problemas ambientales asociados al almacenamiento de la misma, sino también incrementar el ahorro en el espacio necesario para su almacenamiento. La pirólisis de pollinaza para la obtención de biochar es objeto de pocas investigaciones y aún no se ha ampliado a las instalaciones operativas debido fundamentalmente al elevado consumo energético que conlleva.

Las propiedades del biochar están influenciadas por las condiciones de pirólisis como la temperatura y tiempo de tratamiento, velocidad de calentamiento y características del horno. También están influenciadas por las características de la materia prima como son el carbono total, el carbono fijo y los elementos minerales, mientras que el área superficial del biochar y el pH están influenciados por los tratamientos a mayores o menores temperaturas.

3.3.3.1. CARACTERIZACIÓN

En primer lugar, se llevó a cabo **una caracterización de la materia prima** basada en un análisis termogravimétrico (**TGA**) y una calorimetría diferencial de barrido (**DSC**) con el equipo TGA-DSC Netzsch STS449 F3 Jupiter. El análisis TGA permite estudiar las propiedades térmicas de los materiales y determinar parámetros como el contenido de humedad, contenido de compuestos volátiles y la estabilidad de los materiales a través de la pérdida de peso que se produce en cada temperatura en condiciones controladas. Asimismo, el análisis DSC proporciona información sobre transiciones de fase, reacciones químicas, cambios de entalpía y cambios de cristalinidad. Estas técnicas han permitido **estimar el comportamiento térmico de la pollinaza y establecer las temperaturas óptimas de pirólisis** para la obtención del biochar. Previo a la caracterización, se molió la pollinaza con un molino de corte SM 200 marca Restch con un tamaño de malla de 4 mm para homogeneizar la muestra y realizar una correcta caracterización de la pollinaza

La energía generada en el proceso se estimó a partir del análisis del DSC en la que se pudo observar un primer pico endotérmico, en el que el proceso consume energía para evaporar el agua contenida en la muestra, seguida de varios picos exotérmicos que se corresponden con la degradación de los distintos compuestos orgánicos que forma la muestra, siendo los principales: celulosa, hemicelulosa y lignina. A partir de las áreas de la derivada de la curva de DSC se obtiene una **emisión total de energía de 0,3 kJ/mg de pollinaza.**

Se concluyó que **el rango de temperaturas de los ensayos pirolíticos debe comprender entre 400-600ºC** para asegurar una correcta carbonización de la materia orgánica sin descomponer el biochar que se forma durante el proceso de pirólisis lenta. Es por ello que **las temperaturas máximas seleccionadas para los 3 ensayos fueron 400ºC, 450ºC y 550ºC.**

3.3.3.2. OBTENCIÓN DE BIOCHAR

Los ensayos de pirólisis con pollinaza se llevaron a cabo en una planta de pirólisis formada por un horno tubular abierto de la marca Carbolite Gero (modelo TS1 12/200/1200) (Figura 4 a) conectado con un sistema de condensación que permite recoger los aceites producidos durante todo el proceso (Figura 4 b). Además del biochar y el bio-oil se obtuvo otro subproducto, un compuesto de color oscuro de gran viscosidad con una apariencia semejante al alquitrán, que se condensó en la tapa de salida del horno, y que ha sido tenido en cuenta para los balances de materia del sistema. El porcentaje de gases producidos se calculó por diferencia de los distintos co-productos recogidos. En todos los procesos se introdujo la materia prima tal cual se recibió, sin realizarle ningún tratamiento de molienda ni secado.

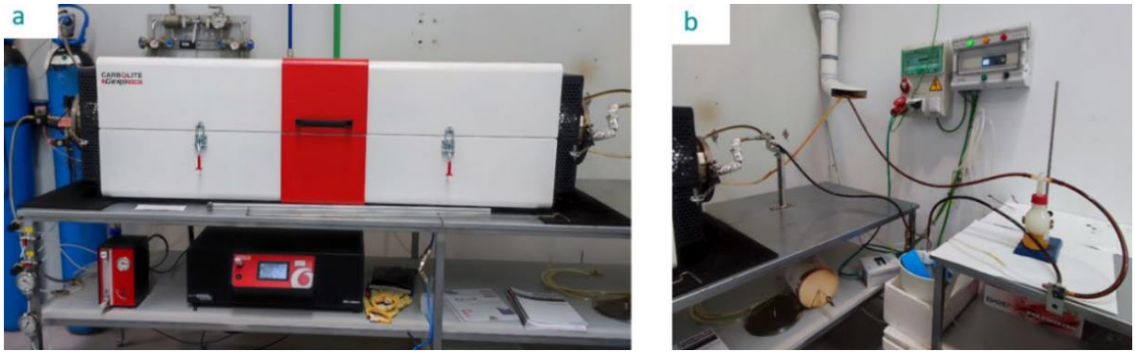


Figura 9. Planta de pirólisis: a) horno tubular Carbolite; b) sistema de condensación.

Durante los trabajos iniciales, se realizaron un total de 7 ensayos para la obtención de aproximadamente 250 g de biochar para cada temperatura máxima (400ºC, 450ºC y 550ºC). Todos los ensayos se realizaron con una velocidad de calentamiento de 5ºC min-1 y un tiempo de residencia de 1 h.

Si bien en todas las reacciones se ha obtenido biochar, durante los ensayos a 400ºC y 450ºC se observó que se seguía emitiendo gas de pirólisis una vez terminado el proceso térmico, lo que puede indicar que necesita un mayor tiempo de residencia para una correcta carbonización. Por otro lado, el carbón fabricado a 550ºC cesó la generación de gases 45 minutos después de haber alcanzado la temperatura máxima de pirólisis, por lo que se podría reducir el tiempo de residencia a esta temperatura.

Los rendimientos de obtención de biochar se encuentran dentro de los rangos bibliográficos observados con materias primas similares derivadas de residuos ganaderos de tipo estiércol

Tabla 9. Ensayos pirolíticos con pollinaza a las temperaturas máximas: 450ºC, 550ºC y 400ºC.

TEMPERATURA MÁXIMA (ºC)	POLLINAZA (g)	BIOCHAR (g)	RENDIMIENTOS			
			BIOCHAR (%)	ALQUITRÁN (%)	BIO-OIL (%)	SYNGAS (%)
400	387,78	171,01	44,10	1,18	19,28	40,60
400	336,62	142,37	42,29	2,10	19,21	36,39
450	116,17	44,87	38,53	1,83	21,19	38,44
450	305,65	120,03	39,27	2,31	20,63	37,79
450	407,80	161,65	39,64	1,62	19,65	39,09
550	300,23	115,68	38,53	1,95	21,19	40,66
550	385,54	150,42	39,02	1,54	16,45	42,99

La corriente de syngas está compuesta principalmente por N_2 ya que es el gas empleado para inertizar el horno y evitar la combustión de la gallinaza. La corriente

de N_2 de trabajo es de 1,5 NL/min y su concentración se mantiene próxima al 90%. En cuanto al contenido en H_2 se observa que será mayor a mayor temperatura de proceso. El equipo de medición detectó la presencia de C_2H_4 y C_2H_6 en pequeñas cantidades no cuantificadas en las tres temperaturas estudiadas en donde las mayores concentraciones se registraron para el ensayo realizado a 450ºC.

Tabla 10. Composición de los gases mayoritarios

TEMPERATURA MÁXIMA (ºC)	CONCENTRACIÓN				PCI_{GAS} (Kcal/Nm^3)
	H_2 (%)	CH_4 (%)	N_2 (%)	CO_2 (%)	
400	1,62	3,00	90,00	5,00	297,95
450	1,82	0,66	90,42	3,55	103,33
550	4,43	1,10	86,08	2,77	208,27

También se llevó a cabo una prueba adicional, de dos ensayos a 550ºC y 45 min de tiempo de residencia, para la optimización del proceso de obtención de biochar mediante pirólisis, en base a los resultados iniciales obtenidos.

Comparando las reacciones realizadas a la misma temperatura (550ºC), el rendimiento en la producción de biochar disminuye un 1,3% al reducir el tiempo de pirólisis, lo que es una pérdida asumible considerando el ahorro de energía que supone, ya que el consumo del equipo se redujo en un 15,9% al reducir el tiempo de residencia de 1h a 45 minutos.

3.3.4. Caracterización físicoquímica del biochar

El **biochar** es carbón vegetal que se obtiene de restos vegetales y residuos de biomasa. A diferencia del carbón vegetal clásico que es empleado como combustible, el biochar o biocarbón se aplica al suelo para mejorar sus propiedades. En suelos donde se ha aplicado el biocarbón en combinación con fertilizantes la producción vegetal incrementa y se estimula la actividad microbiana. Mejora su estructura y presenta una mayor capacidad de retención de agua. Asimismo, el biochar ayuda a regular el pH de los suelos muy ácidos y mejora sus propiedades físicas y químicas.

Además de las propiedades fertilizantes, el **biochar contribuye al secuestro de carbono de la atmósfera** y lo almacena en el suelo en formas químicas que son muy estables durante mucho tiempo.

Otro aspecto positivo a tener en cuenta es **la estabilidad** del biochar en el suelo. Si bien es difícil predecir cuál será su comportamiento a largo plazo, los experimentos que se han realizado en condiciones de laboratorio indican que puede perdurar entre cientos y miles de años, ya que es sólo una pequeña fracción de éste la que se degrada en un período corto de tiempo.

Se han analizado las 4 muestras biochar obtenido tras la pirólisis de pollinaza a diferentes temperaturas (400ºC, 450ºC y 500ºC) y tiempos de residencia (45 minutos y 1 hora)



Muestra B-550B Muestra B-550A Muestra B-450 Muestra B-400

Figura 10. Muestras de biochar

Los resultados de la composición elemental de las muestras estudiadas indican que el elemento principal de las muestras es el carbono, siendo superior al 50% en todas ellas. En cambio, la concentración de hidrógeno es muy pequeña, ésta disminuye a medida que se aumenta la temperatura pasando de un 2,5% para la muestra B400 a un 1,0% para la muestra B550A.

Tabla 11. Análisis elemental de las muestras

(% m/m b.s.)	B-400	B-450	B-550A	B-550B
Carbono (C)	50,1± 3,5	51,3 ± 3,5	50,6 ± 3,5	51,8 ± 3,5
Hidrógeno (H)	< 5,0 (2,5)	< 5,0 (1,8)	< 5,0 (1,0)	< 5,0 (1,1)
Nitrógeno (N)	>2,4 (2,42)	2,21±0,33	1,78 ± 0,27	2,01 ± 0,30
Azufre (S)	> 0,100 (0,175)	> 0,100 (0,140)	> 0,100 (0,245)	> 0,100 (0,223)
Cloro (Cl)	> 0,100 (0,389)	> 0,100 (0,293)	> 0,100 (0,507)	> 0,100 (0,437)

Su contenido en nitrógeno es bajo en todos ellos y, al igual que el hidrógeno se reduce al aumentar la temperatura y el tiempo de residencia. Como se menciona anteriormente, el nitrógeno es considerado como uno de los macronutrientes más importantes, por lo que este aporte de nitrógeno supone un beneficio de cara a su utilización como fertilizante.

Todas las mezclas presentan un índice C/N notablemente alto con el siguiente orden creciente para las cuatro muestras: B-400 (20,52) < B-450 (22,76) < B-550B (25,77) < B-550A (28,42). Según el C/N considerado óptimo para el empleo del biochar como fertilizante, la mejor muestra es la B-550A, aunque todas ellas presentan valores similares.

Tras el análisis y estudio de las muestras, se considera que el biochar presenta una composición muy favorable para su empleo como biofertilizante en comparación a su uso como combustible ya que su composición en elementos que aumentan su valor como fertilizante, están también relacionados con la aglomeración de cenizas reduciendo su valor como combustible.

La notable cantidad de macronutrientes necesarios para las plantas es un buen indicador para su valoración como fertilizante. Macronutrientes como el potasio, calcio o fósforo son los más abundantes, conteniendo además pequeñas cantidades de sodio y magnesio. Por otra parte, la presencia de micronutrientes como el hierro, manganeso, cobre o zinc refuerzan la idea de su uso como fertilizante.

3.3.5. Estudio de viabilidad técnico-económica del proceso de pirolisis en granjas de pollo

Para evaluar la viabilidad técnico-económica de la instalación de una planta pirolítica en la granja se ha analizado el residuo generado así como los consumos eléctricos y térmicos de la granja.

La cantidad de residuo generado anualmente por la granja es de 247,5 m^3 de pollinaza, lo que equivale aproximadamente a 198 t con una humedad promedio del 30%. Mediante un proceso de secado natural se consigue reducir su contenido en humedad hasta valores admisibles para su empleo como combustible en el proceso de pirólisis (<20%).

Los consumos energéticos (tanto eléctricos como térmicos) registrados en ellos últimos años en la granja han sido:

- 85.052 kWh/año en consumo térmico en forma de propano.
- 8.941 kWh/año en consumo eléctrico.

Teniendo en cuenta una producción de 138,6 $t_{b.s.}$ de pollinaza se ha estudiado a partir de los diferentes ensayos de pirólisis la energía que se puede obtener de los diferentes procesos, así como su consumo y sus rendimientos. El potencial de producción de energética sigue el siguiente orden en función de la temperatura de trabajo: 400ºC (14,86 MWh) >550ºC (12,14 MWh) > 450ºC (5,74 MWh). Comparando las diferentes tecnologías de pirólisis, la que presenta los mejores resultados ha sido la realizada a 400ºC, consiguiendo reducir en un 17,5% la demanda en energía térmica.

En el caso de la producción de biochar a partir de la totalidad de residuos generados, la mayor producción se ha observado para la pirólisis a 400ºC estimando su producción anual en 64,4 t/año de este producto de gran valor.

Los indicadores económicos muestran que la viabilidad económica de los procesos de valorización es limitada si se trabaja con instalaciones de pequeño tamaño, ya que se ven afectados por la economía de escala. Por ejemplo, los costes anuales (fijo + amortización) superan con creces el ahorro relacionado con la reducción en el consumo en energía térmica, dependiendo así de la venta del

biochar. Esto se traduce en una dependencia de la rentabilidad de esta instalación de un mercado, aunque prometedor, actualmente en desarrollo. Bajo estas condiciones, sería preferible la **gestión centralizada de estos residuos**, lo que permitiría reducir el tiempo de amortización y crear una red de distribución del biochar, convirtiéndolo así en una alternativa real a los fertilizantes químicos empleados actualmente en la agricultura.

3.4. Actividad 4: valorización agronómica

Se realizaron ensayos de valorización agronómica empleando patata, trigo invierno y trigo primavera y los diferentes sustratos (pollinaza, digestato, biochar) comparados con fertilizantes químicos y en dos temporadas de cosecha diferentes (2023 y 2024).

En cada uno de los estudios se realizó:

- Análisis de los sustratos para el suelo
- Estudio edafoclimático de finca de cultivos
- Plan de fertilización patata
- Preparación del terreno, siembra de parcelas, tratamientos, riegos, cosecha y cuaderno de campo
- Análisis de calidad de las cosechas (cuantitativas y cualitativas)

3.4.1. Ensayo con patata: pollinaza, digestato y biochar

Se evaluaron los efectos de diferentes fuentes de fertilización (pollinaza, digestato, biochar y fertilizantes químicos) en el rendimiento y la calidad del cultivo de patata Kennebec, una variedad ampliamente cultivada por su alto rendimiento y calidad culinaria.

Los ensayos se realizaron en la parcela 1568 del polígono 502 de Sandiás en Ourense en contenedores individuales de 25 a 30 litros de fieltro para ser rellenados con sustrato y semilla de cada tesis, el material permite aislar a cada planta del entorno sin que se impida aportes de agua y conserven las mismas condiciones que el resto de la parcela, en régimen de regadío.



Figura 11. Plano de situación de la parcela de ensayos.

La evaluación de la cosecha se realizó en base a:

- la producción bruta: Se pesó la patata recogida que datos se extrapolaron para obtener la producción bruta de patata por hectárea.
- la producción comercial: se restó a la producción bruta el peso del destrío. En este caso el destrío computó con aquellos defectos que invalidan el tubérculo para su venta posterior:

    - Pequeños <40mm.
    - Grandes >85 mm.
    - Agrietados.
    - Huecos.
    - Deformes.
    - Segundos crecimientos
    - Podredumbre seca y húmeda

- materia seca: determinación de la materia seca en patata mediante un liofilizador.

3.4.1.1. AÑO 2023

La **meteorología** durante el período de desarrollo de las patatas destacó por las grandes precipitaciones en el final de mayo y junio que provocaron focos de mildiu, no en la parcela ensayos, sino en las parcelas colindantes, además de aumentar el

riesgo de otras micosis por la conjunción de humedad constante y temperaturas cálidas. En mayo y junio acumularon casi 190 litros por metro cuadrado, acompañado de una temperatura media que rondó los 17 grados en junio circunstancia que multiplicó las micosis.

Conocidas las **características del suelo** y de los sustratos, se estableció el **plan de fertilización** con las **dosis de abonado**.

Los resultados obtenidos indican que:

- El tratamiento con fertilización química mostró el mayor rendimiento, con 50,908 kg/ha, superando en un 16.9% a la pollinaza y en un 23.7% al digestato. Este resultado indica que la aplicación de fertilizantes químicos garantiza una rápida y directa disponibilidad de nutrientes, en particular de nitrógeno, fósforo y potasio, lo que resulta en un crecimiento rápido y eficiente de las plantas.
- La pollinaza mostró un rendimiento de 43,383 kg/ha, siendo el segundo tratamiento más efectivo, solo un 15.3% inferior a la fertilización química. La producción es menor pues es evidente que la dosis de pollinaza es pequeña y debe ser aumentada. La pollinaza no solo aporta nutrientes esenciales, sino que también mejora la materia orgánica y la microbiota del suelo, promoviendo la sostenibilidad a largo plazo. La pollinaza contribuye significativamente al contenido de materia orgánica y a la mejora de la estructura del suelo, lo que a largo plazo puede mejorar la retención de agua y la capacidad de almacenamiento de nutrientes. Aunque los nutrientes no se liberan tan rápido como en los fertilizantes químicos, la liberación progresiva asegura una nutrición continua del cultivo a lo largo de su ciclo. Pero presenta desventajas por la variabilidad en la composición de la pollinaza, que puede llevar a un suministro desequilibrado de nutrientes si no se aplica de manera adecuada. Un exceso de nitrógeno, por ejemplo, podría estimular un crecimiento excesivo de la planta a expensas del desarrollo de los tubérculos. Uno de los principales problemas en la piel de las patatas asociadas al uso de pollinaza es la sarna común, una enfermedad causada por el patógeno Streptomyces scabies. Esta enfermedad es más común cuando el pH del suelo aumenta debido al uso de fertilizantes orgánicos ricos en nitrógeno y otros minerales.
- El digestato produjo 41,169 kg/ha, ligeramente inferior al rendimiento con pollinaza (5.1% menos) y un 23.7% menor que el fertilizante químico. Al igual que con la pollinaza, la dosis fue insuficiente y debe ser aumentada. Sin embargo, su rendimiento es competitivo, especialmente cuando se tiene en cuenta que el digestato es un subproducto de la digestión anaeróbica que puede contribuir a la economía circular en la agricultura.

Ventajas: El digestato proviene del tratamiento de residuos orgánicos, como la pollinaza, lo que convierte este residuo en un insumo valioso para la fertilización de cultivos, reduciendo la necesidad de fertilizantes sintéticos. Aporte de nutrientes

esenciales y mejora la estructura del suelo, aunque en menor medida. Su uso promueve la sostenibilidad agrícola al reciclar residuos orgánicos.

No está exento de desventajas por su menor cantidad de materia orgánica en comparación con la pollinaza, el digestato aporta menos materia orgánica, lo que podría limitar su capacidad para mejorar la estructura del suelo a largo plazo. Aunque aporta nutrientes, la variabilidad en la liberación de estos puede ser mayor, lo que podría requerir un monitoreo más cercano para evitar deficiencias durante el ciclo del cultivo.

La fertilización química ofrece el mayor rendimiento a corto plazo, pero a costa de la salud a largo plazo del suelo. Pollinaza y digestato pueden proporcionar rendimientos competitivos siempre que se aumente la dosis de abonado, con la ventaja adicional de mejorar la textura y estructura del suelo, además de ser opciones más sostenibles y respetuosas con el medio ambiente. Uso combinado de fertilización orgánica y química se podría recomendar como una estrategia combinada, usando fertilización química en fases críticas del cultivo para maximizar la producción, y la pollinaza o el digestato para mejorar la sostenibilidad y fertilidad del suelo a largo plazo. Aunque los fertilizantes químicos ofrecen el mayor rendimiento a corto plazo, el uso de pollinaza y digestato debería ser promovido como parte de una estrategia de manejo sostenible del suelo, especialmente en sistemas agrícolas que busquen reducir el impacto ambiental y mejorar la calidad del suelo a largo plazo.

- El ensayo de fertilización con biochar en patata Kennebec muestra que la temperatura de producción del biochar es un factor crítico en su efectividad como enmienda agrícola. El biochar producido a 500 °C ofrece las mayores producciones, con un incremento significativo en el rendimiento de tubérculos de patata Kennebec, mientras que el biochar a 450 °C mostraron menores rendimientos del cultivo.
- La mayor producción de patata se observó con el tratamiento de biochar a 500 °C, alcanzando 35,224 kg/ha de producción bruta. Este tratamiento superó significativamente a los demás. El biochar a 500 °C produjo un 25.9% más de tubérculos que el tratamiento sin biochar.
- Biochar a 400 °C con rendimiento cercano al control: El tratamiento con biochar a 400 °C produjo 28,731 kg/ha, un rendimiento similar al del tratamiento sin biochar (27,972 kg/ha). Aunque este tratamiento no mostró una ventaja significativa sobre el control, se observa una ligera mejora (+2.7%).
- Biochar a 450 °C con el menor rendimiento: El tratamiento con biochar a 450 °C mostró el rendimiento más bajo, con 23,662 kg/ha, lo que representa una reducción del 15.4% en comparación con el control.
- El biochar tiene un efecto alcalinizante en el suelo, especialmente si se produce a altas temperaturas. Esto puede elevar el pH del suelo, lo que influye en la disponibilidad de nutrientes y en la salud del cultivo de patata Kennebec.

- La piel de la patata Kennebec es un factor clave en la calidad del tubérculo, tanto desde el punto de vista comercial como culinario. La aplicación de biochar puede influir en la apariencia, textura y sanidad de la piel de los tubérculos.

Posibles efectos del biochar en la piel de los tubérculos:

Sarna común (Streptomyces scabies): un aumento excesivo del pH del suelo debido al biochar puede favorecer la aparición de sarna común en los tubérculos. Esta enfermedad causa manchas ásperas y corchosas en la piel, afectando la calidad estética y comercial de las patatas.

Precauciones:

Evitar el aumento excesivo del pH: la sarna común prospera en suelos con pH alto (por encima de 5.5-6.0), se debe evitar que el biochar eleve demasiado el pH. En caso de aplicaciones excesivas se debe actuar rebajando el pH, que se puede lograr aplicando enmiendas ácidas, como sulfato de amonio

Uso de biochar obtenido a 500 °C parece ser el más efectivo para mejorar la producción sin causar daños significativos en la producción de patata. Aplicar el biochar en cantidades fraccionadas y realizar monitoreos periódicos de pH y otros parámetros del suelo permite evitar problemas a largo plazo en la calidad y cantidad de cosecha. En suelos muy ácidos, el biochar puede ser una solución efectiva para neutralizar la acidez y mejorar la estructura del suelo.

En conclusión, el uso de biochar en la producción de patata Kennebec tiene un gran potencial, pero debe aplicarse con precaución, especialmente en lo que respecta al poder encalante y sus efectos sobre el pH del suelo, así como en la piel de los tubérculos. Un manejo adecuado del biochar puede optimizar la producción, mejorar la calidad del suelo y minimizar problemas de calidad en los tubérculos.

3.4.1.2. AÑO 2024

La meteorología de este año destaca por un rango de temperaturas entre los meses de mayo y septiembre más adecuadas para el crecimiento en comparación con las de 2023, pero al igual que el año anterior, en el mes de mayo se registraron fuertes

Conocidas las **características del suelo** y de los sustratos, se estableció el **plan de fertilización** con las **dosis de abonado**.

Los resultados obtenidos indican que:

Respecto a la Producción Bruta (kg/ha) el digestato presentó la mayor producción bruta con 57.013 kg/ha, seguido por pollinaza con 54.433 kg/ha, y el fertilizante químico con 48.420 kg/ha. El tratamiento blanco (sin fertilización) mostró la menor

producción con 29.173 kg/ha. El digestato demostró ser el tratamiento con mayor rendimiento en cuanto a cantidad bruta de producción, seguido de cerca por la pollinaza. El fertilizante químico produjo menos cantidad bruta, pero el blanco (sin fertilización) fue considerablemente inferior en rendimiento, indicando la importancia de la fertilización en la productividad del cultivo.

En lo que respecta a la Producción Comercial (kg/ha), el fertilizante químico fue el más eficiente, con 48.420 kg/ha sin pérdida por destrío (0%). El tratamiento con digestato produjo 53.973 kg/ha de producción comercial, lo que representa un porcentaje de destrío de 5,33%. La pollinaza presentó una mayor pérdida, con 49.144 kg/ha de producción comercial y un 9,72% de destrío. El testigo (blanco) tuvo el porcentaje más alto de destrío (25,59%), con solo 21.707 kg/ha de producción comercial. La pollinaza, aunque eficiente en términos de cantidad, presenta el mayor porcentaje de tubérculos descartados, lo que afecta su rendimiento comercial. El testigo sin fertilización es el menos competitivo en términos de producción tanto bruta como comercial.

Conclusión General:

- El fertilizante químico no es el más productivo en cantidad bruta, ofrece una producción comercial 100% eficiente sin pérdidas por destrío, lo que lo hace atractivo desde una perspectiva de calidad. Lo esperado con este tipo de fertilización ya que entrega el alimento a las plantas en el momento y cantidad adecuados pero su alto coste puede lastrar su uso, además de problemas en la gestión del suelo a largo plazo.

- Digestato: es el tratamiento con mayor producción tanto total como comercial a pesar de tener un 5,33% de destrío. Es una buena alternativa orgánica, con menor impacto en la pérdida de calidad.

- Pollinaza: presenta buenos resultados en cuanto a producción bruta, pero su alto porcentaje de destrío (9,72%) puede ser un inconveniente para la comercialización.

- Testigo sin fertilización: claramente demuestra la importancia de la fertilización en el cultivo de patata, ya que sin aportes de nutrientes, tanto la cantidad como la calidad se ven fuertemente afectadas.

Este ensayo resalta la importancia de equilibrar la cantidad de producción con la calidad comercial y la influencia de diferentes tipos de fertilización en ambos aspectos.

3.4.2. Ensayo trigo invierno: biochar

La producción de trigo está altamente influenciada por las características del suelo, especialmente el pH, que afecta la disponibilidad de nutrientes y la salud general del cultivo. Uno de los métodos clave para mejorar la productividad del trigo es el uso de enmiendas encalantes, que ayudan a corregir la acidez del suelo y mejorar la fertilidad.

El ensayo se realizó con la variedad Montecarlo, con el objetivo de comparar los efectos utilizando biochar, cal y un control sin encalante, y así evaluar las diferencias en producción y posibles mejoras en el suelo. Aunque no es tradicionalmente un encalante rápido como la cal, el biochar tiene un poder encalante gradual y persistente. Además, mejora la retención de nutrientes y humedad en el suelo, lo que puede beneficiar la producción a largo plazo.

Los ensayos se realizaron en la parcela 1568 del polígono 502 de Sandiás en Ourense en y en la posición que indica la imagen al pie:



Figura 12. Lugar ensayo trigo invierno 2023-2024

El clima proporcionó un buen inicio para el trigo de invierno, con precipitaciones adecuadas en los meses clave de noviembre a marzo, lo que permitió un crecimiento saludable. La disminución de las precipitaciones a partir de junio y las altas temperaturas en julio y agosto podrían haber impactado en la maduración y llenado de granos, lo que podría haber afectado el rendimiento final si no se utilizaron sistemas de riego.

El biochar destaca por tener el mayor rendimiento (3980,63 kg/ha), un peso de mil granos intermedio y el menor porcentaje de impurezas. La cal mejora el peso de mil granos y el peso específico, aunque presenta un rendimiento inferior al del biochar. El control muestra resultados intermedios en rendimiento y calidad, aunque sufre en cuanto al peso de mil granos y el peso específico.

El uso de biochar parece ser una opción prometedora para mejorar tanto el rendimiento como la calidad del trigo en este ensayo, con mejores resultados que la cal en la mayoría de las variables analizadas. El biochar mostró el mayor impacto positivo en el rendimiento del cultivo de trigo, lo que sugiere que es una enmienda eficiente para mejorar la productividad, posiblemente debido a su capacidad de mejorar la estructura del suelo y retener más humedad y nutrientes.

Respecto a la calidad del grano el tratamiento con cal tuvo un efecto más pronunciado en el peso de mil granos y en el peso específico, lo que sugiere que es más efectivo en mejorar la calidad del grano en cuanto a densidad y tamaño. El biochar no logró el mejor rendimiento en todas las variables, pero mostró una combinación equilibrada de mejoras en rendimiento, peso de grano y menor cantidad de impurezas, lo que lo convierte en una opción efectiva para aumentar la productividad y la calidad.

3.4.3. Ensayo trigo primavera: pollinaza y digestato

El ensayo evaluó el efecto de diferentes fuentes de fertilización orgánica (pollinaza y digestato) y química en el rendimiento, calidad del grano y salud del suelo en la variedad de trigo Sensas, durante el ciclo agrícola de 2024

La pollinaza se utiliza ampliamente como fertilizante orgánico en la agricultura por su alto contenido en nutrientes. La liberación de nitrógeno y otros nutrientes es más lenta y prolongada en el tiempo en comparación con los fertilizantes sintéticos, proporcionando un suministro continuo a las plantas. Al ser rica en materia orgánica, mejora la retención de agua y la aireación del suelo, fomentando la biodiversidad microbiana

El digestato es ideal para una fertilización rápida, proporcionando nutrientes rápidamente disponibles, especialmente nitrógeno. Es una opción eficiente para quien busque mejorar rápidamente el rendimiento del cultivo sin depender de fertilizantes químicos sintéticos. La pollinaza, por otro lado, es más adecuada para aquellos que buscan una fertilización sostenida en el tiempo, con un beneficio prolongado tanto para el cultivo como para la estructura del suelo.

Los ensayos se realizaron en la parcela 1568 del polígono 502 de Sandiás en Ourense en y en la posición que indica la figura. El suelo de esta parcela tiene una buena fertilidad general, con altos niveles de materia orgánica, fósforo y potasio.

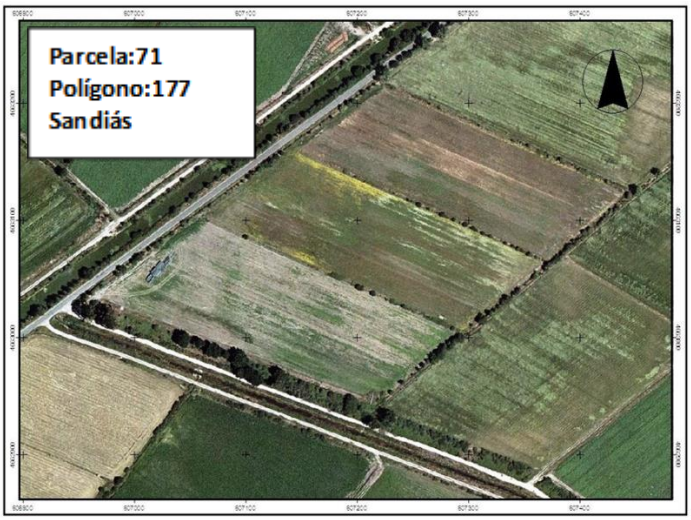


Figura 13. lugar ensayo trigo de primavera 2024

El clima proporcionó un buen inicio para el trigo de primavera, con precipitaciones adecuadas en los meses clave de abril y principios de mayo, lo que permitió un crecimiento saludable. La disminución de las precipitaciones a partir de junio y las altas temperaturas en julio y agosto podrían haber impactado en la maduración y llenado de granos, lo que podría haber afectado el rendimiento final. El ensayo de trigo estuvo marcado por una distribución irregular de las lluvias y un aumento constante de las temperaturas. Las lluvias escasas y las temperaturas más cálidas en los meses críticos de llenado de grano (junio y julio) probablemente impactaron negativamente el rendimiento del cultivo, especialmente en cuanto al peso del grano. Sin embargo, las condiciones frescas y las lluvias intermitentes al inicio de la campaña proporcionaron un buen ambiente para el establecimiento y desarrollo vegetativo del trigo.

Los tratamientos orgánicos, especialmente la pollinaza, demostraron ser los más efectivos en términos de rendimiento total (kg/ha), peso específico y peso de mil granos. Estos resultados sugieren que los fertilizantes orgánicos proporcionaron una nutrición más equilibrada y sostenida a lo largo del ciclo del cultivo, lo que favoreció un mejor desarrollo y calidad del grano.

El digestato también mostró buenos resultados, siendo una alternativa viable a la pollinaza, aunque con un rendimiento algo menor. Este fertilizante ofrece una buena opción para mejorar el rendimiento en sistemas de cultivo donde se quiera reducir la dependencia de fertilizantes químicos.

La fertilización química, aunque efectiva, quedó rezagada frente a los tratamientos orgánicos en términos de rendimiento y calidad del grano, lo que sugiere que en este ensayo los fertilizantes orgánicos fueron superiores.

El tratamiento blanco sin fertilización mostró el peor rendimiento y calidad de grano, lo que subraya la importancia de una adecuada fertilización para maximizar el potencial del trigo Sensas.

En resumen, el uso de fertilizantes orgánicos como pollinaza y digestato mejora tanto el rendimiento como la calidad del grano en comparación con la fertilización química, haciéndolos opciones más sostenibles y productivas en este ensayo de trigo Sensas.

3.5. Actividad 5: Divulgación

En esta actividad se han ejecutado diversas actividades para la promoción y difusión del proyecto en el sector y alcanzar así el mayor impacto posible sobre los principales resultados y los trabajos que se han llevado a cabo en estos años de ejecución de APROAVI.

Para mostrar todas las tareas de difusión desarrolladas en el proyecto, vamos a clasificarlas de la siguiente forma:

3.5.1. Materiales Desarrollados: logo, tríptico y cartelería.

Se ha diseñado una marca de proyecto y un manual de estilo, y éste se ha empleado en todas las comunicaciones, materiales y actividades de difusión de APROAVI.

Se adjunta en el **ANEXO de Divulgación** el Manual de estilo de APROAVI.

Se ha diseñado e impreso un tríptico con información general de los objetivos, resultados esperados e información sobre el partenariado y la financiación del proyecto. Se adjunta en PDF en el ANEXO **de Divulgación.**

4. ANEXOS

1. Informe de generación de residuos agrícolas en la comarca
2. Informe de caracterización fisicoquímica y determinación del potencial metanogénico de los residuos
3. Informe de evaluación del proceso de DA en planta piloto
4. Estudio de viabilidad técnico-económica del proceso de DA con pollinaza
5. Estudio del proceso de secado natural de la pollinaza
6. Informe de caracterización de la pollinaza para pirólisis
7. Ensayos de pirólisis de pollinaza a diferentes temperaturas
8. Informe de caracterización fisicoquímica del biochar
9. Estudio de viabilidad técnico-económica del proceso de pirólisis con pollinaza
10. Ensayo de fertilización en patata
11. Ensayo trigo de invierno: biochar, cal, control
12. Ensayo trigo primavera: pollinaza, digestato, química
13. Anexo de divulgación

R 10.7_v03



Informe de generación de residuos agrícolas en la comarca



Índice

1 Modificaciones 3

2 Introducción y objeto 4

3 Marco del estudio 5

3.1. Biomasa residual agrícola y estacionalidad 6

3.2. Tipos de biomasa residual agrícola y principales formas de gestión 7

3.4. Sector agrícola en España 13

3.5. Sector agrícola en Galicia 14

3.6. Sector agrícola en A Limia 20

3.7. Sector agrícola en A Baixa Limia 22

4 Metodología 24

4.1. Fuentes de información 24

4.2. Evaluación y cuantificación de los residuos 24

4.2.1. Evaluación y cuantificación de residuos y del potencial energético bruto mediante valorización biológica 24

4.2.2. Evaluación y cuantificación de los residuos agrícolas para valorización térmica 27

5 Resultados 30

5.1. Generación de residuos 30

5.1.1. Generación de residuos para valorización biológica 30

5.1.2. Generación de residuos para valorización térmica 34

5.2. Estimación del potencial energético 36

5.2.1. Estimación del potencial energético mediante valorización biológica 36

5.2.2. Estimación del potencial energético mediante valorización térmica 39

6 Conclusiones.....41

7 Anexo – Lista de referencias.....43

7.1. Índice de tablas 43

7.2. Índice de figuras 44

7.3. Índice de referencias 44

1 Modificaciones

Fecha	Versión	Aclaraciones
12/09/2022	V00	Versión inicial

2 Introducción y objeto

El proyecto APROAVI pretende aplicar los criterios de economía circular mediante **la gestión y tratamiento sostenibles** de las **deyecciones** generadas en el **sector avícola**, mejorando así la competitividad y sostenibilidad de dicho sector promoviendo la obtención y uso de **energía renovable**, así como de fertilizantes aditivados. Para todo ello se evaluarán dos alternativas tecnológicas. Por un lado, se llevará a cabo la **digestión anaerobia** de la pollinaza mezclada con residuos agrícolas mayoritarios de la zona de estudio, con objeto de maximizar la generación de biogás y la obtención de **fertilizantes** en forma de **digestato** anaerobio. Por otro lado, se evaluará el uso de la pollinaza como biocombustible en un proceso de **pirólisis**, en el que además de un **gas con poder calorífico se generará biochar**. En una última etapa del proyecto se estudiará y comparará la capacidad fertilizante tanto de la pollinaza como del **digestato anaerobio y el biochar mediante pruebas de valorización agronómica en el campo**.

Este documento tiene como objetivo general la **identificación de los principales residuos del sector agrícola** generados en la comarca de A Limia y Baixa Limia, que pueden ser valorizados energéticamente.

Se presentarán los principales cultivos con su superficie, producción y residuos obtenidos, asimismo se analizarán los usos potenciales de estos últimos.

3 Marco del estudio

En el contexto de la actividad 1 del proyecto anteriormente mencionado con título "Estudios previos" se hace fundamental el estudio de generación de residuos agrícolas en la comarca objeto de estudio.

Para empezar, se consideran **residuos agrarios** todos aquellos que derivan de la actividad agrícola y ganadera[1]. Estos residuos pueden ser muy **heterogéneos** y de procedencia muy diversa.

A continuación, se muestra una posible clasificación:[2]

- **Residuos agrícolas:** restos de cosecha, destríos, exceso de producción, restos de poda.
- **Materiales agrícolas:** estructuras y plásticos de invernadero, mallas, tuberías de riego, tutores, trampas, láminas plásticas para ensilados, bandejas de semilleros.
- **Maquinaria:** aceite y lubricantes, derrames de combustibles, neumáticos.
- **Residuos ganaderos:** estiércoles, purines, cadáveres.
- **Materiales ganaderos:** barras de separación de animales, bebederos.
- **Residuos fitosanitarios y envases:** plaguicidas agrícolas, biocidas, medicamentos ganaderos.
- **Otros:** equipos de protección individual (EPIs).

Atendiendo a otra clasificación diferente, se puede distinguir entre residuos **orgánicos** e **inorgánicos**, o como **peligrosos** o **no peligrosos** o de **gran o pequeño volumen**.

En función de la zona y el tipo de producción agrícola predominante, son más frecuentes unos tipos de residuos u otros, por ejemplo, en zonas con mayor agricultura intensiva basada en invernaderos se producirán mayor cantidad de materiales agrícolas. Por lo tanto, la tipología y las cantidades de los residuos que se producen dependen de diversos factores, como el tipo de agricultura, el cultivo, o el tamaño de la explotación.

El presente documento se centra exclusivamente en los denominados "**residuos agrícolas**" o **"biomasa residual agrícola"** de la comarca de A Limia y Baixa Limia. Dentro de ellos se hará hincapié en los procedentes de restos de cosecha y en los destríos o productos no conformes (productos agrícolas no aptos para su comercialización por presentar desperfectos), ya que son los más adecuados para valorización energética.

No se considerarán los plásticos, aceites usados, baterías, neumáticos, … porque por su naturaleza no son los más adecuados, ya que presentan un bajo contenido orgánico. Su gestión se llevará a cabo a través de gestores autorizados.

3.1. Biomasa residual agrícola y estacionalidad

El concepto de **biomasa residual agrícola** se refiere a la fracción o fracciones de un cultivo que no constituyen la cosecha propiamente dicha y a aquella parte de la cosecha que no cumple con los requisitos de calidad mínima para ser comercializada como tal. Según esta definición, entran en esta categoría los tallos, raíces, hojas y frutos no aprovechables. De igual modo, los **restos de poda** de los cultivos leñosos se consideran asimismo residuos vegetales de origen agrícola. Todos estos materiales presentan un contenido de humedad variable, un elevado contenido en materia orgánica y una fracción mineral con notables diferencias según la naturaleza del residuo.[3]

Los **residuos vegetales más abundantes,** en la comarca de A Limia proceden tanto del **cultivo de patatas** como **de cereales** (principalmente, los cereales de grano, como son el trigo y el centeno).[4]

Uno de los **principales problemas** relacionados con la producción de residuos agrícolas es su **producción estacional** que conlleva la generación de grandes cantidades de residuos concentrada en determinados meses del año. Una gran parte de estos residuos siguen una estacionalidad marcada, por ejemplo, en los periodos de recogida, cosecha y poda. Esto se traduce en que los mayores volúmenes de residuos se producen en periodos de tiempo muy cortos, lo que podría dificultar su gestión.

En la Tabla 1 se muestra la estacionalidad de una serie de cultivos presentes en la provincia de Ourense:

Tabla 1. Estacionalidad de los cultivos en la provincia de Ourense 5

Cultivo	Mes											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Trigo												
Cebada												
Avena												
Centeno												
Triticale												
Maíz												
Judías secas												
Patatas												
Col repollo												
Grelos												
Tomates												
Pimientos												
Cebollas												
Judías verdes												
Manzanas												
Cerezas												
Melocotones												

Ciruelas												
Higos												
Nueces												
Castañas												
Uvas												

Siembra/Floración

Recogida

3.2. Tipos de biomasa residual agrícola y principales formas de gestión

Dependiendo del cultivo, la **biomasa residual agrícola** se puede agrupar en:

- **Residuos agrícolas herbáceos**

Están formados por los restos que quedan después de la cosecha. Engloba principalmente pajas de cereal y tallos de maíz. El principal inconveniente que presenta en su aprovechamiento es su **marcado carácter estacional**[6].

- **Residuos agrícolas leñosos**

Son los restos que se generan a partir de podas de frutales y viñedos. Al igual que los residuos agrícolas herbáceos, presentan una **marcada estacionalidad**, así como **altas fluctuaciones** en la producción de una temporada a otra. Además, en general es **necesario su astillado y compactación** en aras de disminuir la densidad aparente del residuo y abaratar así el coste de transporte.

- **Descartes frutales y hortícolas**

Son aquellos constituidos por los **descartes in situ de frutas y verduras no conformes** para los estándares de calidad que exigen los mercados alimenticios. Estos descartes también los componen aquellos productos que deben ser descartados debido a los mecanismos de regulación de precios del mercado europeo y la Política Agraria Común o por sus siglas PAC[7,8].

Los restos vegetales pueden ser **vectores de plagas y enfermedades**. Por ello, cuanto más se dejan secar estos materiales, para reducir el peso antes de su gestión, más se acrecientan los riesgos fitosanitarios. Esta cuestión deja en mano del agricultor una difícil decisión, cuyos dos factores son los riesgos fitosanitarios y ambientales y los costes de la gestión.

Las **principales formas de gestión de la biomasa residual agrícola** son:[9]

- Los restos de cultivos hortícolas en suelo (que no requieren de ningún sistema de atado sintético ni de acolchado sintético) pueden **incorporarse al terreno** al final de la cosecha. En este caso, la normativa no los considera residuo. En

algunos casos, la reincorporación de los restos no implica necesariamente un riesgo fitosanitario, ya que determinadas plagas o enfermedades no resisten al enterramiento.

- En otros cultivos, especialmente los perennes, los aclareos y las podas, se pueden **dejar directamente en el terreno**, con o sin trituración previa, jugando así los restos un papel de **protección del suelo** llamado **acolchado**. En este caso, tampoco se consideran residuo.

- La **alimentación animal** a partir de restos de cultivos sin transformación es una práctica tradicional, que complementa la dieta del ganado. Una de las ventajas de este reciclado es que permite rebajar el coste de su alimentación, y no requiere de una transformación previa. Asimismo, contribuye a aportar una cierta independencia alimentaria, especialmente en las zonas importadoras de piensos y otros elementos de la dieta. Esta práctica de reciclado se realiza dependiendo de la proximidad geográfica y social entre la cabaña ganadera y los restos vegetales. En este caso, tampoco se considera residuo. Esta práctica, que presenta numerosas ventajas, no siempre es aplicable en todas las granjas, especialmente en donde la alimentación está automatizada. Además, no siempre es correcta, cuando no se valora la idoneidad del resto dentro de la dieta animal y cuando la presencia de restos de productos fitosanitarios puede ser elevada. Se lleva a cabo particularmente en las zonas ricas en cultivos hortícolas.

- La **quema** de los restos vegetales abarca varias circunstancias. Por una parte, la quema de rastrojos (de los restos de cereales en campo) es una **práctica tradicional** que facilita las labores para la siguiente cosecha, pero **provoca daños a los suelos** (erosión, pérdida de materia orgánica…) y al **medioambiente** por las emisiones de humo, entre otras, por lo que está restringida para el acceso a ayudas directas. La quema de otros restos vegetales está autorizada, aunque se observa la **tendencia a su progresiva restricción** estacional (prohibiciones en verano) y territorial. Si bien implica la pérdida de un recurso orgánico, presenta la ventaja de ser una gestión simple y cómoda para el agricultor, especialmente interesante en caso de presencia de plagas o enfermedades. La quema debe ser controlada, es decir, se deben respetar las condiciones emitidas por el órgano competente y ser comunicada con antelación al mismo. En estas circunstancias, se considera que puede ser la gestión aceptable en casos puntuales, ya que evita el traslado de los residuos y, por tanto, la propagación de dichas plagas y enfermedades. Esta solución, con sus pros y sus contras, no suele resultar viable en zonas de alta concentración productiva, por el humo que supondría, y por las posibles afecciones a las personas. Por ello, ciertos ayuntamientos, especialmente en las zonas hortícolas intensivas, prohíben la quema. Además, la quema de restos vegetales conlleva el riesgo de que se quemen otros residuos no orgánicos a la vez con los problemas de contaminación asociados. Debe tenerse en cuenta que la quema de restos de poda generados por la actividad agrícola es uno de los aspectos con mayor influencia en **los incendios** forestales.

- Los restos vegetales pueden ser asimismo compostados. El **compostaje** es un proceso biológico natural, basado en la descomposición de la materia orgánica a través de la acción de microorganismos. Combinando condiciones adecuadas

de aireación, humedad y temperatura, con una mezcla equilibrada de ingredientes que contienen carbono y nitrógeno, este proceso permite obtener una **enmienda orgánica rica en compuestos fertilizantes**. Siempre que se realice de forma correcta, el producto resultante, el compost, es una materia orgánica estabilizada, inodora, libre de patógenos y elementos contaminantes, cuya aplicación al suelo resulta beneficiosa. Las cualidades del compost cuando se aplican al suelo son numerosas: mejora de la estructura del suelo, aumento en su capacidad de retención de agua, etc.

- Otra forma de gestión consiste en **ensilar** los restos vegetales. El ensilaje es un proceso de fermentación controlada en condiciones anaeróbicas que se usa, ante todo, como método de **conservación de material vegetal para la alimentación animal**. El ensilado puede ser realizado a partir de multitud de productos y restos, como cereales y leguminosas en primer caso y paja, pulpas derivadas de la agroindustria (remolacha, bagazos de destilería, restos de conserveras, de pescado…), destríos de frutas y hortalizas en el segundo caso, que no llegan a ser comercializados por motivos de mercado. Cuando se utiliza esta técnica, los materiales ensilados suelen constituir **una parte de la dieta animal**. En España parece predominar el ensilado de cereales y de forrajes y los restos de cultivos (esencialmente paja).

- Otra estrategia para la valorización de restos vegetales es la posibilidad **de transformarlos en papel y cartón**. A nivel mundial, existen numerosas experiencias de transformación en papel o cartón que han demostrado su viabilidad técnica y económica, a partir, especialmente, de paja de cereales y de raquis de plátano. En España funcionan varias plantas de transformación de residuos vegetales. El interés de esta materia prima para el sector del papel y del cartón radica en el **abaratamiento significativo de los costes** frente a la pasta de celulosa realizada a partir de madera, esencialmente por las necesidades energéticas que supone el proceso.

En la Tabla 2 se resumen las principales formas de gestión de los restos vegetales empleados hoy en día.

Tabla 2. Principales formas de gestión de los restos vegetales

Destino	Observaciones
Reincorporación al suelo	Constituye una aportación de materia orgánica para los suelos
Acolchado orgánico	Constituye una aportación de materia orgánica para los suelos con un efecto “mulching”
Cama para el ganado	A veces, es necesario triturar previamente los restos
Compostaje	Puede ser realizado de forma colectiva o individual, junto con otros residuos orgánicos
Vermicompostaje	Proceso de digestión aerobia de la materia orgánica mediante lombrices
Alimentación animal en fresco o henificado	Práctica tradicional, que no siempre se lleva a cabo de forma controlada

Alimentación animal con deshidratación industrial	La deshidratación requiere de maquinaria y energía
Ensilado para alimentación animal	Práctica habitual en zonas templadas con un invierno largo sobre todo con cultivos de forrajes y de maíz
Quema controlada	Existen restricciones para las quemas controladas de restos vegetales, especialmente en verano
Transformación para fabricación de pasta de papel y/o cartón	Existen varias plantas de transformación de paja en España
Valorización energética	A través de técnicas de digestión anaerobia, plantas de biomasa, obtención de carbón activo…
Eliminación vía entrega a vertedero	Este destino debería reducirse, por la progresiva aplicación de la normativa que regula el vertido de residuos
Abandono	Practica incorrecta, que conlleva riesgos de propagación de plagas y enfermedades, atrae a insectos y roedores
Quema no controlada	Practica incorrecta. Riesgo de incendios

3.3. Valorización energética de la biomasa residual agrícola

Tal y como se ha visto al analizar las principales formas de gestión de los restos vegetales, **uno de los destinos más habituales es su incineración controlada**, cuyo objetivo final es la eliminación de este material más que su aprovechamiento energético. No obstante, la valorización energética de **la biomasa residual agrícola con fines térmicos** se perfila como actividad de interés que contribuye no sólo a la **prevención de incendios** forestales, sino también a que ésta pase de ser un **residuo** que genera una serie de problemas asociados al mismo, a ser un **recurso** cuyo aprovechamiento energético pueda generar nuevas oportunidades de negocio a escala municipal y comarcal.[10]

La puesta en valor de la biomasa agroforestal para el **uso térmico**, además de ser una alternativa a las quemas agrícolas, supondría una oportunidad económica, al igual que la biomasa forestal resultante de la ejecución de los trabajos forestales de prevención de incendios. Todo ello, a su vez, contribuiría a generar puestos de trabajo en el entorno rural, donde están localizados los recursos biomásicos, una **oportunidad de desarrollo económico** para municipios de marcado carácter agroforestal.

Por otro lado, determinados **residuos agrícolas** que presentan un elevado contenido en **humedad**, como los descartes de frutas y hortalizas, no son los sustratos más idóneos para la valorización térmica ya que es necesario invertir mucha energía en su secado, reduciendo así la eficiencia de la valorización. Los **descartes** de las cosechas **hortofrutícolas** se caracterizan por ser residuos altamente **biodegradables** y tener un contenido considerable en **carbohidratos** lo que los convierten en buenos sustratos para la **valorización biológica**. En estos casos concretos la valorización biológica a través de la **digestión anaerobia** permite un mayor aprovechamiento energético al no requerir un secado previo de las biomasas obteniéndose en el proceso **biogás** rico en **metano**.[11]

Otros residuos agrícolas como los **restos de la cosecha de cereales**, fundamentalmente la **paja**, también pueden ser valorizados energéticamente a través de la **digestión anaerobia** (en algunos casos, debido a su contenido ligno-celulósico puede requerir de pretratamientos como el "steam explosion"[12]). El potencial de biogás que se puede obtener de la paja puede verse limitado, ya que este sustrato contiene un elevado porcentaje en lignina y celulosa, que es difícilmente digerible por los microrganismos responsables de la digestión anaerobia. A pesar de ello, la digestión anaerobia de la paja suele emplearse como mecanismo de **co-digestión de sustratos** con un contenido desbalanceado de carbono y nitrógeno, como las deyecciones ganaderas.

Otros residuos derivados de los cultivos de cereales son los **productos forrajeros ensilados que no reúnen las condiciones óptimas para el consumo animal**. El ensilado es un proceso biológico de fermentación microbiana, que descompone los polímeros vegetales a compuestos más fácilmente digeribles por los animales, pero en este proceso es frecuente que debido a un mal procedimiento de ensilado o a un inadecuado método de almacenamiento se produzcan contaminaciones microbianas que conlleven una pérdida del producto forrajero.[13] En la Figura 1, se puede apreciar un ejemplo de pérdida de materia ensilada debido a contaminaciones microbiológicas.



Figura 1. Ejemplo de contaminación micótica de un silo [14]

Independientemente del método de valorización energética, ya sea térmica o biológica, el **aprovechamiento energético** de la biomasa residual agrícola tendría varias **consecuencias positivas**, entre las que se pueden destacar las siguientes:

- Disminuiría el riesgo de **incendios** en campo.
- Disminuiría la aparición de **plagas**, ya que la incorporación en determinadas condiciones de los residuos al terreno transmite enfermedades.
- Podría representar un **menor coste** para el agricultor al pasar de considerarse un **residuo a subproducto**, con un valor residual comercializable que repercutiría positivamente en la balanza de ingresos y gastos, etc.

El uso energético de la poda ha estado ligado tradicionalmente al empleo de la leña como combustible doméstico. Sin embargo, durante la última década, el uso **de restos**

de poda en forma de astilla ha experimentado un **notable incremento** en su uso como combustible debido a:[15]

- La mejora de la retribución económica de los residuos agrícolas para generación de electricidad en el RD 661/2007.

- La necesidad de introducir nuevas fuentes de biomasa en plantas de generación eléctrica existentes y de nueva construcción.

- Expectativas surgidas en torno a la producción de pellets para uso doméstico.

Todo ello ha contribuido a desarrollar un incipiente sector, que incluye a empresas de fabricación y distribución de maquinaria agrícola adaptada y/o específica al procesado y acopio de biomasa en campo, a las empresas de servicio agrícola, a empresas comercializadoras de biomasa, y por supuesto a promotores y consultores energéticos.

Aun así, se estima que, a nivel nacional, **el uso actual de este tipo de biomasa no alcanza ni el 10 % de todo su potencial**[15], y existen además grandes diferencias en cuanto a zonas geográficas, que determina que en algunas comarcas su aprovechamiento sea inexistente. Esto se debe a que su desarrollo depende de la demanda y el consumo que de ella se realice, y en la actualidad este consumo está ligado casi exclusivamente a las plantas de generación eléctrica con biomasa, por lo que en aquellas zonas donde no hay posibilidad de venta, la quema y el aporte al suelo siguen siendo las únicas opciones del agricultor.

En concreto, debe tenerse en cuenta que los cultivos con **mayor potencialidad** o disponibilidad para su valorización energética son aquellos que cuentan con una **superficie importante de cultivo** y una **elevada densidad energética** superficial, es decir, producen una gran cantidad de biomasa por unidad de superficie. En cuanto a la biomasa residual agrícola producida y su valorización energética, para que ésta sea factible ha de tenerse en cuenta que:

- **La biomasa empleada no debe tener usos alternativos**.

- Existe una **superficie importante de cultivo** y se encuentra relativamente **concentrado**.

- Su **eliminación** de la zona de cultivos supone **un coste** para el agricultor.

- Actualmente, existen **tecnologías capaces de obtener y procesar el residuo a un precio competitivo**[¡Error! Marcador no definido.].

- A la hora de obtener la biomasa residual, **no se consideran aprovechables** aquellos cultivos que se encuentran en **terrenos con pendientes superiores** al **10 %,** debido a la dificultad de su mecanización, ya que los rendimientos de las máquinas se reducen al trabajar en pendientes superiores al 5 %.

- Debido al breve periodo de campaña de trabajo agrícola, es necesaria la recogida rápida en campo de estos residuos, por la climatología y para no entorpecer las labores agrícolas posteriores. Esto se traduce en la necesidad de

disponer de un elevado número de máquinas y en un coste horario de la máquina mayor, ya que se utiliza un corto periodo de tiempo en el año.

- Se debe poder **garantizar su suministro**.

3.4. Sector agrícola en España

A continuación, se analizan las últimas estadísticas "definitivas" disponibles sobre superficies y producciones agrícolas españolas publicadas en el **Anuario de Estadística del Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación de 2021**[16] (Tabla 3).

Tabla 3. Superficie dedicada a cultivos en España en el 2020 [16]

Cultivo	Superficie (ha)	Superficie (%)	Producción (t/a)
Cereales grano	6.069.237	44,45	26.389.584
Leguminosas grano	366.926	2,69	555.232
Tubérculos	69.873	0,51	2.164.461
Cultivos industriales	871.130	6,38	3.901.576
Cultivos forrajeros	1.203.350	8,81	26.533.293
Hortalizas	386.084	2,83	15.180.448
Frutales cítricos	268.411	1,97	7.037.469
Frutales no cítricos	917.610	6,72	4.434.972
Viñedo	876.507	6,42	6.817.766
Olivar	2.623.721	19,22	8.137.805
Total	**13.652.849**	**100**	**101.152.606**

Según los datos analizados, la superficie dedicada a cultivos en España rondaba los **14 millones de hectáreas (ha)** en el año 2020. La superficie media dedicada a cereales en grano ese mismo año fue de aproximadamente **6 millones de ha**, siendo el primer grupo de cultivos en importancia según la superficie utilizada, que fue de un 44 % del total. Dentro de este grupo **destaca la cebada**, con 2,7 millones de ha cultivadas, **seguida del trigo**, con 1,9 millones de ha. Les siguen de lejos, la avena con 506.168 ha y el maíz con 343.778 ha.

En relación con los **residuos procedentes de los cultivos**, los últimos datos actualizados encontrados proceden de un estudio del Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE) del año 2011[6].

Los resultados de dicho estudio están resumidos en la Tabla 4. Según estos datos**, en España se generan cerca de 31 millones de toneladas anuales de residuos procedentes de cultivos agrícolas** de los cuales aproximadamente el **5 %** son generados en Galicia[6]. En comparación con otras comunidades autónomas, la generación de residuos agrícolas no es la más abundante, ya que destacan otras comunidades como Andalucía o Castilla y León.

Tabla 4. Restos agrícolas* generados en España en el 2011 [6,15]

Comunidad Autónoma	Herbáceos (t/a)	Leñosos (t/a)	Total	
			(t/a)	(%)
Andalucía	2.518.996	4.957.623	7.476.619	24,5
Aragón	1.257.356	1.419.104	2.676.460	8,8
Asturias	0	378.173	378.173	1,2
Cantabria	41.213	6.518	47.731	0,2
Castilla-La Mancha	2.060.321	1.073.376	3.133.697	10,3
Castilla y León	4.167.623	230.759	4.398.382	14,4
Cataluña	1.045.020	2.210.580	3.255.599	10,7
Comunidad Valenciana	52.487	2.223.407	2.275.894	7,4
Extremadura	898.837	982.766	1.881.602	6,2
Galicia	**992.906**	**550.870**	**1.543.777**	**5,1**
Islas Baleares	113.942	405.250	519.191	1,7
Islas Canarias	310	179.767	180.076	0,6
La Rioja	229.865	217.358	447.223	1,5
Madrid	137.583	62.472	200.055	0,7
Murcia	56.376	1.028.553	1.084.929	3,6
Navarra	641.182	126.822	768.005	2,5
País Vasco	220.548	64.823	285.372	0,9
Total	**14.434.566**	**16.118.220**	**30.552.785**	**100**

* contenido de humedad del 45 %.

3.5. Sector agrícola en Galicia

Según los datos de la Xunta de Galicia, la superficie dedicada a cultivos y prados/pastizales en Galicia sumaban en el 2020 aproximadamente 963.270 ha [17], pero el suelo gallego está caracterizado por el **minifundismo**, con un buen número de explotaciones de pequeño tamaño. Esto limita enormemente su puesta en valor por la escasa rentabilidad que, por ejemplo, supone su laboreo con la maquinaria existente, actualmente diseñada para grandes extensiones de terreno[18]. Según los datos, correspondientes al año 2009[19], en Galicia la distribución de las explotaciones agrarias con tierras según la superficie total es como se muestra en la Tabla 5:

Tabla 5. Distribución de explotaciones agrarias en Galicia en función de su tamaño

Superficie de la explotación (ha)	Explotaciones con tierras (ud)	Porcentaje sobre el total (%)
>=0,1 a <5	37.857	47,94
>=5 a <10	15.297	19,37
>=10 a <20	13.503	17,10
>=20 a <50	10.033	12,70
>=50	2.281	2,89

Entendiendo que **minifundio** se refiere a fincas agrícolas con una **extensión igual o inferior a 10 hectáreas**, valor habitualmente empleado en España [20], lo cierto es que en Galicia más del 50 % de las explotaciones con tierras pertenecen a esta categoría (67,31 %), pero también destaca el porcentaje de explotaciones por debajo de 5 ha (47,94 %) (Tabla 5).

Por otra parte, y tal como se comentó anteriormente, ha de tenerse en cuenta que **no se consideran aprovechables aquellos cultivos que se encuentran en terrenos con pendientes superiores al 10 %**, debido a la dificultad de su mecanización, ya que los rendimientos de las máquinas se reducen al trabajar en pendientes superiores al 5 %. En Galicia alrededor de un 60 % de la superficie cuenta con más de un 10 % de pendiente, siendo el valor promedio de pendiente de 19,94 % [21].

En base a estas consideraciones ha de tenerse en cuenta que tanto cuando se estimen los residuos producidos a partir de los diferentes cultivos como cuando se establezca su potencial energético se considerará la **totalidad de la biomasa agrícola residual potencial existente,** y no la realmente disponible.

En general, la **superficie agrícola gallega** se destina principalmente a **cultivos cerealeros, hortícolas, frutícolas y forrajeros**.

Dentro del cultivo de cereales, en Galicia **destaca** el cultivo de **trigo y maíz**, con más de 13.000 ha de superficie cada uno, y una producción global de **más de 132.000 t/a de grano** (Tabla 6). En la provincia de **Ourense** es en la que se registra una **mayor producción de trigo**, y en **A Coruña** de **maíz**.

Tabla 6. Superficie y producción de cereales de los principales cultivos en Galicia [16]

Cultivo	A Coruña	Lugo	Ourense	Pontevedra	Total
Trigo					
Superficie (ha)	1.872	2.698	8.685	207	**13.462**
Producción de grano (t/a)	5.691	6.475	23.449	460	**36.075**
Cebada					
Superficie (ha)	184	22	691	4	**901**
Producción de grano (t/a)	379	47	946	8	**1.380**
Avena					
Superficie (ha)	105	54	11	16	**186**
Producción de grano (t/a)	294	97	25	28	**444**
Centeno					
Superficie (ha)	79	655	3.647	45	**4.426**
Producción de grano (t/a)	323	2.424	11.744	139	**14.630**
Maíz					
Superficie (ha)	6.488	2.063	1.900	5.248	**15.699**
Producción de grano (t/a)	44.740	13.595	11.446	26.293	**96.074**

El **principal residuo** derivado del cultivo de cereales es la **paja**, material caracterizado por presentar un alto contenido en celulosa y sobre un 10% de lignina, y un bajo nivel de humedad tras un periodo de secado.

La **mayor parte de la paja** producida se destina a la ganadería, donde se utiliza como **alimento o como cama**. Antes de establecerse las medidas "contra incendios" en los ámbitos rurales, la quema de paja junto con los rastrojos era un procedimiento bastante frecuente en el campo español.

Otros posibles usos de la paja, aunque minoritarios, son los siguientes:

- Obtención de papel de paja.
- Obtención de glucosa y furfural.
- Componente en la fabricación de tableros.
- Aislante y material de relleno en materiales de construcción.
- Cultivo del champiñón.
- Empleo como combustible.
- Obtención de estiércol artificial.
- Agente de aireación y/o fuente de carbono para el compostaje de residuos pastosos o excesivamente ricos en nitrógeno[3].

La incorporación al suelo, o enterrado de pajas, comporta un aporte importante de materia orgánica y su posterior humidificación, mejorando el balance de humus, y favoreciendo el reciclaje natural de los nutrientes asimilados por los cultivos.

Los cultivos de **maíz** producen residuos diferentes que consisten en **carozos**, **tallos** y **hojas** que suelen quedar en el campo después de la cosecha. El **carozo** es un residuo o subproducto agrícola importante que se genera en grandes cantidades en el proceso de separación del grano de la mazorca. Se puede emplear como **adsorbente** para reducir el color y turbidez de las aguas residuales, como **materia prima en la industria del tablero o como abrasivo de limpieza**. El **tallo del maíz** es robusto, erecto, sólido, de forma cilíndrica y nudoso, con una médula esponjosa por donde circula la savia que crece verticalmente hacia arriba desde el suelo, teniendo como posibilidad la producción de la hoja. La altura del tallo depende de la variedad del maíz y del ambiente en el cual se cultiva la planta. Este residuo se suele emplear **como forraje** o como **materia prima** para la producción **de aceites** u otros compuestos, incluidos los **biocombustibles**. Las **hojas** son la parte seca, rugosa y frágil que cubre o protege la parte exterior de la mazorca de maíz y además son residuos agrícolas que se generaran en grandes cantidades después de la cosecha[22].

Los **cultivos forrajeros** merecen una distinción aparte. Tal y como se observa en la Tabla 7, los cultivos forrajeros ocupan aproximadamente 790.000 ha. Destaca la superficie dedicada a los prados naturales, y la producción asociada a las **praderas polifitas** y la producción **de maíz forrajero.**

Tabla 7. Superficie y producción de forraje de los principales cultivos en Galicia [16]

Cultivo	A Coruña	Lugo	Ourense	Pontevedra	Total
Maíz forrajero					
Superficie (ha)	45.032	19.543	852	5.003	**70.430**
Producción forraje (t/a)	1.322.188	468.055	26.948	160.990	**1.978.181**
Praderas polifitas					
Superficie (ha)	87.221	96.735	1.798	18.385	**204.139**
Producción forraje (t/a)	1.833.689	1.594.193	21.873	294.160	**3.743.915**
Prados naturales					
Superficie (ha)	79.341	140.367	61.427	44.851	**325.986**
Producción forraje (t/a)	-	-	-	-	**-**
Pastizales					
Superficie (ha)	36.120	52.538	84.912	28.950	**202.520**
Producción forraje (t/a)	-	-	-	-	**-**

Los **cultivos forrajeros** se dedican fundamentalmente a la **alimentación animal**. Por extensión, se incluyen las **praderas y pastos naturales**, estén cultivados o no[23]. Se define pradera como el cultivo polifito constituido fundamentalmente por **gramíneas y leguminosas**, que puede ser aprovechado en forma de siega o pastoreo o las dos a la vez. En general son plurianuales. Con el paso del tiempo pueden naturalizarse (las especies sembradas son sustituidas por espontáneas), transformándose en prados o pastizales, en función de la humedad. Las praderas también son comunidades de plantas que poseen características especiales, tales como la continua formación de tejidos nuevos en épocas de crecimiento y de envejecimiento, muerte y descomposición, después de cada defoliación (pastoreo o siega)[24].

Los cultivos forrajeros pueden clasificarse como **temporales o permanentes**. Los primeros se cultivan y cosechan como cualquier otro. Los cultivos forrajeros permanentes corresponden a tierra utilizada de manera continuada (durante cinco años o más) a plantas forrajeras herbáceas, cultivadas o de crecimiento espontáneo (es decir, praderas silvestres o pastizales) y pueden estar incluidas algunas partes de tierras forestales si se utilizan para el pastoreo[2323].

Los cultivos temporales de carácter intensivo con cortes múltiples al año comprenden tres grupos principales de forraje: **gramíneas**, incluidos los cereales que se cosechan verdes; **leguminosas**, incluidas las legumbres que se cosechan verdes; y **cultivos de raíces que se destinan a forraje**. Los tres tipos se administran a los animales, en forma de forraje verde, heno (es decir, cultivos cosechados secos o secados después de la recolección) o como productos de ensilado.

El contenido de fibra de la mayoría de los cultivos forrajeros consiste en celulosa, un polisacárido de carbohidratos complejos que las personas no pueden digerir, pero que es una buena fuente de energía para los animales, en particular los rumiantes. Los animales son capaces de digerir parte de la celulosa presente en tallos, hojas e incluso raíces para obtener así los principios nutritivos contenidos en dichas plantas y transformarlos a su vez en carne, leche, etc. La cantidad de celulosa varía de unas especies a otras.

Por otro lado, a la **producción hortícola** en Galicia se le destina una totalidad de aproximadamente **31.000 ha**, destacando las provincias de **A Coruña y Ourense** con aproximadamente **10.000** y **9.000 ha**, respectivamente (Tabla 8).

Esta ocupación del terreno conlleva una producción de hortalizas que alcanza un valor total de **679.043 toneladas** anuales, entre las que **destaca la producción de patata** en la provincia de Ourense (118.037 t/a).

Tabla 8. Superficie y producción de hortalizas de los principales cultivos en Galicia [16]

Cultivo	A Coruña	Lugo	Ourense	Pontevedra	Total
Col					
Superficie (ha)	400	205	400	265	**1.270**
Producción de hort. (t/a)	17.318	10.940	17.840	9.745	**55.843**
Lechuga					
Superficie (ha)	213	138	138	306	**795**
Producción de hort. (t/a)	7.389	4.457	4.043	10.342	**26.231**
Acelga					
Superficie (ha)	28	17	33	34	**112**
Producción de hort. (t/a)	1.834	1.058	1.990	1.693	**6.575**
Berza					
Superficie (ha)	49	72	51	36	**208**
Producción de hort. (t/a)	1.789	2.592	714	1.332	**6.427**
Grelo					
Superficie (ha)	2.403	1.691	1.061	352	**5.507**
Producción de hort. (t/a)	33.321	14.984	11.035	2.651	**61.991**
Calabacín					
Superficie (ha)	43	17	20	22	**102**
Producción de hort. (t/a)	2.924	1.166	1.238	1.436	**6.764**
Tomate					
Superficie (ha)	290	168	224	346	**1.028**
Producción de hort. (t/a)	22.536	12.475	17.418	32.394	**84.823**
Pimiento					
Superficie (ha)	368	143	197	366	**1.074**
Producción de hort. (t/a)	28.346	7.088	6.875	13.792	**56.101**
Cebolla					
Superficie (ha)	354	190	267	357	**1.168**
Producción de hort. (t/a)	7.965	4.484	8.597	9.996	**31.042**
Puerro					
Superficie (ha)	45	15	21	74	**155**
Producción de hort. (t/a)	789	254	339	1.183	**2.565**
Zanahoria					
Superficie (ha)	25	21	21	49	**116**
Producción de hort. (t/a)	565	496	463	1.194	**2.718**

Judía verde					
Superficie (ha)	406	240	400	441	**1.487**
Producción de hort. (t/a)	16.113	9.254	14.800	10.593	**50.760**
Judía seca					
Superficie (ha)	868	536	223	262	**1.889**
Producción de hort. (t/a)	1.867	1.341	253	435	**3.896**
Patata					
Superficie (ha)	4.291	3.343	5.715	2.654	**16.003**
Producción de hort. (t/a)	66.145	50.340	118.037	49.145	**283.667**

Las **biomasas residuales** generadas durante estos cultivos son principalmente **hojas, raíces, tallos y piezas rechazadas** por no ser conformes con los estándares de calidad del mercado.

Los residuos de la horticultura comestible pueden ser **incorporados en el suelo** antes del próximo ciclo de cultivo. Sin embargo, esta práctica no siempre está permitida para evitar los **riesgos fitosanitarios**. Es por esto por lo que se suelen amontonar al aire libre para su secado natural. Una vez disminuido el contenido de humedad, estos residuos pueden tener 4 destinos diferentes: **1) transporte a otra finca para ser incorporados en el suelo; 2) quema in situ; 3) deposición en vertederos; 4) materia prima para la producción de compost.** Esta última opción representa la estrategia más ecológica y respetuosa con el medio ambiente dado que conlleva una reducción del volumen de biomasa, su estabilización y su higienización[3].

Los **frutales** gallegos actualmente en producción cubren un total de **35.371 ha** (Tabla 9). Entre toda la superficie dedicada a la producción de fruta se obtienen aproximadamente **200.000 t/a**. En la producción frutícola destaca la provincia de **A Coruña** con **33.400 toneladas** anuales de producción de **manzana**.

La superficie dedicada a la producción de **fruto seco**, que se enfoca principalmente en la producción de **castaña** es de aproximadamente **25.000 ha,** concentradas en **Ourense** y **Lugo**.

Tabla 9. Superficie y producción de frutas de los principales cultivos en Galicia [16]

Cultivo	A Coruña	Lugo	Ourense	Pontevedra	Total
Manzana					
Superficie (ha)	2.339	1.856	800	1.002	**5.997**
Producción de fruta (t/a)	33.401	24.386	11.545	17.535	**86.867**
Pera					
Superficie (ha)	208	125	142	104	**579**
Producción de fruta (t/a)	1.921	1.508	1.761	1.186	**6.376**
Cereza					
Superficie (ha)	183	191	205	98	**677**
Producción de fruta (t/a)	366	649	377	341	**1.733**
Melocotón					

Superficie (ha)	489	172	174	181	**1.016**
Producción de fruta (t/a)	1.736	657	677	681	**3.751**
			Ciruela		
Superficie (ha)	253	85	120	114	**572**
Producción de fruta (t/a)	495	331	468	442	**1.736**
			Higo		
Superficie (ha)	304	79	138	86	**607**
Producción de fruta (t/a)	1.366	345	646	340	**2.697**
			Kiwi		
Superficie (ha)	265	19	19	538	**841**
Producción de fruta (t/a)	4.452	177	256	8.654	**13.539**
			Fresa		
Superficie (ha)	14	43	11	12	**80**
Producción de fruta (t/a)	400	1.032	291	300	**2.023**
			Castaña		
Superficie (ha)	2.865	7.396	13.812	917	**24.990**
Producción de fruta (t/a)	2.292	30.323	45.579	2.889	**81.083**

En este sector, se pueden producir varias tipologías diferentes de residuos, entre ellos los **descartes y destríos**, y los residuos correspondientes a los restos generados durante la **poda y el mantenimiento de las fincas**.

España es uno de los mayores productores de vino en el mundo. El 95,8 % de la uva producida se destina a la industria vitivinícola y el restante al consumo como uva de mesa. Los restos generado en la finca derivan exclusivamente de **la poda de vid**. Esta operación, que se lleva a cabo a partir de noviembre, genera **sarmientos** que corresponden a los vástagos de la vid que han sido los ramos de producción de la cosecha anterior. **Estos residuos suelen incorporarse en el suelo, quemarse, o utilizarse como alimento para el ganado** [25].

En Galicia en el 2020 había **17.988 ha** de viñedos en producción, ubicados principalmente en la provincia de Pontevedra, destinados al cultivo de uvas para vinificación (Tabla 10).

Tabla 10. Superficie y producción de uvas en Galicia [16]

Cultivo	A Coruña	Lugo	Ourense	Pontevedra	Total
			Uva		
Superficie (ha)	1.817	1.773	5.131	9.267	**17.988**
Producción uvas (t/a)	7.714	7.358	36.174	90.909	**142.155**

3.6. Sector agrícola en A Limia

La comarca de A Limia es una comarca gallega situada en la provincia de Ourense, a la que pertenecen los municipios de Baltar, Os Blancos, Calvos de Randín, Porqueira,

Rairiz de Veiga, Sandiás, Sarreaus, Trasmiras, Vilar de Barrio, Vilar de Santos y Xinzo de Limia[17].

Esta comarca, de importante actividad agrícola y ganadera, ocupa una superficie total de 80.264 ha, cuyo aprovechamiento de las tierras[17,26] se muestra en la Tabla 11.

Tabla 11. Distribución general de tierras en la comarca de A Limia en el 2020 [17, 26]

Tierras de cultivo				Prados y pastos	Otras superficies	Superficie forestal	Superficie total
Cultivos herbáceos	Cultivos leñosos	Otras tierras de cultivo	Cultivos asociados y sucesivos				
13.507	386	3.133	610	13.700	7.964	42.184	80.264

En la **superficie agrícola de la comarca de A Limia,** dentro del grupo de cultivos herbáceos, predomina el **cultivo de cereales y patatas** (Tabla 12).

Tabla 12. Distribución de los principales grupos de cultivos en la comarca de A Limia en el 2020 [17, 27]

Cultivos herbáceos (ha)					Cultivos leñosos (ha)		
Cereales grano	Cultivos forrajeros	Tubérculos	Leguminosas grano	Hortalizas, flores y viveros	Frutales	Castaño	Viñedo
9.182	1.173	2.675	14	462	71	311	5

Como ya se había visto en el sector agrícola en Galicia, dentro del cultivo de cereales en grano, en Ourense destaca el cultivo de trigo, tendencia que se mantiene en la comarca de A Limia (Tabla 13)[17, 27].

Tabla 13. Distribución de los principales cultivos en la comarca de A Limia en el 2020 [17, 27]

Cereales grano (ha)			Cultivos forrajeros (ha)				Prados (ha)
Maíz grano	Trigo	Otros cereales de grano	Maíz forrajero	Praderas	Col forrajera	Otras forrajeras	Prados
81	6.645	2.457	410	434	91	238	7.426

Para estimar la producción de los cultivos, ante la falta de datos detallados, se usa el rendimiento de producción de los cultivos (t/a) para el total de hectáreas cultivadas en provincia de Ourense y se referencia al valor de hectáreas de la comarca.

Por ejemplo, para estimar la **producción de trigo** en la comarca se tiene en cuenta que, en la provincia de Ourense, por cada hectárea sembrada de trigo se obtienen sobre 2,70 toneladas de grano al año. Por lo tanto, se puede considerar que en A Limia se deben de producir sobre 17.941 toneladas/año.

En el caso de los tubérculos (Tabla 12), cabe destacar que de las 5.715 ha de patatas cultivadas en la provincia de Ourense casi la mitad de la superficie se encuentra en A Limia[27]. Para estimar la **producción de patata** en la comarca, sabiendo que en Ourense por cada hectárea cultivada de patatas se produjeron 20,65 toneladas, la producción estimada de patatas de A Limia es de 55.249 t/año.

3.7. Sector agrícola en A Baixa Limia

La comarca de A Baixa Limia es otra de las doce comarcas que forman la provincia de Ourense y limita al este con la comarca de A Limia, anteriormente estudiada.

Esta comarca, a la que pertenecen los municipios de Bande, Entrimo, Lobeira, Lobios y Muíños, ocupa una superficie total de 53.031 ha.[17] Cuyo aprovechamiento de las tierras[17,26] está distribuido según se muestra en la Tabla 14.

Tabla 14. Distribución general de tierras en la comarca de A Baixa Limia en el 2020 [17, 26]

Tierras de cultivo				Prados y pastos	Otras superficies	Superficie forestal	Superficie total
Cultivos herbáceos	Cultivos leñosos	Otras tierras de cultivo	Cultivos asociados y sucesivos				
632	438	131	99	12.033	9.768	30.127	53.031

En este caso, buena parte de la **superficie agrícola** está dedicada a **cultivos herbáceos y leñosos**.

Dentro de los cultivos herbáceos, destaca el **cultivo de cereales, hortalizas y tubérculos** (Tabla 15).[17, 27]

Tabla 15. Distribución de los principales grupos de cultivos en la comarca de A Baixa Limia en el 2020 [17, 27]

Cultivos herbáceos (ha)					Cultivos leñosos (ha)		
Cereales grano	Cultivos forrajeros	Tubérculos	Leguminosas grano	Hortalizas, flores y viveros	Frutales	Castaño	Viñedo
194	89	152	25	172	111	222	105

Esta comarca no sigue la tendencia general de la provincia en cuanto al cultivo de cereales, ya que en A Baixa Limia destaca la **producción de maíz de grano** (Tabla 16).[17, 27]

Para estimar la **producción de maíz de grano**, se tiene en cuenta que, en la provincia de Ourense, por cada hectárea sembrada de maíz de grano se obtienen sobre 6,02 toneladas de grano al año. Por lo tanto se puede estimar que en A Baixa Limia se deben de producir sobre 1.036 toneladas/año de este cereal.

Tabla 16. Distribución de los principales cultivos en la comarca de A Baixa Limia en el 2020 [17, 27]

Cereales grano (ha)			Cultivos forrajeros (ha)				Prados (ha)
Maíz grano	Trigo	Otros cereales de grano	Maíz forrajero	Praderas	Col forrajera	Otras forrajeras	
172	17	6	4	10	49	26	2.250

Como ya se ha mencionado, el rendimiento del cultivo de patatas en Ourense es de 20,65 t/ha, por lo que la **producción estimada de patatas** en esta comarca es de 3.139 t/año.

Teniendo en cuenta que, en la provincia de Ourense, por cada hectárea de castaños se obtienen sobre 3,30 toneladas de castañas al año, se puede estimar que en A Baixa Limia la **producción de castaña** se sitúa en torno a 733 toneladas/año.

4 Metodología

4.1. Fuentes de información

En este estudio se utilizaron diferentes fuentes de información, ofreciéndose en cada caso los datos más actualizados disponibles. A continuación, se muestran las **principales fuentes** empleadas:

- Los datos inherentes a la superficies y producciones agrícolas tanto de los cultivos españoles como gallegos en el 2020 proceden del **Anuario de Estadística 2021** elaborado por del Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación (**MAPA**)[16]. De este informe también ha sido posible extraer la cantidad de paja cosechada (cultivos de cereales).
- Los datos relativos a la distribución de las tierras y a la superficie de los cultivos de las comarcas de A Limia y A Baixa Limia en el 2020 proceden de las **estadísticas agrarias**, información tanto de la página web de la **Consellería do Medio Rural**[17] de la Xunta de Galicia como del Instituto Galego de Estatística (**IGE**)[28].
- La superficie de los cultivos de la comarca de A Limia, así como también la cantidad de descartes de tubérculos y hortalizas, fueron obtenidos a partir de la información facilitada por la Asociación de Empresarios, Gandeiros e Agricultores da Limia (**ADEGAL**).
- Los datos de humedad, cenizas, materia volátil, y poder calorífico fueron obtenidos, de manera general, de la base de datos: Phyllis2[29] (https://phyllis.nl/).
- La cantidad de descartes de frutas y verduras fueron calculados, de manera general, a partir de los datos publicados en el informe PROBIOGÁS[7].

4.2. Evaluación y cuantificación de los residuos

Para la realización del presente informe fueron considerados los **residuos de origen agrícola** producidos en la provincia de **Ourense** tanto para la **valorización biológica** (digestión anaerobia) como para la **valorización térmica** (combustión). Los cálculos se basaron en la superficie de cultivo y/o en la producción agrícola.

4.2.1. Evaluación y cuantificación de residuos y del potencial energético bruto mediante valorización biológica

Para evaluar el proceso de valorización biológica, mediante digestión anaerobia, se establecieron las características generales de los residuos y su potencial de generación de biogás (BMP) acudiendo a **diferentes fuentes bibliográficas de referencia** (indicadas a lo largo del texto). Fueron tenidos en cuenta aquellos residuos que son producidos en cantidades considerables y/o que presentan un mayor potencial de biogás.

Estos residuos agrícolas consistieron en **residuos de cultivos cerealeros**, es decir, restos de trigo, cebada y centeno y restos de la planta de maíz (que engloba hoja, tallo y carozo), los residuos **hortofrutícolas (descartes y restos de hortalizas y frutas) y residuos del ensilado de maíz**. Otros residuos agrícolas procedentes de los cultivos de vides no fueron considerados para la valorización biológica ya que durante la cosecha no se generan descartes considerables.

Para la digestión anaerobia de todos los residuos agrícolas se consideró que el biogás obtenido presenta un **porcentaje de metano del 60 %** y que el **biometano** tiene un contenido energético de **9,96 kWh/m³**. Todos los **residuos** evaluados para la valorización biológica están considerados en **base húmeda**.

A continuación, se presentan las consideraciones específicas de cada tipología de residuo:

4.2.1.1. RESIDUOS CEREALEROS

Estos consistieron en la paja y en los restos del cultivo del maíz. Para este estudio fue considerado como paja lo restos procedentes de los 3 cultivos cerealeros: **trigo, cebada y centeno.**

1. A partir de las bases de datos de estadística agraria[16] se obtuvo información de la cantidad de paja cosechada de trigo, cebada y centeno. Se consideró que, de la cantidad de paja producida en el cultivo del cereal, el 50 % es cosechada y la restante es un residuo.[30] Por lo tanto, la cantidad equivalente de la paja cosechada será biomasa residual y toda está disponible para valorización biológica. En el caso del cultivo de maíz, se utilizó un factor de generación de residuo de **1,45 t residuo/t producto**.[31]

2. Para la realización de los cálculos se consideró que la paja presenta un contenido en humedad de 15,1 % del peso total, solidos totales (ST) de 85 % y solidos volátiles (SV) de 76 %.[32] En cambio, para los cálculos relativos a los restos del maíz se empleó un contenido en humedad de 5 % del peso total, 95 % de ST y 88 % de SV.[33]

3. Para realizar el cálculo del potencial de biogás de la paja se consideró un valor de **34 $Nm^3_{biogás}/t$** [34] y para los restos de cultivo de maíz se fijó un valor de **50 $Nm^3_{biogás}/t$** [35].

4. No fue considerado el gasto energético que podría conllevar la trituración de los residuos evaluados.

4.2.1.2. RESIDUOS FORRAJEROS

1. Se asumió que la **totalidad** del maíz forrajero se **ensila** como método de conservación del alimento animal y sólo se consideró la producción de **residuos** del **ensilado**.
2. Para la realización de los cálculos se consideró el ensilado de maíz tiene un contenido en humedad de 70 % del peso total, sólidos totales (ST) de 30 % y sólidos volátiles (SV) de 26 %.[36]

3. Para la determinación de la disponibilidad de producto ensilado no conforme para alimentación animal se consideró que las pérdidas de ST como consecuencia de la contaminación microbiológica pueden representar de manera promedio el **2,3 %** del total.[13]
4. Para realizar el cálculo del potencial de biogás del residuo de maíz ensilado se consideró un valor de **56 $Nm^3_{biogás}/t$**.[37]

5. No fue considerado ningún tratamiento complementario al ensilado del maíz que pudiese aumentar la degradación anaeróbica (explosión por vapor, enzimático o químico).

4.2.1.3. RESIDUOS HORTOFRUTÍCOLAS (FRUTAS Y VERDURAS)

Los residuos de frutas y verduras generados fueron considerados para el presente estudio. Dada a la similitud en las características fisicoquímicas de los residuos de las frutas y de las verduras se empleó la misma metodología para su cuantificación y su valorización energética que consistió en:

1. Determinación del porcentaje de frutas y verduras evaluadas como residuos. Para este fin se tuvieron en cuenta los **descartes** de frutas y hortalizas **no conformes** debido a su baja calidad para la comercialización y a los productos retirados debido a los mecanismos de regulación de precios establecidos por la Política Agraria Común (PAC)[8] y que su producción anual (residuos) superasen las 100 toneladas. Para la determinación del porcentaje de residuos disponibles para la digestión anaerobia se recurrió a los datos publicados en el informe de residuos vegetales de PROBIOGÁS.[7] Para los productos hortofrutícolas se consideró que los **no conformes** representan **1 %** del total de la cosecha, mientras que los **retirados** por la normativa vigente es de manera promedio del **5 %**, por lo tanto, el total los residuos representan en torno al **6 % de la producción total**.

2. Los cultivos de hortalizas evaluados fueron: **col, lechuga, acelgas, grelos, tomate, pimiento, cebolla, judías verdes y patatas.**

3. Los cultivos frutales evaluados para la valorización biológica fueron: **manzana y pera**. Para la evaluación de los potenciales residuos solo fueron consideradas las plantaciones regulares, quedando excluidas del análisis los árboles dispersos.

4. Para la realización de los cálculos de los residuos hortofrutícolas se consideró que presentan de manera promedio un contenido en humedad de 87 %, sólidos totales (ST) de 13 % y sólidos volátiles (SV) de 12 %[11].

5. Para la realización del cálculo del potencial de biogás de los residuos hortofrutícolas se tomó como valor promedio **159 $Nm^3_{biogás}/t$**.

4.2.2. Evaluación y cuantificación de los residuos agrícolas para valorización térmica

Con objeto de seleccionar los residuos destinados a valorización térmica, se evaluó la superficie de cada cultivo frente a la superficie total de cada tipología que aparece en los datos de estadística agraria de España [16] para establecer los más representativos.

En la Tabla 17 se muestran la superficie mínima ocupada, así como los cultivos considerados dentro de cada tipología y los residuos que se pueden generar.

Se han considerado:

- Todos los cultivos de cereales y viñedos.
- En el caso de las hortalizas se han considerado aquellas con una superficie de cultivo superior al 4 %.
- Dentro de los frutales se ha dividido la tipología entre frutales de fruto seco, seleccionando los castaños con una superficie de cultivo mayor al 97 %, y el resto de los frutales (cítricos y no cítricos), donde se ha considerados una superficie límite de cultivo superior al 10 %.

En general, los restos procedentes de cultivos de cereales y hortalizas se consideraron como **residuos herbáceos**, mientras que los residuos de frutales y viñedos se consideraron como **residuos leñosos** (restos de poda).

Tabla 17. Cultivos y residuos considerados en este estudio

Tipología	Límite mínimo de superficie ocupada (%)	Cultivos	Residuos considerados
Cereales	0	Trigo, maíz, avena, cebada, centeno, otros cereales de invierno	**Paja** de cereal en general, **hojas, tallos y carozos** de los cultivos de maíz
Hortalizas	≥ 4	Col, judías verdes, patatas	**Raíces, tallos y residuos verdes (follaje)** en general
Frutales de fruto seco	≥ 97	Castaño	**Restos de poda**
Resto de frutales	≥ 10	Manzano, cerezo, melocotonero	**Restos de poda**
Viñedos	0	-	**Restos de poda**

La cantidad de **paja cosechada durante la producción de cereales** (trigo, cebada, centeno y avena) aparece cuantificada en las fuentes del Ministerio [16]. Se consideró que, de la cantidad de paja producida en el cultivo del cereal, el 50 % es cosechada y la restante es un residuo [30]. Por lo tanto, la cantidad equivalente de la paja cosechada será biomasa residual y toda está disponible para valorización Se consideró que el 100 % de esta biomasa es un residuo y que está disponible para valorización térmica.

En los demás casos, a partir de los datos estadísticos sobre la superficie de cultivos [16], se realizó el **cálculo aproximado** de la cantidad de **residuos orgánicos derivados de la agricultura**.

Los valores se han obtenido mediante la multiplicación de los datos de superficie ocupada, o de producción total para cada tipología de cultivo, por el potencial de generación de residuos por hectáreas (Residue to Surface Ratio, **RSR**) o por toneladas de producto (Residue to Product Ratio, **RPR**). Para este cálculo sólo se consideraron las superficies en producción y sin distinción entre producción en secano (el aporte de agua para las plantas depende exclusivamente de las precipitaciones atmosféricas) o regadío (a lo largo de la siembra o desarrollo del cultivo ha sido regado, al menos una vez).

En el caso de las judías verdes, dada la falta de fuentes que indiquen el RSR o el RPR, se evaluó el RPR a partir del índice de cosecha (**IC**), definido como la relación entre la parte cosechada y la biomasa total de la parte aérea, con un valor de 0,40 t/t [30].

$$RSR = \frac{Residuo}{Superficie}\ ;\quad IC = \frac{Producto}{Producto+R}\ ;\quad RPR = \frac{Residuo}{Producto} = \frac{1}{IC} - 1$$

En la Tabla 18 se ilustran los valores de RPR y RPS encontrados en la bibliografía y calculados. Si el estudio de referencia indicaba un rango de valores para el factor de generación de residuos, en este informe se reportó el promedio aritmético de dichos valores.

Las cantidades de los diferentes residuos agrícolas serán proporcionadas en **peso seco,** obtenidos a partir de los valores de humedad de la Tabla 18.

Tabla 18. Valores de generación de residuos a partir de suelo ocupado (RSR) o de cantidad de producto (RPR). El contenido de humedad de los residuos se reporta entre paréntesis.

Cultivo	RSR ($t_{residuos}/ha_{cultivo}$)	RPR ($t_{residuos}/t_{producidas}$)	Humedad (%)
Residuos herbáceos			
Maíz [31]	-	1,45	30,0
Col [38]	-	2,5	85,0
Judías verdes [30]	-	1,5 *	90,0
Patatas [38]	7,2	-	60,0
Residuos leñosos			
Manzano [30]	4,8	-	35,0
Cerezo [30]	4,6	-	35,0
Melocotoneros [30]	4,6	-	35,0
Castaño [39]	2,7	-	0,0
Viñedos [40]	3,55	-	44,7

*Valor calculado a partir del IC.

Para la evaluación de los restos generados de la poda de frutales no se consideraron los **árboles diseminados**, dado que el aprovechamiento de estos recursos no representa una opción viable económicamente.

En el caso de la paja de cereal se supuso una humedad de un **15,10 %** [32].

La evaluación del **proceso de valorización térmica** de la biomasa residual procedente de cultivos en Galicia se basó en el conocimiento del **poder calorífico inferior** (PCI) de los diferentes residuos. Una vez conocida la cantidad de residuos y con los datos de dicho parámetro, se calculó el **potencial energético bruto anual** mediante cálculo directo. Para la realización de dicho cálculo, se han considerado las siguientes **hipótesis:**

- No se han tenido en cuenta rendimientos ni pérdidas de energía para la adecuación de las muestras al proceso de valorización.

- A causa de su baja densidad aparente, los restos de poda suelen ser astillados in situ para reducir la granulometría del material y simplificar el transporte. Por este motivo, toda la biomasa procedente de frutales y viñedos se considerará recogida en forma de astillas. Ha de tenerse en cuenta que no toda la biomasa puede recogerse ni es empleada en forma de astillas, por lo que el cálculo establecido es una aproximación al valor real que permite visualizar la magnitud del potencial energético de los materiales considerados.

- El poder calorífico inferior de las astillas para los residuos de frutales y los viñedos es de **18,38** y **17,58 MJ/kg$_{seco}$**, respectivamente [41, 42].

- Los residuos de cultivos cerealeros (maíz excluido) se consideran paja con un PCI de **16,45 MJ/kg$_{seco}$** [32].

- Para los residuos de cultivos de maíz se considerará un PCI de **17,73 MJ/kg$_{seco}$** [33].

- Para los residuos procedentes de cultivos de hortalizas (coles, patatas, judías verdes) se considerará un PCI de **16,00 MJ/kg$_{seco}$** (correspondiente al follaje de patatas [43]).

5 Resultados

5.1. Generación de residuos

Como para las comarcas de A Limia y A Baixa Limia no se dispone de datos concretos sobre la superficie y producción **de cada cultivo en particular**, la evaluación de la generación de residuos producidos en el sector agrícola se ha realizado para la provincia de Ourense, a la cual pertenecen ambas comarcas.

5.1.1. Generación de residuos para valorización biológica

Tal y como ha sido explicado en la sección 4.2.1, los **residuos considerados** para la valorización biológica serán aquellos procedentes de **cultivos herbáceos** (residuos cerealeros y residuos forrajeros) y residuos hortofrutícolas, formados por **descartes frutales y de hortalizas**.

5.1.1.1. RESIDUOS CEREALEROS

En esta tipología de residuos se incluyen los **restos y paja obtenida de los cultivos de cereales** (trigo, cebada y centeno) y los **restos del cultivo del maíz**.

Tal y como se aprecia en la Tabla 19, la cantidad de residuos cerealeros generados en Ourense como sustrato para la digestión alcanzan las **38.002 toneladas** anuales. Cabe destacar que, tal y como ha sido mencionado en el apartado de metodología, estos residuos han sido cuantificados en **base húmeda**.

Los datos de residuos de cultivos de trigo, cebada y centeno reportados en la tabla se refieren a los valores de "paja cosechada" indicados en las fuentes de Estadística Agraria [16].

Tabla 19. Producción de cultivo y generación de residuos cerealeros húmedos

Producto	Producción de grano (t/a)	Residuos (t/a)
Trigo	23.449	11.725
Cebada	946	120
Centeno	11.744	9.560
Maíz	11.446	16.597
Residuos Totales		**38.002**

De entre los residuos considerados, destacan los del **cultivo de maíz,** que supone un 44 % del total de los residuos cerealeros producidos en Ourense.

5.1.1.2. RESIDUOS FORRAJEROS

La producción de forraje se debe al sector ganadero, ya que están destinados a la **alimentación animal**. Durante el proceso de **ensilado** de estos cultivos forrajeros se

pueden generar contaminaciones microbiológicas que hacen que los productos no sean aptos para el consumo animal, quedando así disponibles para la valorización biológica.

La producción en Ourense de **maíz ensilado** (uno de los principales cultivos forrajeros), alcanza producciones de **26.948** toneladas anuales (Tabla 20). Otros productos forrajeros como la hierba también pueden ser ensilados para fomentar su conservación. No obstante, no se encontraron datos fidedignos sobre la cantidad ensilada o el porcentaje que se suele ensilar, por lo que no han sido incluidos en el presente análisis.

En la Tabla 20 se aprecia la cantidad de maíz ensilado en Galicia y la cantidad de maíz ensilado que no es apto para el consumo animal, **620 toneladas anuales**.

Tabla 20. Cantidad de maíz ensilado y los descartes generados debido a la contaminación biológica

Producto	Producción (t/a)	Residuos (t/a)
Maíz forrajero	**26.948**	**620**

5.1.1.3. RESIDUOS DE HORTALIZAS

El cultivo de hortalizas es relevante en Ourense, es por ello que también genera considerables cantidades de **residuos orgánicos** que alcanzan un valor de **12.038 toneladas anuales** (Tabla 21).

Tabla 21. Producción de cultivo y generación de residuos hortícolas húmedos

Producto	Producción (t/a)	Residuos (t/a)
Col	17.840	1.070
Lechuga	4.043	243
Acelga	1.990	119
Grelo	11.035	662
Tomate	17.418	1.045
Pimiento	6.875	413
Cebolla	8.597	516
Judía verde	14.800	888
Patata	118.037	7.082
Residuos totales		12.038

Es preciso hacer una mención especial a la producción de **patata** ya que es el **principal cultivo agrícola** tanto en términos de producción como de **residuos generados,** ya **que representa el 59 % de la generación total de residuos hortícolas**.

5.1.1.4. RESIDUOS DE FRUTALES

Durante la cosecha de la fruta se producen una cantidad significativa de **descartes** que pueden ser valorizadas como **sustrato** para la digestión anaerobia. Estos residuos

frutícolas representan en torno a **800 toneladas anuales** como puede verse reflejado en la Tabla 22.

Tabla 22. Producción de cultivo y generación de residuos frutícolas húmedos

Producto	Producción (t/a)	Residuos (t/a)
Manzana	11.545	693
Pera	1.761	106
Residuos totales		799

De entre las frutas consideradas destaca tanto en producción como en generación de residuos la **manzana**, siendo la principal productora de residuos con 693 t/a.

5.1.1.5. PRINCIPALES RESIDUOS EN LAS COMARCAS DE A LIMIA Y A BAIXA LIMIA

Teniendo en cuenta las producciones estimadas de los principales cultivos en las comarcas de A Limia y A Baixa Limia, tal como se ha explicado en el apartado 3.6 y 3.7, se ha establecido una aproximación de los principales residuos en ambas comarcas. En la Tabla 29 se presentan los resultados de generación de residuos de los cultivos principales de la comarca de A Limia.

Tabla 23. Producción de cultivo y generación de residuos A Limia

Tipo	Producto	Producción (t/a)	Residuos (t/a)
Cerealeros	**Maíz grano**	488	708
	Trigo	17.941	8.971
Tubérculos	**Patata**	55.259	3.316
Resto de hortalizas	**Hortícolas**	5.037	302
Residuos totales			13.297

En la Tabla 24 se presentan los residuos asociados a los principales cultivos de la comarca de A Baixa Limia.

Tabla 24. Producción de cultivo y generación de residuos A Baixa Limia

Tipo	Producto	Producción (t/a)	Residuos (t/a)
Cerealeros	**Maíz grano**	1.036	1.502
	Trigo	46	23
Tubérculos	**Patata**	3.140	188
Resto de hortalizas	**Hortícolas**	1.875	113
Residuos totales			1.826

En la comarca de A Limia destaca la generación de residuos asociados al cultivo de trigo y en A Baixa Limia los residuos asociados al maíz en grano, pero teniendo en cuenta que presentan un contenido en humedad más bajo que el resto de residuos, no sería el más adecuado para ser empleado como co-sustrato con pollinaza. Por lo tanto, los residuos más interesantes serían los asociados a la patata y a las hortalizas.

Los mayores volúmenes vendrán dados por patatas no comerciales, que no tiene el tamaño comercial que va desde 40 mm hasta 85 mm, , cortadas, con defectos, etc. En las Figura 2 y Figura 3, se pueden apreciar un ejemplo de las patatas que no cumplen con el tamaño comercial, en la primera de ellas se puede apreciar un ejemplo de patatas menores de 40 mm, mientras que en la segunda se distinguen patatas con un tamaño mayor de 85 mm, no aptas para comercializar.



Figura 2. Patata menor de 40 mm, no apta para consumo humano



Figura 3. Patata mayor de 85 mm de tamaño, no apta para comercializar

En el caso de los residuos hortícolas, estos también están asociados al incumplimiento de estándares comerciales. En la Figura 4, se observa una partida de hortalizas no apta para consumo humano.



Figura 4. Partida de hortalizas no apta para consumo humano

5.1.2. Generación de residuos para valorización térmica

Según los datos obtenidos de las fuentes consultadas, los **principales residuos considerados** para valorización térmica serán los procedentes de **cultivos herbáceos** (residuos cerealeros, residuos de hortalizas y cultivos forrajeros) y de **cultivos leñosos** (restos de poda de frutales y de viñedos).

5.1.2.1. RESIDUOS CEREALEROS

En la Tabla 25 se muestran la producción y residuos generados en el cultivo de los diferentes cereales en la provincia de Ourense. Tal y como se ha mencionado con anterioridad, los datos de residuos de cultivos de trigo, cebada y centeno reportados en la tabla se refieren a los valores de "paja cosechada" indicados en las fuentes de Estadística Agraria [16].

Tabla 25. Producción de cultivo y generación de residuos cerealeros secos

Producto	Producción de grano (t/a)	Residuos (t_{seca}/a)
Trigo	23.449	9.955
Cebada	946	102
Centeno	11.744	8.116
Maíz	11.446	11.618
Residuos Totales		**29.791**

El total de paja cosechada a partir de cultivos cerealeros suma **18.173 t_{seca}/a** mientras que el total de residuos generados por los cultivos de maíz, representando un 39 % del total, es **11.618 t_{seca}/a**. La totalidad de residuos cerealeros suma **29.791 toneladas al año.**

5.1.2.2. RESIDUOS DE HORTALIZAS

En la Tabla 26 se reporta la producción de coles, judías verdes y patatas, así como los residuos asociados a su producción.

Tabla 26. Producción y restos generados por cultivos de hortalizas

Producto	Producción (t/a)	Residuos (t_{seca}/a)
Col	17.840	6.690
Judía verde	14.800	2.220
Patata	118.037	16.459
Residuos Totales		**25.369**

Para la cuantificación de los residuos se consideraron las hortalizas con superficies de producción más altas: **coles, judías verdes** y **patatas**. Aunque la superficie dedicada al cultivo de los **grelos** es importante dentro de los cultivos gallegos (Tabla 8), no ha sido posible encontrar información fiable sobre la cantidad de residuos generados, motivo por el cual no han sido considerados. El total de residuos generados en el cultivo de hortalizas, en base seca, suman **25.369 t_{seca}/a**.

5.1.2.3. RESIDUOS DE FRUTALES

Los residuos procedentes de los restos de poda de manzano, cerezo, melocotonero y castaño están detallados en la Tabla 27.

Tabla 27. Producción y residuos generados por el cultivo de frutales

Producto	Producción (t/a)	Residuos (t_{seca}/a)
Manzano	11.545	2.496
Cerezo	377	613
Melocotonero	677	520
Castaño	45.579	37.292
Residuos Totales		**40.922**

El total de residuos generados en la poda de estos frutales es de **40.922 tseca/a. La mayoría de ellos (91 %)** procede del **cultivo de castañas**. Este dato es coherente con la elevada superficie dedicada a esta tipología de fruto seco. A continuación, en mayor cantidad de residuo generado se encuentran los restos de **poda del cultivo de manzano**, donde se generan **2.496 toneladas** de residuos secos cada año, lo cual equivale a aproximadamente el 6 % de los residuos generados en el cultivo de frutales.

5.1.2.4. VIÑEDOS

Los restos de poda obtenidos a partir de estos cultivos equivalen a **10.073 t_{seca}/a** (Tabla 28).

Tabla 28. Restos generados por el cultivo de vid

Producto	Producción (t/a)	Residuos (t_{seca}/a)
Viñedos	36.174	10.073

5.1.2.5. PRINCIPALES RESIDUOS EN LAS COMARCAS DE A LIMIA Y A BAIXA LIMIA

Teniendo en cuenta las producciones estimadas de los principales cultivos en las comarcas de A Limia y A Baixa Limia, tal como se ha explicado en el apartado 3.6 y 3.7, se ha establecido una aproximación de los principales residuos en ambas comarcas.

En la Tabla 29 se presentan los resultados de generación de residuos de los cultivos principales de la comarca de A Limia.

Tabla 29. Producción de cultivo y generación de residuos A Limia

Tipo	Producto	Producción (t/a)	Residuos (t/a)
Cerealeros	**Maíz grano**	488	495
	Trigo	17.941	7.616
Tubérculos	**Patata**	55.259	7.705
Resto de hortalizas	**Hortícolas**	5.037	349
	Residuos totales		16.166

En la Tabla 30 se presentan los residuos asociados a los principales cultivos de la comarca de A Baixa Limia.

Tabla 30. Producción de cultivo y generación de residuos A Baixa Limia

Tipo	Producto	Producción (t/a)	Residuos (t/a)
Cerealeros	**Maíz grano**	1.036	1.052
	Trigo	46	901
Tubérculos	**Patata**	3.140	438
Resto de hortalizas	**Hortícolas**	1.875	130
	Residuos totales		2.521

Si se va a realizar una valorización térmica, los residuos más adecuados por sus características serían los asociados a los cultivos cerealeros de trigo.

5.2. Estimación del potencial energético

La determinación del potencial energético se ha realizado para la provincia de Ourense, a la cual pertenecen ambas comarcas.

5.2.1. Estimación del potencial energético mediante valorización biológica

Mediante el empleo de la metodología de cálculo descrita en el apartado 4.2.1 se estimó el potencial de biogás y el potencial de energía bruta que podría obtenerse en la provincia de Ourense a partir de los residuos agrícolas considerados para la valorización biológica.

En la Tabla 31 se presenta la **tabla resumen** con todas las tipologías de residuos, y a continuación se desglosará cada uno de ellos.

Tabla 31. Producción de biogás y de energía bruta a partir de los residuos considerados para la valorización biológica.

Producto	Residuo (t/a)	Biogás (Nm^3/a)	Energía bruta anual (MWh/a)
Cerealero	38.002	1.557.605	9.308
Forrajero	620	34.709	207
Hortícola	12.038	1.914.058	11.438
Frutícola	798	126.939	759
Total	**51.458**	**3.633.311**	**21.713**

Mediante valorización biológica sería posible conseguir una producción de energía bruta anual de 21.713 MWh.

5.2.1.1. RESIDUOS CEREALEROS

En la Tabla 32 se puede apreciar la **cantidad de biogás y de energía bruta** que se puede obtener a partir de los **residuos cerealeros**.

Tabla 32. Producción de biogás y de energía bruta anual a partir de los residuos cerealeros.

Producto	Residuos (t/a)	Biogás (Nm^3/a)	Energía bruta anual (MWh/a)
Trigo	11.725	398.650	2.382
Cebada	120	4.080	24
Centeno	9.560	325.040	1.942
Maíz	16.597	829.835	4.959
Total	**38.002**	**1.557.605**	**9.308**

Gracias a la estimación realizada se determina que en Ourense se pueden obtener en torno a **1,6 millones de m^3 de biogás** a través de la valorización biológica de los residuos cerealeros, lo que representa una energía bruta de **9,3 GWh anuales**.

Los residuos del **cultivo del maíz** por su volumen de generación y elevado potencial son los que generan una **mayor producción de biogás** y por lo tanto una mayor **producción energética,** con valores de **830 mil m^3 de biogás** y **5,0 GWh** de energía bruta anual, respectivamente, suponiendo más de la mitad de la producción energética de los residuos cerealeros**.**

5.2.1.2. RESIDUOS FORRAJEROS

Con respecto a los residuos generados durante el proceso de ensilado, a partir del maíz forrajero contaminado por microrganismos se podrían obtener en Ourense **35 mil m^3 de biogás** anuales y **200 MWh anuales**.

Tabla 33. Residuos del ensilado, potencial de biogás y energía bruta.

Producto	Residuos (t/a)	Biogás (Nm^3/a)	Energía bruta anual (MWh/a)
Maíz forrajero	**620**	**34.709**	**207**

5.2.1.3. RESIDUOS DE HORTALIZAS

En la Tabla 34 se puede apreciar la producción de residuos hortícolas, la producción de biogás obtenida a partir de los mismos y la cantidad de energía bruta que se puede generar mediante la valorización biológica.

Tabla 34. Producción de biogás y de energía bruta a partir de los residuos de hortalizas estudiados.

Producto	Residuos (t/a)	Biogás (Nm^3/a)	Energía bruta anual (MWh)
Col	1.070	170.194	1.017
Lechuga	243	38.570	230
Acelga	119	18.985	113
Grelo	662	105.274	629
Tomate	1.045	166.168	993
Pimiento	413	65.588	392
Cebolla	516	82.015	490
Judía verde	888	141.192	844
Patata	7.082	1.126.073	6.729
Total	**12.038**	**1.914.058**	**11.438**

La valorización biológica de los residuos de hortalizas permitiría obtener más de **1,9 millones de m^3** de biogás, y una energía de **11,4 GWh**. La estimación realizada determina que el cultivo de **la patata** es el que produce una mayor cantidad de residuos hortícolas, y por lo tanto mayor potencial de biogás y de energía bruta, con valores estimados de **1,1 millones m^3** de biogás y **6,7 GWh de energía anuales,** respectivamente, representando este cultivo aproximadamente el **59 %** del potencial energético.

5.2.1.4. RESIDUOS FRUTALES

En la Tabla 35 se puede apreciar la producción de **residuos frutícolas**, el **potencial de biogás** de estos y la cantidad de **energía bruta** que se puede obtener a partir de la valorización biológica.

Tabla 35. Producción de biogás y de energía brutal anual a partir de los residuos frutales.

Producto	Residuos (t/a)	Biogás (Nm^3/a)	Energía bruta anual (MWh/a)
Manzana	693	110.482	660
Pera	106	16.852	101
Total	**798**	**126.939**	**759**

La valorización biológica de los residuos frutales permitiría obtener en torno a **0,13 millones de m^3** de biogás, y una energía de **0,76 GWh**. En cuanto a la tipología,

el cultivo de **manzano** es el que genera mayor cantidad de residuos y, por lo tanto, mayor potencial de biogás y de energía bruta, con valores estimados de **0,11 millones de m^3** de biogás y **0,66 GWh de energía anuales,** respectivamente.

5.2.2. Estimación del potencial energético mediante valorización térmica

Mediante la metodología de cálculo establecida en el apartado 4.2.2 del presente documento se ha establecido el **potencial de energía bruta** capaz de generarse a partir de los residuos objeto de estudio mediante **valorización térmica**. Los datos ofrecidos son los correspondientes al material de partida en **base seca**.

En la Tabla 36 se presenta la tabla resumen con todas las tipologías de residuos, y a continuación se desglosará cada uno de ellos.

Tabla 36. Potencial energético bruto a partir de los residuos considerados para valorización térmica.

Producto	Residuo (t_{seca}/a)	Energía bruta anual (MWh/a)
Cerealero	29.791	139.865
Hortícola	25.369	112.436
Frutícola y viñedos	50.995	257.394
Total	**106.154**	**509.696**

Mediante valorización térmica sería posible conseguir una producción de energía bruta anual de 509.696 MWh.

5.2.2.1. RESIDUOS CEREALEROS

En la Tabla 37 se puede apreciar la cantidad de energía bruta que se puede obtener de los residuos de cada cultivo cerealero.

Tabla 37. Producción de energía bruta a partir de los residuos cerealeros.

Producto	Residuos (t_{seca}/a)	Energía bruta anual (MWh/a)
Trigo	9.955	45.359
Cebada	102	464
Centeno	8.116	36.984
Maíz	11.618	57.058
Total	**29.791**	**139.865**

El total de energía bruta que es posible generar a partir de los residuos cerealeros es de **139,9 GWh al año**. Destaca la aportación de los **residuos de maíz**, que generarían 57 GWh de energía anuales (más del 40 % de la energía total generada).

5.2.2.2. RESIDUOS DE HORTALIZAS

En la Tabla 38 se puede apreciar la producción de residuos hortícolas y la cantidad de energía bruta que se puede obtener a partir de la valorización térmica.

Tabla 38. Producción de energía bruta a partir de los residuos de hortalizas.

Producto	Residuos (t_{seca}/a)	Energía bruta anual (MWh/a)
Col	6.690	29.650
Judía verde	2.220	9.839
Patata	16.459	72.947
Total	**25.369**	**112.436**

La energía bruta que se podría generar potencialmente a partir de residuos de hortalizas es de **112,4 GWh anuales**. De este total, la fracción mayoritaria de energía producida procede de la valorización de restos de patatas, que con su **72,9 GWh/a**, representa el 65 % del total.

5.2.2.3. RESIDUOS DE FRUTALES Y VIÑEDOS

En la Tabla 39 se puede apreciar la producción de **restos de poda de frutales, viñedos y olivares** y la **cantidad de energía bruta** que se puede obtener a partir de su valorización térmica.

Tabla 39. Producción de energía bruta a partir de los residuos de frutales y viñedos

Producto	Residuos (t_{seca}/a)	Energía bruta anual (MWh/a)
Manzano	2.496	12.708
Cerezo	613	3.121
Melocotonero	520	2.649
Castaño	37.292	189.865
Viñedos	10.073	49.052
Total	**50.995**	**257.394**

El **total de energía bruta potencial** que se podría generar a partir de la quema de restos de poda de frutales y viñedos suma **257,4 GWh anuales.** De este total, 208,3 GWh proceden de los restos de poda de frutales, de entre los que el 91 % corresponde a los **residuos del castaño**. Mientras que los **viñedos** contribuirían con **49,1 GWh**.

6 Conclusiones

La superficie agrícola gallega se destina principalmente a **cultivos cerealeros, hortícolas, frutícolas y forrajeros.** La agricultura de Galicia tiene una fuerte orientación hacia la alimentación del ganado, ya que en las tierras cultivadas predominan los cultivos forrajeros y los prados y pastos.

Dentro del cultivo de cereales, en Galicia destaca el cultivo de **trigo y maíz**, con más de 29.000 ha de superficie, y una producción global de más de 132.000 t/a de grano. En cuanto a los cultivos hortícolas, destacan las **patatas**, con más de 16.000 ha y una producción cercana a 284.000 t/a. Referente a los cultivos frutícolas destacan los dedicados a la producción de fruto seco, con una superficie dedicada al cultivo de la **castaña** cercana a las 25.000 ha y una producción de 81.000 t/a.

En función de cada **tipología de cultivo** se producen **residuos diferentes**, que pueden abarcar desde los **restos de la cosecha** (como por ejemplo la paja de cereal), **restos de poda** y **restos de producción** (destríos de frutas y vegetales). Cada uno de ellos tendrá una vía de **valorización principal diferente**, priorizando la valorización biológica mediante digestión anaerobia de los residuos con mayor humedad, como los de cereales, frutas y hortalizas, y la valorización térmica de los residuos con mayor carácter leñoso, como los restos de poda.

Como para las comarcas de A Limia y A Baixa Limia no se dispone de datos concretos sobre la superficie y producción de cada cultivo en particular, y la evaluación de la generación de residuos producidos en el sector agrícola y su correspondiente potencial energético se ha realizado a partir de los datos disponibles para la provincia de Ourense, a la cual pertenecen ambas comarcas.

Se ha determinado que la producción de biomasa residual agrícola en Ourense que puede ser destinada a **valorización biológica** puede alcanzar las 51.458 toneladas anuales. Esto permitiría obtener sobre **3,6 millones anuales de m^3 de biogás**, que daría lugar a una energía bruta anual de **22 GWh**. Los residuos del cultivo de maíz y de patata son los residuos que más contribuyen a la producción de biogás, con una producción estimada de 0,8 y 1,1 millones de m^3, lo que equivale a una energía bruta de 5 y 7 GWh anuales.

Por otra parte, los datos de biomasa residual agrícola potencialmente disponibles para **valorización térmica** en Ourense indican que se pueden producir un total de **106.154 toneladas anuales**, en base seca, con un potencial energético bruto de **510 GWh**. En este grupo destacan fundamentalmente los residuos cerealeros (maíz), los restos de patatas y los restos de poda de frutales (especialmente de castaño) y viñedos.

La **puesta en valor de la biomasa residual agrícola**, además de ser una alternativa a las quemas agrícolas, supondría una oportunidad de desarrollo económico, ya que contribuiría a generar puestos de trabajo en el entorno rural, donde están localizados los recursos biomásicos, y sería una **oportunidad de desarrollo** para municipios de marcado carácter agrícola. Asimismo, su valorización permitiría reducir el riesgo de incendios, la aparición de plagas y, en definitiva, representaría una ventaja para el agricultor al pasar de considerarse un residuo a un recurso con un valor comercializable

siempre y cuando esté convenientemente comprobado que la biomasa empleada **no tiene usos alternativos.**

Hay que tener en cuenta que el desarrollo de los procesos de valorización de la biomasa residual agrícola depende de la demanda y el consumo que de ella se realice. Por ejemplo, en el contexto de la valorización térmica, en la actualidad este consumo está ligado casi exclusivamente a las **plantas de generación eléctrica** con biomasa. No obstante, dada la creciente necesidad de biomasa existente en Galicia debido a la creación de plantas de generación de energía, así como al creciente consumo por parte de la industria forestal, la valorización de la biomasa agrícola residual se muestra como una opción altamente atractiva. Si bien existen algunas experiencias de combustión de este tipo de residuos (paja, restos de podas de vid, etc.), lo cierto es que el suministro debe estar claro (estacionalidad de los residuos). Asimismo, las características fisicoquímicas de estos residuos en general indican que su **combustión es más compleja que la de los biocombustibles de madera** por lo que pueden ser necesario nuevos tipos de calderas y mejores aleaciones de acero que reduzcan los problemas asociados a por ejemplo su **elevado contenido en cenizas y la fusibilidad** de las mismas.

En el caso de la valorización por vía biológica, hay que tener en cuenta la posibilidad de valorización combinando la biomasa residual agrícola con otros sustratos como pueden ser los residuos de origen ganadero (**co-digestión**), lo que permitiría la construcción de plantas más rentables económicamente.

Debe tenerse en cuenta que los valores de la biomasa residual realmente disponible, así como los de la energía bruta obtenida, pueden ser bastante inferiores a los valores calculados, debido fundamentalmente a que la **escasa superficie** útil por explotación, el **reducido tamaño** de las parcelas y su **orografía** limita el crecimiento del sector agrario gallego y podría tener también repercusiones directas en la logística, transporte y centralización de los residuos generados en este sector.

7 Anexo – Lista de referencias

7.1. Índice de tablas

Tabla 1. Estacionalidad de los cultivos en la provincia de Ourense 6
Tabla 2. Principales formas de gestión de los restos vegetales..... 9
Tabla 3. Superficie dedicada a cultivos en España en el 2020 13
Tabla 4. Restos agrícolas* generados en España en el 2011 , ...14
Tabla 5. Distribución de explotaciones agrarias en Galicia en función de su tamaño ..14
Tabla 6. Superficie y producción de cereales de los principales cultivos en Galicia 15
Tabla 7. Superficie y producción de forraje de los principales cultivos en Galicia 17
Tabla 8. Superficie y producción de hortalizas de los principales cultivos en Galicia ..18
Tabla 9. Superficie y producción de frutas de los principales cultivos en Galicia 19
Tabla 10. Superficie y producción de uvas en Galicia 20
Tabla 11. Distribución general de tierras en la comarca de A Limia en el 2020 , ...21
Tabla 12. Distribución de los principales grupos de cultivos en la comarca de A Limia en el 2020 , ...21
Tabla 13. Distribución de los principales cultivos en la comarca de A Limia en el 2020 , ...21
Tabla 14. Distribución general de tierras en la comarca de A Baixa Limia en el 2020 , ...22
Tabla 15. Distribución de los principales grupos de cultivos en la comarca de A Baixa Limia en el 2020 , ...22
Tabla 16. Distribución de los principales cultivos en la comarca de A Baixa Limia en el 2020 [17], ...22
Tabla 17. Cultivos y residuos considerados en este estudio.....27
Tabla 18. Valores de generación de residuos a partir de suelo ocupado (RSR) o de cantidad de producto (RPR). El contenido de humedad de los residuos se reporta entre paréntesis. 28
Tabla 19. Producción de cultivo y generación de residuos cerealeros húmedos 30
Tabla 20. Cantidad de maíz ensilado y los descartes generados debido a la contaminación biológica 31
Tabla 21. Producción de cultivo y generación de residuos hortícolas húmedos 31
Tabla 22. Producción de cultivo y generación de residuos frutícolas húmedos 32
Tabla 23. Producción de cultivo y generación de residuos A Limia 32
Tabla 24. Producción de cultivo y generación de residuos A Baixa Limia.....32
Tabla 25. Producción de cultivo y generación de residuos cerealeros secos 34
Tabla 26. Producción y restos generados por cultivos de hortalizas.....35
Tabla 27. Producción y residuos generados por el cultivo de frutales 35
Tabla 28. Restos generados por el cultivo de vid 35
Tabla 29. Producción de cultivo y generación de residuos A Limia 36
Tabla 30. Producción de cultivo y generación de residuos A Baixa Limia.....36

Tabla 31. Producción de biogás y de energía bruta a partir de los residuos considerados para la valorización biológica. 37
Tabla 32. Producción de biogás y de energía bruta anual a partir de los residuos cerealeros. 37
Tabla 33. Residuos del ensilado, potencial de biogás y energía bruta.....38
Tabla 34. Producción de biogás y de energía bruta a partir de los residuos de hortalizas estudiados.....38
Tabla 35. Producción de biogás y de energía brutal anual a partir de los residuos frutales. 38
Tabla 36. Potencial energético bruto a partir de los residuos considerados para valorización térmica.....39
Tabla 37. Producción de energía bruta a partir de los residuos cerealeros. 39
Tabla 38. Producción de energía bruta a partir de los residuos de hortalizas. 40
Tabla 39. Producción de energía bruta a partir de los residuos de frutales y viñedos..40

7.2. Índice de figuras

Figura 1. Ejemplo de contaminación micótica de un silo 11
Figura 2. Patata menor de 40 mm, no apta para consumo humano 33
Figura 3. Patata mayor de 85 mm de tamaño, no apta para comercializar 33
Figura 4. Partida de hortalizas no apta para consumo humano.....34

7.3. Índice de referencias

[1] Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. Plan Estatal Marco de Gestión de Residuos (PEMAR) 2016-2022. https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/planes-y-estrategias/pemaraprobado6noviembrecondae_tcm30-170428.pdf

[2] CONAMA (2020). Los residuos agrarios en España. http://www.conama.org/conama/download/files/conama2020/STs%202020/23_final.pdf

[3] Sánchez Báscones, M., Correa-Guimaraes, A., Pérez-Espinosa, A., Blanco Covián, D., Cabaleiro Núñez, F., García-Morales, J. L., ... & Carballas, T. (2016). De Residuo a Recurso: El Camino hacia la Sostenibilidad. I Recursos Orgánicos 2. Residuos Agrícola. Mundi-Prensa. http://hdl.handle.net/10261/196132

[4] Adegal pide axudas para manter un sector primario con 20.000 hectáreas de cereal e pataca. https://www.lavozdegalicia.es/noticia/somosagro/agricultura/2019/06/16/adegal-pide-axudas-manter-sector-primario-20000-hectareas-cereal-pataca/0003_201906O16C8993.htm

[5] Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación (2021). Calendario de siembra, recolección y comercialización 2014-2016 https://www.mapa.gob.es/es/estadistica/temas/estadisticas-agrarias/01-calendariosiembra-nuevo-sencilla-1_tcm30-514260.pdf

[6] Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (2011). Evaluación del potencial de energía de la biomasa. Herramienta informática para la valoración de recursos. https://www.idae.es/sites/default/files/documentos/publicaciones_idae/documentos_11227_e14_biomasa_a_8d51bf1c.pdf

[7] PROBIOGAS. Informe de Residuos Vegetales en España. http://213.229.136.11/bases/ainia_probiogas.nsf/0/D06E61BC808DB150C125753F00572938/$FILE/Inf_cuantificacion_vegetal_11-03-2010.pdf

[8] Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Política Agraria Común. https://www.mapa.gob.es/es/pac/default.aspx

[9] Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente (2012). Producción y consumo sostenible y residuos agrarios. https://www.miteco.gob.es/images/es/Residuos%20agrarios_tcm30-193059.pdf

[10] Generalitat Valenciana (2016). Plan Integral de Fomento de la Biomasa residual agrícola y forestal para uso térmico. https://agroambient.gva.es/documents/20551003/163934046/Plan+Integral+de+fomento+de+la+biomasa+residual+agr%C3%ADcola+y+forestal+-+Diagnostico+-+Versi%C3%B3n+Preliminar/561a0a55-637e-4059-b4c2-2f98030909be

[11] Bouallagui, H., Touhami, Y., Cheikh, R. B., & Hamdi, M. (2005). Bioreactor performance in anaerobic digestion of fruit and vegetable wastes. Process biochemistry, 40(3-4), 989-995 https://doi.org/10.1016/j.procbio.2004.03.007

[12] Kaldis, F.; Cysneiros, D.; Day, J.; G. Karatzas, K.-A.; Chatzifragkou, A. (2020). Anaerobic Digestion of Steam-Exploded Wheat Straw and Co-Digestion Strategies for Enhanced Biogas Production. Appl. Sci. 10, 8284. https://doi.org/10.3390/app10228284

[13] Antonio Callejo Ramos. Conservación de forrajes (XII): Pérdidas en el ensilado. https://oa.upm.es/55685/1/INVE_MEM_2019_302194.pdf

[14] Consejos para reducir las micotoxinas en los silos. https://www.campogalego.es/consejos-para-reducir-las-micotoxinas-en-los-silos/

[15] Federación Española de Municipios y Provincias, Red Española de Ciudades por el Clima (2020). Estudio sobre el aprovechamiento de la biomasa a escala local. https://redciudadesclima.es/sites/default/files/2020-06/Aprovechamiento_biomasa_def.pdf

[16] Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación (2021). Anuario de Estadística 2021. https://www.mapa.gob.es/es/estadistica/temas/publicaciones/anuario-de-estadistica/2021/default.aspx

[17] Xunta de Galicia. Consellería do Medio Rural. Distribución de superficies segundo usos e aproveitamentos. https://mediorural.xunta.gal/es/recursos/estatisticas/estatistica-agraria/2020

[18] El escaso tamaño de las parcelas es un obstáculo que limita su aprovechamiento. https://www.lavozdegalicia.es/noticia/barbanza/2020/03/11/escaso-tamano-parcelas-obstaculo-limita-aprovechamiento/0003_202003B11C1993.htm

[19] Instituto Galego de Estatística. Explotacións agrarias segundo a superficie total. https://www.ige.eu/igebdt/selector.jsp?COD=102&paxina=001&c=0301001

[20] Instituto Geográfico Nacional. https://www.ign.es/espmap/rural_bach.htm

[21] (I) ¿A dónde han ido a parar más de 150.000 hectáreas de tierras productivas en Galicia en las últimas décadas? https://www.campogalego.es/donde-han-ido-parar-mas-de-150-000-hectareas-de-tierras-productivas-en-galicia-en-las-ultimas-decadas/

[22] Domínguez Arteaga, S. G., & Loor Zambrano, K. F. (2018). Uso de los residuos del cultivo de maíz (Zea Mays), como alternativa sostenible para la elaboración de bloques, parroquia Boyacá (Bachelor's thesis, Calceta: ESPAM MFL).

[23] FAO. https://www.fao.org/WAICENT/faoinfo/economic/faodef/FAODEFS/H190F.HTM

[24] Utilización de pastos y forrajes. https://axoncomunicacion.net/utilizacion-de-pastos-y-forrajes/

[25] González, E. F. (2010). Análisis de los procesos de producción de biomasa residual procedente del cultivo de frutales mediterráneos. Cuantificación, cosecha y caracterización (Doctoral dissertation, Universitat Politècnica de València).

[26] Instituto Galego de Estatística. Distribución xeral de terras. https://www.ige.gal/igebdt/selector.jsp?COD=676&c=0301003

[27] Instituto Galego de Estatística. Distribución dos principais grupos de cultivos. https://www.ige.gal/igebdt/selector.jsp?COD=677&c=0301003

[28] Instituto Galego de Estatística. Outra información de agricultura. https://www.ige.gal/web/mostrar_actividade_estatistica.jsp?idioma=gl&codigo=0301003

[29] Database for the physico-chemical composition of (treated) lignocellulosic biomass, micro- and macroalgae, various feedstocks for biogas production and biochar. https://phyllis.nl/

[30] Díaz-Ambrona, C. H., & Sánchez, A. F. Biomasa vegetal no alimentaria producida en España con posibilidad de uso energético. Producción Vegetal, 209.

[31] Esteban, L. S., Ciria, P., & Carrasco, J. E. (2008). An assessment of relevant methodological elements and criteria for surveying sustainable agricultural and forestry biomass by-products for energy purposes. BioResources, 3(3), 910-928.

[32] https://phyllis.nl/, Wheat Straw (#459)

[33] https://phyllis.nl/, Corn Stover(#889)

[34] Chandra, R., Takeuchi, H., Hasegawa, T., & Kumar, R. (2012). Improving biodegradability and biogas production of wheat straw substrates using sodium hydroxide and hydrothermal pretreatments. Energy, 43(1), 273-282.

[35] Wang, S., Li, F., Wu, D., Zhang, P., Wang, H., Tao, X., ... & Nabi, M. (2018). Enzyme pretreatment enhancing biogas yield from corn stover: feasibility, optimization, and mechanism analysis. Journal of agricultural and food chemistry, 66(38), 10026-10032.

[36] http://www.fundacionfedna.org/forrajes/ensilado-de-maiz

[37] Villa, R., Rodríguez, L. O., Fenech, C., & Anika, O. C. (2020). Ensiling for anaerobic digestion: A review of key considerations to maximise methane yields. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 134, 110401.

[38] Di Blasi, C., Tanzi, V., & Lanzetta, M. (1997). A study on the production of agricultural residues in Italy. Biomass and Bioenergy, 12(5), 321-331.

[39] Nati, C., Montorselli, N. B., & Olmi, R. (2018). Wood biomass recovery from chestnut orchards: results from a case study. Agroforestry Systems, 92(5), 1129-1143.

[40] Biomasa AP (2020), Informe de caracterización de la BNVAP y su potencial en la Región Galicia-Norte de Portugal. http://biomasa-ap.com/

[41] https://phyllis.nl/, wood, mixed hardwood chips (#253)

[42] https://phyllis.nl/, Vine shoot (#3351)

[43] Shane, A., Gheewala, S. H., Fungtammasan, B., Silalertruksa, T., Bonnet, S., & Phiri, S. (2016). Bioenergy resource assessment for Zambia. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *53*, 93-104.



Área de Bioenergía

energylab@energylab.es

Edificio CITEXVI

Fonte das Abelleiras, s/n. 36310, Vigo.

T_986 12 04 50 F_986 12 04 51

energylab@energylab.es

www.energylab.es

R 10.7_v03

Informe de caracterización fisicoquímica y determinación del potencial metanogénico de los residuos

Índice

1 Modificaciones 2

2 Introducción y objeto 3

3 Metodología 4

3.1. Identificación de las muestras 4

3.2. Caracterización fisicoquímica 5

3.3. Potencial metanogénico y biodegradabilidad 6

4 Resultados 8

4.1. Caracterización fisicoquímica 8

4.2. Determinación del potencial metanogénico 11

5 Conclusiones 13

6 Anexos 14

6.1. Índice de tablas 14

6.2. Índice de figuras 14

6.3. Índice de referencias 14

1 Modificaciones

Fecha	Versión	Aclaraciones
20/02/2023	V00	Versión inicial

2 Introducción y objeto

El proyecto APROAVI pretende aplicar los criterios de economía circular mediante **la gestión y tratamiento sostenibles** de las **deyecciones** generadas en el **sector avícola**, mejorando así la competitividad y sostenibilidad de dicho sector promoviendo la obtención y uso de **energía renovable**, así como de fertilizantes aditivados. Para todo ello se evaluarán dos alternativas tecnológicas. Por un lado, se llevará a cabo la **digestión anaerobia** de la pollinaza mezclada con residuos agrícolas mayoritarios de la zona de estudio, con objeto de maximizar la generación de biogás y la obtención de **fertilizantes** en forma de **digestato** anaerobio. Por otro lado, se evaluará el uso de la pollinaza como biocombustible en un proceso de **pirólisis**, en el que además de un **gas con poder calorífico se generará biochar**. En una última etapa del proyecto se estudiará y comparará la capacidad fertilizante tanto de la pollinaza como del **digestato anaerobio y el biochar mediante pruebas de valorización agronómica en el campo**. Para ello, se cuenta con la participación de A Pendurada.

La **caracterización** de los residuos es fundamental para el éxito de un proceso de digestión anaerobia, ya que permite conocer las propiedades físicas y químicas de los sustratos que serán tratados. Esta información es clave para determinar su **potencial de generación de biogás** (potencial metanogénico), la cantidad de materia orgánica biodegradable y/o la presencia de inhibidores o sustancias tóxicas que puedan afectar a los microorganismos responsables de la digestión. Además, una caracterización precisa ayuda a optimizar las condiciones operativas, como la relación carbono-nitrógeno, el pH, la temperatura y el tiempo de retención, garantizando un proceso más eficiente y sostenible.

En el presente informe se incluyen los resultados de la **caracterización fisicoquímica** y de la **determinación del potencial metanogénico** de tres muestras de residuos agrícolas por separado, una mezcla de restos hortícolas, así como de pollinaza, proporcionados por CETECA (Centro Tecnolóxico da Carne) y Silvares de Grou S. Coop. Gallega, respectivamente. Dichas tareas están enmarcadas en el proyecto APROAVI (FEADER 2022/010B), dentro de la Actividad 1: Estudios previos y de la Actividad 2: Valorización de los residuos mediante digestión anaerobia, respectivamente.

3 Metodología

3.1. Identificación de las muestras

Las muestras a analizar son los restos de hortalizas, una mezcla de restos hortícolas, y una muestra de pollinaza. La identificación de las muestras es la siguiente:

- Restos de tomate
- Restos de patata
- Restos de cebolla
- Mezcla de restos hortícolas
- Pollinaza (viruta)

En la Figura 1 se presentan fotografías de las muestras hortícolas, donde se pueden observar las diferencias físicas entre unas y otras.



Figura 1. Imagen de las muestras a) Restos de tomate, b) Restos de patata, c) Restos de cebolla, d) Mezcla de restos hortícolas

En la Figura 2 se puede observar la muestra de pollinaza procedente de Silvares de Grou S. Coop. Gallega.



Figura 2. Imagen de la muestra de pollinaza

En el caso de los restos de hortalizas, estas muestras fueron sometidas a un proceso de trituración para poder homogeneizarlas, empleando un procesador alimentario (Thermomix TM21) que está equipado con cuchillas para triturar. Mientras que a la pollinaza no se le realizó ningún pretratamiento.

3.2. Caracterización fisicoquímica

La caracterización fisicoquímica de los residuos, realizando triplicados para cada analítica, ser llevó a cabo según la metodología que se expone a continuación.

Las medidas en fase soluble se realizaron sobre la muestra tras ponerla en contacto con agua destilada en una dilución 1:5 y en agitación durante 30 min.

- pH. Medida mediante sonda HACH 5014 T.
- Conductividad eléctrica. Medida mediante sonda HACH 5070.
- Humedad y contenido en sólidos totales (ST) y volátiles (SV). Se realizó la determinación por triplicado, según la metodología del "*Standard methods for the examination of water and wastewater*"
  - 2540 B Total Solids Dried at 103-105 ºC
  - 2540 E Fixed and Volatile Solids Ignited at 550 ºC
  - 2540 G Total, Fixed, and Volatile Solids in Solid and Semisolid Samples
- Contenido en materia orgánica (DQO). Se realizó la determinación en reflujo cerrado, según la metodología del "*Standard methods for the examination of water and wastewater*"
  - 5220 D. Closed Reflux, Colorimetric Method
- AGV. Se determinó por espectrofotometría, empleando el sistema de cubetas test LCK365 (HACH).

- Nitrógeno Total Kjeldahl (NTK) mediante volumetría.

- Amonio (NH_4^+). Se determinó por espectrofotometría, empleando el sistema de cubetas test LCK502 y LCK303 (HACH), basado en el método del azul indofenol.

3.3. Potencial metanogénico y biodegradabilidad

La determinación del potencial metanogénico y de la biodegradabilidad anaerobia se basa en el seguimiento de la descomposición anaerobia de una muestra orgánica (sustrato) con inóculo (microorganismos), en un medio suplementado con nutrientes y medio tampón, de forma que se evalúa la cantidad de metano producido. En este estudio se ha empleado inóculo anaerobio de la EDAR de Bens (A Coruña).

El seguimiento experimental para la realización de los ensayos de biodegradabilidad se ha basado en protocolos existentes (Angelidaki *et al.* 2009), adaptando estos a las condiciones deseadas.

- El potencial metanogénico (BMP) evalúa la cantidad de metano que se puede producir durante el proceso de digestión anaerobia de un residuo. Se expresa principalmente en unidades de volumen de CH_4, o biogás, por unidad de materia orgánica, L_{CH4}/kg_{DQO}, pero también se puede convertir a unidades de L_{CH4}/kg_{SV} o de $m^3_{CH4}/t_{residuo}$.

- La biodegradabilidad anaerobia expresa el porcentaje de materia orgánica del residuo (medida en términos de DQO) que se ha degradado y convertido a CH_4 frente al total presente en la muestra. Si se considera un biogás formado exclusivamente por CH_4 y CO_2, y teniendo en cuenta que la DQO del CO_2 es nula, la DQO eliminada en el residuo se correspondería con la DQO obtenida en forma de metano, lo cual significa un valor teórico máximo de 350 L_{CH4}/kg_{DQO}.

El seguimiento de la producción de biogás se realizó mediante el *Analizador Automático de Medición de Metano* (AMPTS II) de *Bioprocess Control* (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**). Este equipo consta de un baño termostatizado donde se colocan los digestores, unas trampas de fijación de CO_2 para medir únicamente el CH_4 producido, una unidad medidora del metano producido por cada digestor y un software donde se registran la producción que se va obteniendo a lo largo del proceso. Cada digestor tiene un cabezal con un dispositivo de agitación, para mantener las condiciones homogéneas. Una vez finalizado el ensayo se realizó una medición por cromatografía gaseosa de la composición del biogás presente en el espacio de cabeza de cada uno de los reactores.

En paralelo a las muestras, se realizaron dos ensayos adicionales. Un test de biodegradabilidad del inóculo (sin adicionar sustrato), denominado “blanco” para cuantificar la producción debida solamente al inóculo, para restar la producción en los ensayos realizados a los residuos. Un test de actividad del inóculo, denominado “control” en el que se utilizó una mezcla de ácidos grasos formada por ácido acético, ácido butírico y ácido propiónico.



Figura 3. Sistema AMPTS II

El ensayo se llevó a cabo bajo las siguientes condiciones:

- realizando triplicados para cada una de las muestras
- en un rango de temperatura mesófilo 36 ± 1 ºC.
- adición de macro y micronutrientes al lodo.
- se ha añadido bicarbonato para mantener la alcalinidad del medio.
- se ha empleado una relación de inóculo/sustrato entre 0,8 y 2,0 gSSV/gSV para las muestras, lo que supuso el empleo de diferentes cantidades de muestra, por lo que se recogen en la Tabla 1**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** las masas de sustrato de cada vial.

Tabla 1. Preparación de los viales

Muestra	gSSV/gSV	Masa sust g
Restos de tomate	1,0	71,3
Restos de patata	1,1	17,6
Restos de cebolla	0,8	43,1
Mezcla de restos hortícolas	2,0	17,9
Pollinaza	1,6	6,2

La composición de gas se midió en el espacio de cabeza de cada uno de los viales empleados, mediante el uso de un cromatógrafo de gases Clarus 580GC (Perkin Elmer).

4 Resultados

4.1. Caracterización fisicoquímica

A continuación, se presentan los resultados de caracterización de las muestras proporcionadas.

Debido al carácter sólido de la muestra de pollinaza, el pH y la conductividad eléctrica se determinaron sobre un lixiviado, tal como se indica en el apartado de Metodología y en las tablas correspondientes.

Tabla 2. Valores de pH y Conductividad Eléctrica

Muestra	pH	CE (mS/cm)
Restos de tomate	4,28	5,95
Restos de patata	6,20	7,97
Restos de cebolla	4,39	5,15
Mezcla de restos hortícolas	4,20*	2,38*
Pollinaza (viruta)	8,64*	7,98*

* Valor determinado sobre lixiviado

Los valores de pH y conductividad se pueden ver en la Tabla 2, donde se aprecia el carácter ligeramente ácido de las muestras de restos de tomate, restos de cebolla y la mezcla de restos hortícolas. La conductividad de las muestras anteriormente mencionadas tiene un valor de 5,95, 5,15 y 2,38 mS/cm, respectivamente. Mientras que la muestra de restos de patatas y el lixiviado de la pollinaza presentan valores más elevados (7,97 y 7,98 mS/cm).

La concentración de sólidos ha sido expresada en unidades de porcentaje de sólidos totales (ST) y volátiles (SV). Como se observa en la Tabla 3, los residuos presentan un valor de SV en el rango del 4,2 a 18,9 % en el caso de los restos de hortalizas, mientras que la pollinaza presenta un valor de SV más elevado de 37,8 %.

El ratio SV/ST se emplea como una aproximación al contenido en materia orgánica de la muestra y, por lo tanto, a una posible mayor biodegradabilidad cuanto más se aproxime a la unidad. Se considera que una muestra es adecuada para el proceso de digestión anaerobia si el valor SV/ST es superior a 0,60. En este caso, el ratio SV/ST es superior a 0,78 en todas los muestras, lo que indica que, a priori, son adecuadas para el proceso de digestión anaerobia.

Tabla 3. Contenido en sólidos y humedad

Muestra	ST (%)	SV (%)	Ratio (SV/ST)	Humedad (%)	Cenizas (%)
Restos de tomate	5,3 ± 0,1	4,2 ± 0,3	0,78	94,7 ± 0,1	1,1 ± 0,3
Restos de patata	20,6 ± 0,1	18,9 ± 0,1	0,91	79,4 ± 0,1	1,8 ± 0,1
Restos de cebolla	10,3 ± 0,1	9,1 ± 0,1	0,88	89,7 ± 0,1	1,3 ± 0,1
Mezcla de restos hortícolas	6,6 ± 0,1	5,3 ± 0,1	0,80	93,4 ± 0,1	1,3 ± 0,1
Pollinaza (viruta)	44,8 ± 1,0	37,8 ± 1,0	0,84	55,2 ± 1,0	7,0 ± 1,0

El contenido en materia orgánica, que es el sustrato principal de los microrganismos responsables de la digestión anaerobia, se ha determinado como la demanda química de oxígeno total sobre la muestra bruta (DQO_{total}). Este valor resulta proporcional al contenido en SV, y tal como se muestra en la Tabla 4, la muestra de pollinaza es la que presentan la mayor concentración de DQO, con un valor de 202,7 gDQO/kg.

Tabla 4. Contenido en materia orgánica

Muestra	DQO_{total} (gO_2/kg)	$DQO_{soluble}$ (gO_2/kg)	AGV (mgAc/L)
Restos de tomate	54,0 ± 1,8	28,3 ± 1,9	2.401 ± 91*
Restos de patata	175,5 ± 3,2	n.a.	n.a.
Restos de cebolla	105,3 ± 0,7	n.a.	n.a.
Mezcla de restos hortícolas	118,9 ± 5,2	36,4 ± 1,1	2.568 ± 98*
Pollinaza (viruta)	402,7 ± 8,3	n.a.	n.a.

* Valor determinado sobre lixiviado

El contenido en materia orgánica soluble, ácidos grasos volátiles (AGV) y nitrógeno amoniacal solo se ha determinado en los restos de tomate y en la mezcla de restos hortícolas, ya que son los únicos residuos que presentan un contenido en ST inferior al 7 %, valor a partir del cual, en base a los conocimientos previos sobre caracterización de residuos, la determinación en fase soluble carece de interés.

La concentración de ácidos grasos volátiles se situó entre 2.401 y 2.568 mgAc/L, lo que indica la presencia de materia orgánica en forma de ácidos de cadena corta, que es fácilmente arrastrada a la fase soluble y puede ser rápidamente utilizada por parte de los microorganismos anaerobios.

En el caso de los nutrientes, se ha determinado la concentración de nitrógeno total Kjeldahl (NTK) sobre la muestra bruta y el amonio (NH_4^+) sobre la fracción líquida resultante de la centrifugación y filtrado de la muestra (sobre lixiviado).

En la Tabla 5 puede observarse que el contenido en amonio, parte hidrolizada del nitrógeno total, resulta ser una fracción variable en las muestras.

Tabla 5. Contenido en nutrientes

Muestra	NTK (mgN/kg)	Amonio ($mgNH_4$-N/L)	Carbono total (mgC/kg)	Relación C/N
Restos de tomate	1.297 ± 91	25,2 ± 1,1*	23.346 ± 1.861	18
Restos de patata	4.933 ± 345	n.a.	98.660 ± 7.987	20
Restos de cebolla	1.975 ± 138	n.a.	33.575 ± 2.987	17
Mezcla de restos hortícolas	2.977 ± 238	593,0 ± 25,5*	47.627 ± 3.974	16
Pollinaza (viruta)	13.903 ± 1.112	n.a.	180.737 ± 14.875	13

* Valor determinado sobre lixiviado

En el caso de la muestra de restos de tomate, la fracción de amonio representa cerca del 2 % del nitrógeno total, mientras que en la muestra de mezcla de restos hortícolas representa en torno al 20 %.

El nitrógeno es una fuente importante para la síntesis de proteínas de los microorganismos, y la deficiencia del mismo los incapacita para metabolizar todo el carbono presente, lo que conlleva perder eficacia en la degradación. Por otra parte, un exceso de nitrógeno hace que, al no poder ser utilizado en su totalidad, se acumule en el medio de reacción, generalmente en forma de NH_3, inhibiendo el crecimiento de los microorganismos, especialmente los metanogénicos, cuando se supera el valor de 3.500 mgN/kg en el medio de reacción.

El valor de concentración de amonio, medido en fase soluble, depende del grado de hidrólisis de los compuestos proteicos que se haya producido durante el proceso de generación/procesado de la muestra, ya que las proteínas son la principal fuente de nitrógeno (generalmente determinado como nitrógeno total Kjeldahl). Hay que tener en cuenta que durante el proceso de digestión anaerobia también se producirá la hidrólisis de los compuestos proteicos, por lo que se producirá una liberación de amonio adicional que será empleado por los microorganismos para su crecimiento.

Será necesario vigilar el grado de hidrólisis y la concentración de amonio que se pueda alcanzar durante el proceso de digestión, especialmente en el caso de las muestras de pollinaza y restos de patatas que presentan los valores de NTK más elevados, 13,9 y 4,9 gN/kg, respectivamente.

También se realizó la determinación del carbono orgánico total, que resulta ser directamente proporcional al valor del contenido en DQO, para poder determinar el ratio C/N. Teniendo en cuenta el elevado contenido en N que presenta la pollinaza, este sustrato es el que presenta el valor de ratio más bajo.

4.2. Determinación del potencial metanogénico

El ensayo batch (régimen discontinuo) se llevó a cabo según las condiciones establecidas en el Anexo **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** de Metodología. Se realizó el ensayo para determinar el potencial metanogénico empleando el digestato procedente del digestor anaerobio de lodos de la EDAR de Bens (A Coruña) como inóculo y las muestras recibidas como sustrato.

En la Figura 4 se pueden observar los resultados obtenidos en el ensayo en discontinuo. Los valores se muestran como volumen de metano acumulado por unidad de concentración de masa.

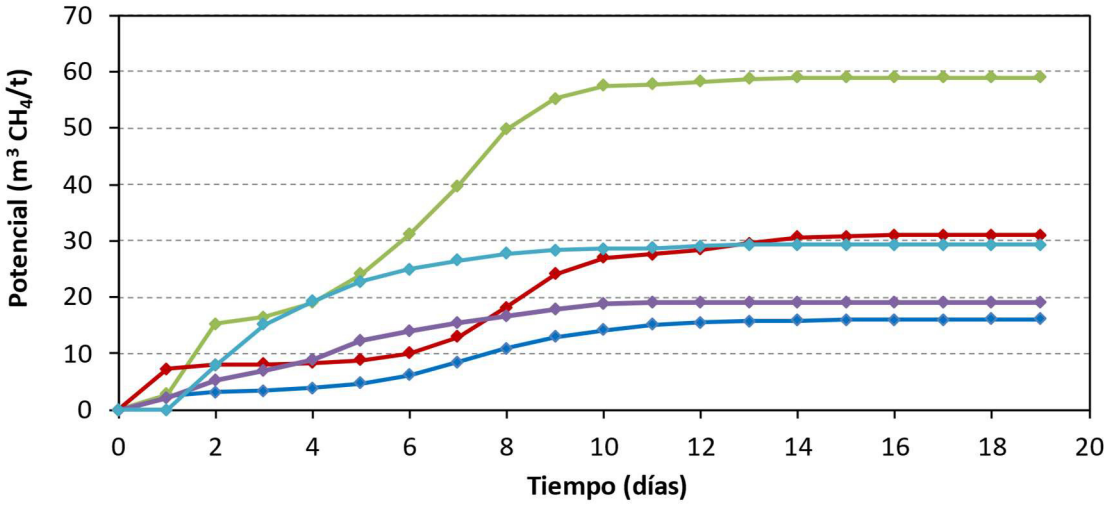


Figura 4. Potencial de producción de metano (Nm^3CH_4/t) de las muestras: (◆) Restos de tomate, (◆) Restos de patata, (◆) Restos de cebolla, (◆) Mezcla de restos hortícolas y (◆) Pollinaza.

Las muestras vegetales analizadas produjeron metano desde el inicio del ensayo, mientras que la muestra de pollinaza empezó a producir a partir del día 1 de ensayo, como indicativo de una pequeña fase de retardo. En la Figura 4 se observa como las muestras tienen curvas de generación de metano diferentes en cuanto a la producción acumulada. La velocidad de producción de metano (pendiente de la curva) disminuye en torno al día 10 para todas las muestras, pero en el caso de los restos de cebolla posteriormente se produjo un nuevo aumento hasta el día 15.

En la Tabla 6 se muestran todos los potenciales y rendimientos de producción de metano, usando las diferentes bases de cálculo. Adicionalmente se presenta el porcentaje de biodegradabilidad, calculado como el porcentaje de la materia orgánica (DQO_{total}) que se degrada y convierte en metano frente al valor máximo teórico de 0,35 Nm^3 CH_4/kg DQO.

Tabla 6. Resultados del rendimiento y biodegradabilidad

Muestra	Potencial (Nm^3 CH_4/t)	Potencial (Nm^3 CH_4/t SV)	Biodegradabilidad (%)
Restos de tomate	16,1 ± 0,1	389,9 ± 2,5	85,0 ± 0,6
Restos de patata	58,9 ± 0,7	312,2 ± 3,5	95,9 ± 1,1
Restos de cebolla	31,0 ± 0,2	342,3 ± 1,9	84,2 ± 0,5
Mezcla de restos hortícolas	19,1 ± 0,7	360,2 ± 12,5	45,9 ± 1,6
Pollinaza (viruta)	53,0 ± 3,3	140,1 ± 8,7	74,7 ± 4,7

Puede observarse que la biodegradabilidad alcanzada a los 19 días de ensayo se sitúa en torno al 85 % en el caso de los restos de tomate, en un 96 % en los restos de patata, en un 84 % en los restos de cebolla, en un 46 % en la mezcla de restos hortícolas y en un 75 % en la pollinaza.

El potencial metanogénico obtenido se ha referenciado también en base a la producción de biogás, considerando el porcentaje de CH_4 y CO_2 analizado durante el ensayo (Tabla 7). Se observa que las muestras presentaron un contenido en metano entre el 65–76 %.

Tabla 7. Resultados del rendimiento en términos de biogás

Muestra	Porcentaje CH_4 (%)	Potencial (Nm^3 biogás/t)	Potencial (Nm^3 biogás/t SV)
Restos de tomate	69,3 ± 5,0	23,2 ± 0,2	555,7 ± 3,6
Restos de patata	76,3 ± 1,7	77,2 ± 0,9	408,9 ± 4,6
Restos de cebolla	67,5 ± 0,1	45,9 ± 0,3	506,8 ± 2,8
Mezcla de restos hortícolas	65,0 ± 0,2	29,4 ± 1,0	554,2 ± 19,2
Pollinaza (viruta)	64,8 ± 0,1	81,5 ± 5,1	215,6 ± 13,4

Teniendo en cuenta la masa (en base húmeda) de los sustratos, los residuos de patata y la pollinaza son los sustratos más interesantes para poder llevar a cabo el proceso de digestión anaerobia, ya que presentan valores de potencial de producción de biogás de 77,2 y 81,5 Nm^3 biogás/t.

La mezcla de restos hortícolas resulta ser un sustrato interesante porque según los resultados de caracterización se ha podido observa un mayor contenido en humedad, lo que ayudará a que la mezcla de entrada presente mejores características para que se pueda hacer una digestión anaerobia por vía húmeda.

A continuación, se realiza una estimación de la energía bruta que se podría obtener con cada residuo en función de una producción anual de 100 t (Tabla 8).

Tabla 8. Estimación de la energía bruta producida

Muestra	Residuos (t/a)	Biogás (m^3/biogás·a)	Energía bruta (MWh/a)
Restos de tomate	100	2.320,0	16,0
Restos de patata	100	7.720,0	58,7
Restos de cebolla	100	4.590,0	30,9
Mezcla de restos hortícolas	100	2.940,0	12,7
Pollinaza (viruta)	100	2.689,5	52,8

5 Conclusiones

Las muestras recibidas presentan un contenido en sólidos, con relaciones SV/ST que a priori las hacen adecuada para la digestión anaerobia, y con un contenido en materia orgánica elevado.

En este caso, la pollinaza destaca por su elevado contenido en nitrógeno, por lo que podría dar lugar a inhibición del proceso si no se emplea un co-sustrato que pueda equilibrar el ratio C/N.

En los ensayos de determinación de potencial metanogénico se obtuvieron valores de producción de biogás más bajos para la muestra de restos de tomate y la mezcla de restos hortícolas. Los restos de patata, los restos de cebolla y la pollinaza alcanzaron valores de potencial más altos, 77,2, 45,9 y 81,5 Nm^3/t, respectivamente. Los valores de potencial más altos se corresponden con aquellas muestras con un porcentaje de sólidos más elevado, los restos de patata y la pollinaza.

La composición del gas del espacio de cabeza mostró un contenido en metano de entre el 65–76 % para todas las muestras. La biodegradabilidad, calculada a partir de la cantidad de metano generado, alcanzó valores altos en todas las muestras, excepto en la mezcla de restos hortícolas, cuya biodegradabilidad es del 46 %, bastante inferior a la de las demás muestras.

Por lo tanto, los restos de patata son el cosustrato más propicio para realizar la mezcla de codigestión con la pollinaza. Ya que es el residuo agrícola estudiado que presenta un mayor potencial, así como también un mayor porcentaje en metano y biodegradabilidad. Además, de que ya se había visto anteriormente en el estudio de generación de residuos agrícolas que en la comarca destacaba la producción de patatas.

La mezcla de residuos hortícolas también puede resultar un sustrato interesante atendiendo a su menor contenido en humedad.

6 Anexos

6.1. Índice de tablas

Tabla 1. Preparación de los viales..... 7
Tabla 2. Valores de pH y Conductividad Eléctrica 8
Tabla 3. Contenido en sólidos y humedad..... 9
Tabla 4. Contenido en materia orgánica..... 9
Tabla 5. Contenido en nutrientes.....10
Tabla 6. Resultados del rendimiento y biodegradabilidad.....12
Tabla 7. Resultados del rendimiento en términos de biogás.....12
Tabla 8. Estimación de la energía bruta producida.....13

6.2. Índice de figuras

Figura 1. Imagen de las muestras a) Restos de tomate, b) Restos de patata, c) Restos de cebolla, d) Mezcla de restos hortícolas..... 4
Figura 2. Imagen de la muestra de pollinaza 5
Figura 3. Sistema AMPTS II 7
Figura 4. Potencial de producción de metano (Nm^3CH_4/t) de las muestras: (◆) Restos de tomate, (◆) Restos de patata, (◆) Restos de cebolla, (◆) Mezcla de restos hortícolas y (◆) Pollinaza.....11

6.3. Índice de referencias

- Angelidaki, I., Alves, M., Bolzonella, D., Borzacconi, L., Campos, L., Guwy, A., Jenicek, P., Kalyuzhnui, S., Van Lier, J., (2009). Defining the biomethane potential (BMP) of solid organic wastes and energy crops: a proposed protocol for batch assays. Water Sci. Technol. 59 (5), 927–934.

- APHA, AWA, WEF, 2005. Standard methods for the examination of water and wastewater, 21th ed. American Public Health Association/American Water Works Association/Water Environment Federation, Washington, DC, USA.



Área de Bioenergía

energylab@energylab.es

Edificio CITEXVI

Fonte das Abelleiras, s/n. 36310, Vigo.

T_986 12 04 50 F_986 12 04 51

energylab@energylab.es

www.energylab.es

R 10.7_v03

Informe de evaluación del proceso de digestión anaerobia en planta piloto

Índice

1 Modificaciones 1

2 Introducción y Objeto 2

3 El proceso de digestión anaerobia 3

3.1. Introducción 3

3.2. Parámetros ambientales y de control 4

3.3. Tecnologías para la digestión anaerobia 7

4 Diseño y construcción de la planta 9

4.1. Sistema de digestión 9

4.2. Sistema de alimentación y vaciado 10

4.3. Sistema de medición de caudal y composición de gas 10

4.4. Sistema de mezcla 10

4.5. Sistema de monitorización y control 10

4.6. Diagrama de tuberías e instrumentación (P&ID) 11

5 Instalación en la explotación 12

5.1. Instalación 12

5.2. Puesta en marcha 12

6 Definición de parámetros operacionales 13

6.1. Mezclas de alimentación 13

6.2. Puesta en marcha de la planta piloto 14

7 Resultados 15

8 Conclusiones 23

9 Anexos 25

9.1. Referencias 25

1 Modificaciones

Fecha	Versión	Aclaraciones
20/09/2024	v00	Versión inicial

2 Introducción y Objeto

El proyecto APROAVI pretende aplicar los criterios de economía circular mediante **la gestión y tratamiento sostenibles** de las **deyecciones** generadas en el **sector avícola**, mejorando así la competitividad y sostenibilidad de dicho sector promoviendo la obtención y uso de **energía renovable**, así como de fertilizantes aditivados. Para todo ello se evaluarán dos alternativas tecnológicas. Por un lado, se llevará a cabo la **digestión anaerobia** de la pollinaza mezclada con residuos agrícolas mayoritarios de la zona de estudio, con objeto de maximizar la generación de biogás y la obtención de **fertilizantes** en forma de **digestato** anaerobio. Por otro lado, se evaluará el uso de la pollinaza como biocombustible en un proceso de **pirólisis**, en el que además de un **gas con poder calorífico se generará biochar**. En una última etapa del proyecto se estudiará y comparará la capacidad fertilizante tanto de la pollinaza como del **digestato anaerobio y el biochar mediante pruebas de valorización agronómica en el campo**.

El objetivo de este informe es describir los resultados del **ensayo en planta piloto de digestión anaerobia** llevado a cabo en las instalaciones de A Pendurada, con el fin de evaluar las mezclas de residuos, los tiempos de residencia (TRH) y las velocidades de carga orgánica (VCO) que servirán de base para la ingeniería básica de futuras plantas de digestión anaerobia que se diseñen para tratar residuos de gallinaza.

3 El proceso de digestión anaerobia

3.1. Introducción

La digestión anaerobia, también conocida como biometanización, es un proceso natural que sucede en condiciones de ausencia de oxígeno. En este proceso microbiológico se fermenta la materia orgánica transformándola por la acción bacteriana en biogás (compuesto por CH_4 y CO_2 principalmente) y produciendo un fertilizante rico en nutrientes mineralizados y por tanto en disposición inmediata para las plantas. Los digestores, también conocidos como biodigestores, son reactores cerrados que facilitan la digestión anaerobia proporcionando una atmósfera anaeróbica para los organismos responsables de dicho proceso.

La digestión anaerobia es un proceso multi-etapa y de reacciones paralelas donde diferentes tipos de bacterias degradan la materia orgánica sucesivamente. Se identifican cinco grandes poblaciones bacterianas, las cuales actúan catalizando tres procesos consecutivos: hidrólisis, acidogénesis (formación de ácidos) y metanogénesis (formación de metano), constituyendo cuatro etapas.

HIDRÓLISIS: En la primera etapa los compuestos orgánicos complejos, como lípidos, proteínas e hidratos de carbono son transformados en productos solubles y fácilmente degradables, como azúcares, aminoácidos, alcoholes, etc. La actividad hidrolítica tiene una importancia significativa en residuos de alto contenido orgánico y puede convertirse en la fase limitante del proceso.

ACIDOGÉNESIS: Las bacterias degradan los productos obtenidos en la hidrólisis, produciendo ácidos grasos volátiles (AGV) (ácidos propiónico, butírico y valérico), ácido acético (CH_3COOH), hidrógeno (H_2) y dióxido de carbono (CO_2).

ACETOGÉNESIS: En esta etapa los compuestos intermedios se convierten en ácido acético, hidrógeno y dióxido de carbono gracias a la actividad de las bacterias acetogénicas. El hidrógeno puede ser consumido por bacterias metanogénicas hidrogenofilas y también por bacterias homoacetogénicas, capaces de producir ácido acético a partir de hidrógeno y dióxido de carbono.

METANOGÉNESIS: La cuarta y última etapa conlleva la transformación del hidrógeno y el ácido acético producidos en las etapas anteriores en metano y dióxido de carbono. Se distinguen dos tipos de microorganismos (arqueas), las metanogénicas acetoclásticas que transforman el acetato en metano, y las metanogénicas hidrogenófilas que convierten el hidrógeno y el dióxido de carbono en metano. Aproximadamente el 70 % del metano producido en esta etapa se genera por medio de las arqueas acetoclásticas, y el 30 % restante gracias a las hidrogenófilas. Normalmente, las arqueas metanogénicas tienen un crecimiento más lento que las bacterias de las etapas anteriores, por lo que su crecimiento tiende a ser la etapa limitante del proceso, sin embargo, para residuos en los que la materia orgánica esté en forma de partículas, la fase limitante es la hidrólisis, proceso enzimático cuya velocidad depende de la superficie de las partículas.

En la Figura 1 se muestra el diagrama esquemático del proceso de digestión anaerobia.

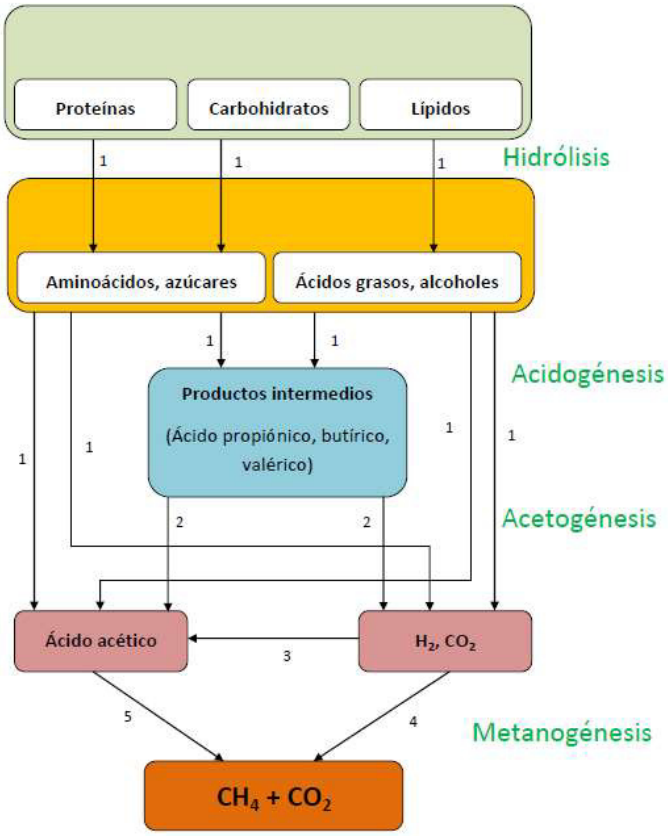


Figura 1. Fases de la fermentación anaerobia y poblaciones de microorganismos: 1) Bacterias hidrolíticas-acidogénicas; 2) Bacterias acetogénicas; 3) Bacterias homoacetogénicas; 4) Bacterias metanogénicas hidrogenófilas; 5) Bacterias metanogénicas acetoclásticas

En el proceso de digestión anaerobia se produce lo que se conoce como sintrofismo, es decir, la asociación en la que el crecimiento de un organismo depende de los factores y nutrientes aportados por otro organismo que vive cerca. La actividad de cada grupo de bacterias resulta interdependiente de las del resto de los grupos, configurándose como una especie de ecosistema microbiano en el que el papel de cada grupo influye en la actividad del resto de la biota microbiana.

3.2. Parámetros ambientales y de control

Existen varios factores que pueden afectar, mejorando o inhibiendo, el funcionamiento del proceso de digestión anaerobia. Estos factores, que se describen a continuación, son el pH, la temperatura, los nutrientes, el tiempo de retención y velocidad de carga orgánica, la agitación y las sustancias inhibidoras.

3.2.1. pH

El valor del pH es un importante indicador del funcionamiento del proceso dentro del digestor. En cada fase del proceso los microorganismos presentan máxima actividad en un rango de pH diferenciado (Tabla 1). El mayor problema generalmente es mantener el pH por encima de 6,6, ya que los ácidos orgánicos producidos como intermediarios

en las primeras etapas debido a una sobrecarga o cualquier otro desequilibrio pueden provocar un rápido descenso del pH y el consiguiente cese de la producción de metano.

Tabla 1. Rangos óptimos de pH para los diferentes microorganismos

Etapa	Tipo de microorganismos	Rango óptimo pH
Hidrólisis	*Hidrolíticas acidogénicas*	7,2 – 7,4
Acidogénesis	*Hidrolíticas acidogénicas*	7,2 – 7,4
Acetogénesis	*Acetogénicas y homoacetogénicas*	7,0 – 7,2
Metanogénesis	*Metanogénicas hidrogenófilas y acetoclásticas*	6,5 – 7,5

3.2.2. Temperatura

La temperatura es uno de los parámetros más importantes en la digestión anaerobia, ya que determina la velocidad de degradación del proceso anaeróbico, principalmente las de las etapas de hidrólisis y metanogénesis. Existen tres rangos de temperatura en los que la digestión anaerobia puede llevarse a cabo:

- Psicrófilo: por debajo de 25 ºC
- Mesófilo: entre 30 y 40 ºC
- Termófilo: entre 50 y 60 ºC

Con el aumento en el rango de temperaturas se aumenta la tasa de hidrólisis, la velocidad de crecimiento y con ello la velocidad en la producción de biogás. No obstante, y a pesar de que el rango termófilo sea el más idóneo para obtener una rápida velocidad del proceso y mayor eliminación de patógenos, suele ser más inestable a cualquier cambio de las condiciones de operación y presenta además mayores problemas de inhibición del proceso por la mayor toxicidad de determinados compuestos a elevadas temperaturas, como el nitrógeno amoniacal o los ácidos grasos de cadena larga. Además, operar en el rango termófilo requiere un mayor control y seguimiento del proceso, así como un mayor gasto energético para mantener la alta temperatura, mientras que el funcionamiento en el rango mesófilo es más estable y requiere un menor consumo de energía.

3.2.3. Nutrientes

Como en el resto de sistemas de tratamiento biológicos, los nutrientes son necesarios para satisfacer los requerimientos de crecimiento de los microorganismos. Los principales nutrientes necesarios para el crecimiento de estos son el carbono (C), nitrógeno (N) y fósforo (P), así como trazas de algunos elementos minerales (S, K, Ca, Na, Mg, Fe), necesarios para la activación de enzimas para la metanogénesis. La relación C/N debe estar comprendida entre 15/1 y 45/1, con un valor recomendable de 30/1, mientras que para el fósforo la relación óptima C/P es 150/1 (Elías et al., 2012).

3.2.4. Tiempo de retención hidráulico y velocidad de carga orgánica

El tiempo de retención hidráulico (TRH) es la medida que describe el tiempo promedio que una sustancia reside en el reactor. Al aumentar el TRH, aumenta el grado de materia orgánica degradada, así como la producción de metano.

La velocidad de carga orgánica (VCO) se define como la cantidad de materia orgánica alimentada por volumen de biodigestor en un determinado periodo de tiempo. En ausencia de inhibidores, altas cargas orgánicas proporcionan altas producciones de metano, aunque también aumenta el riesgo de sobrecargas puntuales que conllevan a la acidificación del reactor provocando un descenso del pH y el posible fallo del sistema.

3.2.5. Agitación

Mantener un cierto grado de agitación en el medio en digestión es necesario por los siguientes motivos:

- Mezclado y homogeneizado del sustrato de alimentación con el inóculo
- Distribución uniforme de calor para mantener una isotermia suficientemente correcta
- Evitar la formación de espumas o la sedimentación
- Favorecer la transferencia de gases, que pueden ser atrapados en forma de burbujas en el sustrato

Existen diferentes métodos de agitación, como son la recirculación de materia digerida, agitación mecánica y la inyección del gas producido. La materia digerida se recircula desde el centro del reactor y tras mezclarse con el sustrato nuevo y calentarse se introduce de nuevo en el reactor. La agitación mecánica se lleva a cabo con turbinas de baja velocidad para no destruir los flóculos o agregados de bacterias, necesarios para mantener un proceso estable. Finalmente, el método de inyección de biogás es exitoso para llevar a cabo la agitación del contenido del reactor y para evitar la formación de costras.

3.2.6. Sustancias inhibidoras

El proceso de digestión anaerobia es inhibido por la presencia de tóxicos en el sistema. El nitrógeno amoniacal, el ácido sulfhídrico y los ácidos grasos volátiles son inhibidores importantes de las bacterias metanogénicas, así como los metales pesados a altas concentraciones. Este tipo de sustancias pueden encontrarse como componentes del sustrato de alimentación o como subproductos de la actividad metabólica de los microorganismos del reactor.

Existen diferencias en los niveles de inhibición/toxicidad reportados para la mayoría de sustancias, la mayor razón para que existan estas variaciones es la complejidad del proceso de digestión anaerobia donde los mecanismos como el antagonismo, sinergismo y aclimatación pueden afectar significativamente a la inhibición.

3.3. Tecnologías para la digestión anaerobia

A continuación, se describen las tecnologías de digestión anaerobia más empleadas. La clasificación se lleva a cabo en función de la capacidad para mantener altas concentraciones de microorganismos en el interior (reactores de mezcla completa, reactores de flujo pistón o reactores con retención de biomasa), del contenido en humedad en el reactor, y del número de etapas (procesos en una etapa y procesos en dos etapas).

3.3.1. Reactores de mezcla completa

Consisten en grandes estructuras cilíndricas construidas en hormigón en las que, gracias a un sistema de agitación, se consigue que la concentración de cada sustancia sea parecida en todos los puntos de su volumen tanto a nivel de sustrato como de microorganismos. Pueden trabajar de forma continua, semicontinua, o discontinua. En estos digestores no hay fijación de biomasa, es decir, los microorganismos abandonan el digestor junto con el digestato.

Pueden trabajar con recirculación de digestato, lo que permite reducir el tiempo de retención hidráulica a costa de aumentar el tiempo de retención de microorganismos.

Las ventajas de este tipo de digestores son su simplicidad, buen funcionamiento, coste reducido y versatilidad (pueden trabajar en continuo o en discontinuo). Sin embargo, presentan mayores dificultados que otros digestores a la hora de controlar el tiempo de retención hidráulico, están expuestos al riesgo de formación de costras, y requieren la evacuación completa del digestor en caso de operaciones de mantenimiento interno.

3.3.2. Reactores de flujo pistón

En estos reactores la concentración de cada sustancia y de microorganismos varía en cada sección transversal del digestor. Consisten en estructuras cilíndricas o paralelepípedos construidos en hormigón o en metal. Pueden trabajar en régimen continuo o discontinuo. La alimentación se introduce por un extremo y se extrae por el opuesto. Están dotados de un sistema de agitación lenta formado por palas que tiene como función favorecer el desplazamiento de la mezcla. También están disponibles en disposición vertical, realizándose el mezclado de forma mecánica o hidráulica (inyectando biogás en la parte inferior).

Estos digestores requieren un menor tiempo de retención y por tanto un menor volumen. Además, presentan un mejor rendimiento del sistema calefactor y un menor riesgo de formación de costra que los digestores de mezcla completa. Se emplean cuando se prevé un alto contenido de sólidos en el interior.

3.3.3. Reactores con retención de biomasa

Se trata de digestores en los que se retienen los microorganismos en el interior evitando la configuración del reactor de mezcla completa. Como resultado, se puede reducir el tiempo de retención hidráulico. Esto se consigue mediante inmovilización sobre un soporte, como es el caso de los filtros anaerobios y los lechos fluidizados, o mediante agregación o floculación de biomasa y retención por gravedad, como en el caso de los

reactores de lecho de lodos. Estos sistemas son adecuados para el tratamiento de aguas residuales.

En el filtro anaerobio, los microorganismos están fijados en la superficie de un soporte inerte de material cerámico o plástico, o en sus intersticios. La disposición puede ser irregular con flujo ascendente, o regular con flujo descendente (lecho fijo). El sustrato puede ser degradable, teniendo un efecto sobre la actividad del reactor.

En los reactores de lecho fluidizado las bacterias se encuentran fijas formando una biopelícula sobre pequeñas partículas inertes que se mantienen fluidizadas mediante el flujo ascendente de un fluido. En estos digestores se utiliza recirculación con el fin de mantener un caudal adecuado que permita la fluidización. El uso de este tipo de reactores anaerobios es muy limitado.

En el reactor de lecho de lodos las bacterias se mantienen en el interior del reactor mediante la formación de gránulos derivada de su floculación. El fluido circula de forma ascendente y en la parte superior del reactor hay un separador sólido/líquido/gas.

3.3.4. Digestión anaerobia según el contenido de agua en el reactor

Según el contenido de agua durante la digestión se diferencian dos vías, la húmeda y la seca.

En la vía húmeda, el contenido de sólidos totales es inferior al 10 – 15%. Esta vía facilita el tratamiento de residuos municipales con importante contenido de humedad, además de la retirada de contaminantes en la etapa de pretratamiento, acelera los procesos de transferencia de materia y energía al tener lugar en un entorno líquido, y permite que las burbujas de biogás se separen fácilmente de las células bacterianas y de los sólidos en suspensión. Además, facilita el proceso de regulación. Esta vía suele requerir dilución.

En la vía seca, el contenido de sólidos totales está entre un 15 y un 25%. Se lleva a cabo en condiciones termófilas o mesófilas. Permite minimizar el consumo de agua y, al disponer de un piso móvil permite asegurar la no acumulación de inertes en el digestor. Por otro lado, requiere menos equipos que la digestión húmeda.

3.3.5. Sistemas de una etapa y sistemas de dos etapas

En los sistemas de una etapa, las cuatro fases de la digestión anaerobia (hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis) tienen lugar en un único digestor. Cada fase tiene unas condiciones óptimas en cuanto a pH, o temperatura, por lo que las condiciones de operación del digestor serán aquellas que cumplan en la medida de lo posible con las cuatro fases. Es posible llevar a cabo una separación sólido líquido a la salida y recircular parte de la fracción líquida.

Estos sistemas se utilizan para tiempos de retención de 30 días o menos, aproximadamente. Esta modalidad es sencilla de fabricar, fácil de controlar, y supone menores costes de operación ya que la necesidad de bombeo es menor. Sin embargo, impide operar en las condiciones óptimas de cada fase de la digestión anaerobia.

En los sistemas de dos etapas, la digestión anaerobia tiene lugar en dos digestores en serie, de forma que en el primero se lleva a cabo principalmente la hidrólisis y en el

segundo la metanogénesis. Por tanto, es posible adaptar mejor las condiciones de operación de cada digestor al óptimo de estas etapas.

Se puede llevar a cabo recirculación al primer o al segundo digestor en función de las necesidades de dilución y de los rendimientos de operación.

Los residuos más apropiados son aquellos con tiempos de retención de 50 días aproximadamente (o más). Esta modalidad permite operar en los valores óptimos de las fases de la digestión, pero supone mayores costes de inversión y de operación.

4 Diseño y construcción de la planta

Teniendo en cuenta las características de los residuos a alimentar y las necesidades del proceso, se optó por plantear un diseño de un reactor de mezcla completa (CSTR), de una etapa y operando en régimen mesofílico.

La planta de se compone de los siguientes elementos:

4.1. Sistema de digestión

El sistema de digestión supone el núcleo central del proceso, y será donde se lleve a cabo la reacción. Fue fabricado por MMG Maquinaria, tiene un volumen de 800 L, y está colocado sobre una estructura para facilitar su transporte.

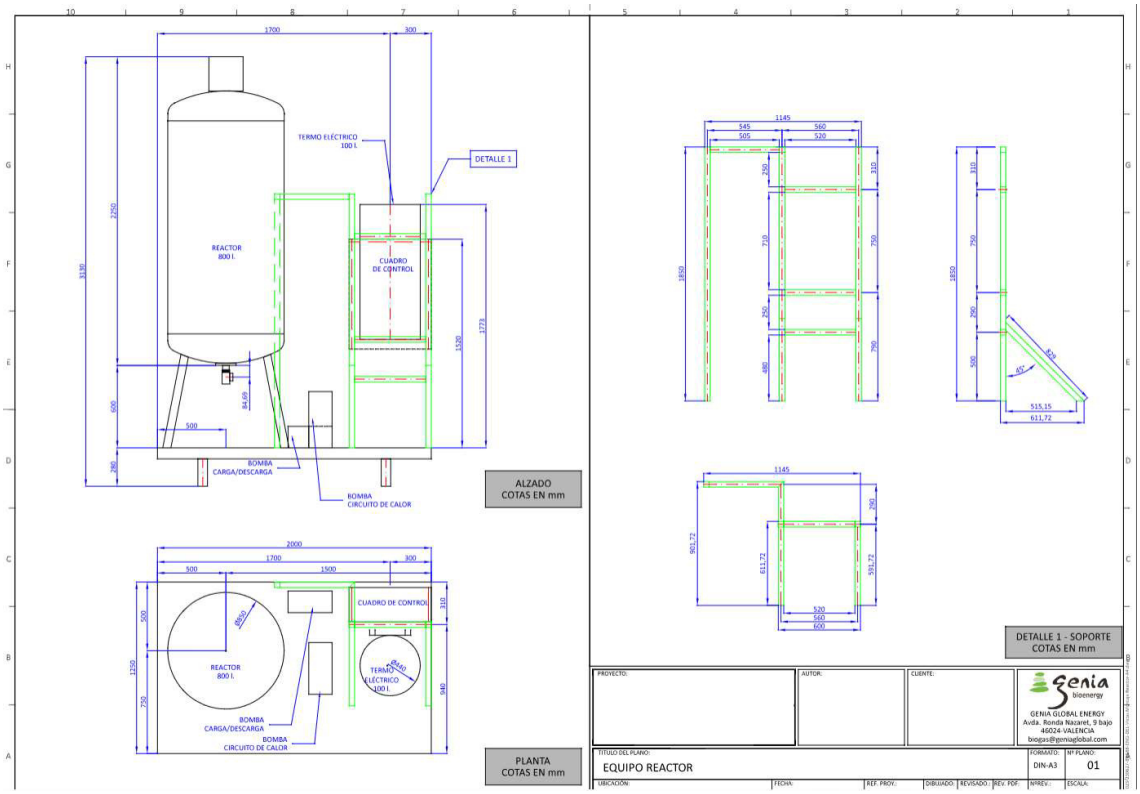


Figura 2. Planos de la planta piloto

4.2. Sistema de alimentación y vaciado

Este sistema consta de una bomba peristáltica de alimentación Damova modelo MP-6048.12, capaz de suministrar un caudal de 96 L/h a 48 rpm. Esta bomba tiene la posibilidad de invertir el sentido de giro. Dicho caudal se ajustará para alcanzar las condiciones de trabajo más adecuadas (TRH y VCO). La alimentación se realiza por la parte superior del reactor.

El sistema de vaciado se basa en la misma bomba de alimentación, de forma que al cambiar el sistema de giro retira parte del contenido del interior del reactor (digestato). También forma parte de este sistema un puerto de descarga situado en la parte inferior del reactor.

4.3. Sistema de medición de caudal y composición de gas

El biogás producido sale del sistema a través de una conducción situada en la parte superior del reactor. Para poder cuantificar la cantidad de gas producido se dispone de un caudalímetro Honeywell BK-G4M con un emisor de impulsos Honeywell IN-Z61, dicho caudalímetro sirve para caudales desde 0,04 m^3/h a 6 m^3/h. A la salida del caudalímetro se encuentra un sistema de almacenamiento de biogás, que además permite conectar un analizador para determinar su composición. Este análisis de realizó mediante un analizador portátil MRU OPTIMA Biogás.

4.4. Sistema de mezcla

El líquido se distribuye de forma homogénea en el interior del reactor gracias a la instalación de un agitador mecánico, de eje vertical, instalado en la parte superior del reactor. Se ha implementado una secuencia de control para la agitación automática con consigna del tiempo de agitación.

4.5. Sistema de monitorización y control

El **sistema de monitorización y control** permitirá el funcionamiento de los equipos y el almacenamiento de la información obtenida. Está formado por:

- Cuadro de protección y control. Instalado en un armario en chapa con placa de montaje donde se integrarán las diferentes acometidas y salidas de los equipos, así como los variadores de frecuencia. Además, se complementará con el sistema de control de la planta, que dispone de una pantalla para poder manejar el PLC y visualizar los datos recogidos mediante los medidores instalados en distintos puntos.

- Sistema de instrumentación. Incluye los equipos de medida online que se instalarán en los distintos equipos:
  - Sensor de pH: Una unidad instalada en la parte frontal del reactor de digestión, en la zona inferior y conectada a un controlador ASTRALPOOL Control Basic Next.
  - Sensor de conductividad: Una unidad instalada en la parte frontal del reactor de digestión, en la zona inferior y conectada a un controlador Serie 42 Chemitec.
  - Sensor de nivel: Una unidad instalada en la parte frontal del reactor de digestión, en la zona inferior, por debajo de los sensores de pH y CE.

- Sensor de temperatura: Una unidad instalada en la parte posterior del reactor de digestión, en la zona inferior. Este sensor de temperatura proporciona la señal para que el sistema de calentamiento (un termo eléctrico) se active, y mantenga la temperatura en el setpoint fijado gracias a las tuberías internas por las que circula el agua caliente.
- Sensor de presión: Una unidad instalada en la parte superior del reactor de digestión.

4.6. Diagrama de tuberías e instrumentación (P&ID)

De manera paralela a la definición de los equipos principales, se fueron estableciendo las corrientes de interconexión entre los mismos y los equipos auxiliares y sus señales, para llegar a establecer el diagrama P&ID.

En la Figura 3 se muestra el diagrama, donde se recogen las diferentes líneas de la planta y las señales usadas como base para establecer la lógica de funcionamiento que permite controla el proceso en toda la planta.

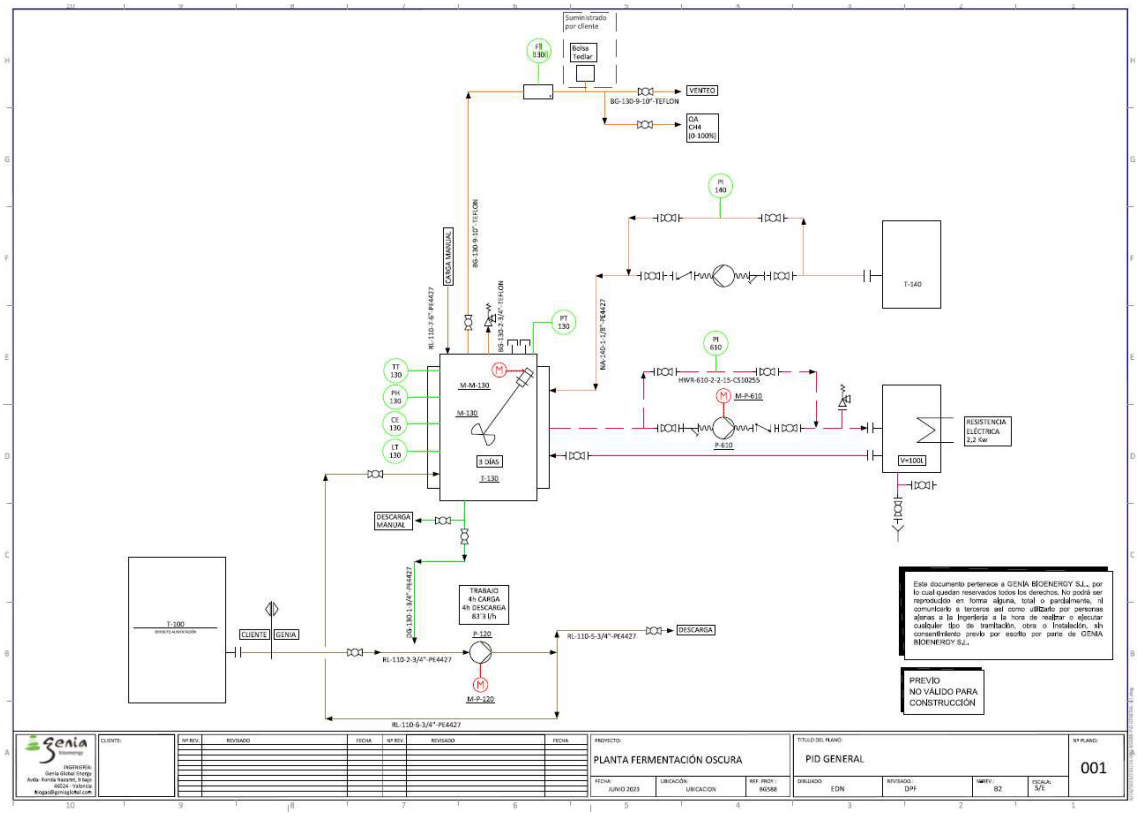


Figura 3. Diagrama P&ID

5 Instalación en la explotación

5.1. Instalación

Una vez concluida la adecuación de la nave para recibir la planta se pudo hacer el traslado de los distintos equipos que la conforman y todo el material necesario para hacer las conexiones.

Tras realizar el replanteo de la bancada se llevó a cabo la instalación de las tuberías y del conexionado eléctrico.

A continuación, se muestran algunas imágenes de la planta piloto instalada en la explotación A Pendurada.



Figura 4. Planta piloto instala

5.2. Puesta en marcha

Una vez instalados y conectados todos los equipos fue necesario realizar las pruebas de funcionamiento de cada uno de los componentes por separado y de manera conjunta

- Para cada una de las bombas se realizó la comprobación del sentido de giro del motor y de caudal de bombeo.
- En las sondas se ajustaron los valores de funcionamiento (calibraciones) y se establecieron los valores límite para las alarmas.
- Se comprobaron los caudales de medida del caudalímetro (gas).
- Ajuste de los tiempos de funcionamiento de los equipos de bombeo.

También se realizaron las pruebas hidráulicas y de presión, para garantizar que no existiesen fugas de líquido o de gas.

Durante esta fase, se identificaron una serie de problemas, relacionados principalmente con la estanqueidad del sistema y con la sensibilidad de la señal digital proporcionada por las sondas de pH, que fueron solucionados de forma rápida sin afectar a la ejecución del proyecto.

6 Definición de parámetros operacionales

6.1. Mezclas de alimentación

En este estudio se ensayaron tres mezclas o recetas diferentes. En todos los casos se mantuvo la mayor proporción de pollinaza, por ser el residuo más abundante en la región.

La estimación de generación de residuos se presenta en la Tabla 2, donde se puede observar la mayor proporción de pollinaza frente a los residuos de origen agrícola.

Tabla 2. Generación de residuos

	Pollinaza (t/a)	Patata (t/a)	Restos hortícolas (t/a)
Ourense	195.110	7.082	1.919
A Limia	93.070	3.316	302
Baixa Limia	14.223	188	113

Atendiendo a los valores mostrados, la proporción pollinaza:patata varía ampliamente en función de la región considerada, pasando de un ratio 27,5:1 en Ourense, a 28:1 en A Limia y 75,5:1 en A Baixa Limia.

Teniendo en cuenta la variabilidad estacional, asociada a los cultivos, con picos de generación en épocas concretos del año estos ratios disminuyen, por lo que se ha tenido en cuenta en la elaboración de la receta.

Tal como se estableció en el informe de caracterización físico-química, también es necesario tener en cuenta los diferentes ratios C/N de los sustratos, para evitar problemas de inhibición. En este caso, la emplear los restos hortícolas como co-sustratos se consigue controlar la presencia de nitrógeno.

Adicionalmente fue necesario hacer modificaciones sobre las mezclas establecidas, surgidas por motivos operacionales, y ante la falta de suministro de algunos sustratos.

Las recetas estudiadas son las siguientes:

- Receta 1: con pollinaza, patata y restos hortícolas, y agua
- Receta 2: con sólo pollinaza y agua
- Receta 3: con pollinaza, patata y restos hortícolas, y agua

Las proporciones ensayadas para cada una se presentan en la Tabla 3.

Tabla 3. Recetas mezcla empleadas

	Pollinaza (%)	Patata (%)	Restos hortícolas (%)	Agua (%)
Receta 1	18,59	1,81	0,48	79,12
Receta 2	19,03	0,00	0,00	80,97
Receta 3	18,25	5,69	1,51	74,55

La adición de agua a cada receta se realizó con el objetivo de disminuir el contenido en sólidos de la alimentación, para que pudiese ser bombeable. Para poder disminuir el uso de agua corriente se disponía de un sistema de separación sólido-líquido, pero en los primeros días de operación se pudo comprobar que se producían numerosos atascos, por lo que finalmente no pudo ser empleado. En una operación a escala industrial, se realizaría el aporte líquido teniendo en cuenta otras fuentes.

Teniendo en cuenta las mezclas realizadas en cada una de las recetas, y conociendo los valores de potencial obtenidos durante la fase de caracterización, es posible establecer el valor aproximado que debería obtenerse en la planta piloto. En este caso, haciendo referencia al potencial metanogénico en términos de m^3CH_4/tSV los valores deberían situarse en 148 m^3CH_4/tSV para la Receta 1, 140 m^3CH_4/tSV para la receta 2 y 165 m^3CH_4/tSV para la Receta 3.

Tal como se verá a continuación, las mezclas de alimentación se preparaban en lotes, en las proporciones indicadas, por lo que existía cierta variabilidad entre cada preparación.

6.2. Puesta en marcha de la planta piloto

Se ha empleado la planta piloto diseñada y construida para tal fin en el marco del proyecto APROAVI.

6.2.1. Inóculo

El inóculo empleado para el arranque de la planta piloto fue el digestato del reactor anaerobio de lodos de la EDAR de Guillarei (Pontevedra).

Se empleó un volumen de 200 L, con una concentración inicial de 16,7 gSV/L.

El procedimiento para la puesta en marcha consistió en añadir el volumen total de inóculo al interior del reactor, ajustar la temperatura de operación, y una vez alcanzada, añadir diariamente el sustrato necesario hasta llegar al volumen aproximado de trabajo de 600 L, momento a partir del cual se comenzó a realizar la retirada de digestato.

6.2.2. Determinación de parámetros operacionales

Los parámetros operacionales hacen referencia a las condiciones de trabajo de la planta piloto. En este caso, se contemplaron los siguientes:

- Temperatura: rango mesofílico, con temperatura fijada a 36 ºC
- Agitación: continua

- Concentración de sólidos: vía húmeda (no superior al 15 %)
- Tiempo de retención: es el cociente entre el volumen y el caudal de tratamiento, es decir, el tiempo medio de permanencia del influente en el reactor, sometido a la acción de los microorganismos. Se estableció que el reactor empezaría a trabajar con un tiempo de retención hidráulico (TRH) de 28 días.
- Velocidad de carga. Es la cantidad de materia orgánica introducida por unidad de volumen de reactor y tiempo. Valores bajos implican baja concentración en el influente y/o elevado tiempo de retención. Teniendo en cuenta el valor promedio (DQO, ST y SV) de los sustratos se establecieron los valores de trabajo de la velocidad de carga orgánica (VCO) y de la velocidad de carga de sólidos (VCS). De manera general, los valores de operación en digestores anaerobios con tratamiento por vía húmeda[1] no suelen ser superiores a 3,5 – 4,0 kgSV/m^3reactor·d, por lo que en este sistema se establecieron valores iniciales en torno a 2,5 kgSV/ m^3reactor ·d, que variaron en función de las características de la alimentación y la operación (adaptación del TRH).

7 Resultados

El seguimiento de la operación del reactor se estableció en función de resultados como la cantidad y composición del biogás generado y la degradación de sólidos alcanzada en el interior del digestor, así como su estabilidad en cuanto a valores de pH y alcalinidad.

La operación del digestor se dividió en 3 etapas, cada una de ellas atendiendo a la mezcla de alimentación empleada, y con una duración total de 320 días. Estas etapas se representan en las gráficas separadas por líneas discontinuas.

Tabla 4. Etapas de operación

ETAPA	Días	Masa alimentada (kg)	TRH (d)	VCS aplicada (kgSV/m^3·d)
Etapa 1*	0-70	21,1	28,5	2,47
Etapa 2	71-162	20,1	29,9	2,11
Etapa 3	162-320	17,0	35,4	2,31

*La Etapa 1 cuenta con una pequeña fase de aclimatación y puesta en marcha, con una duración aproximada de 21 días, que se excluyen de los cálculos de valores promedio de la etapa. Además, durante la primera semana se realizó un incremento progresivo de la masa alimentada (Figura 5) y no se produjo retirada de digestato, con el objetivo de alcanzar el volumen de operación de la planta piloto.

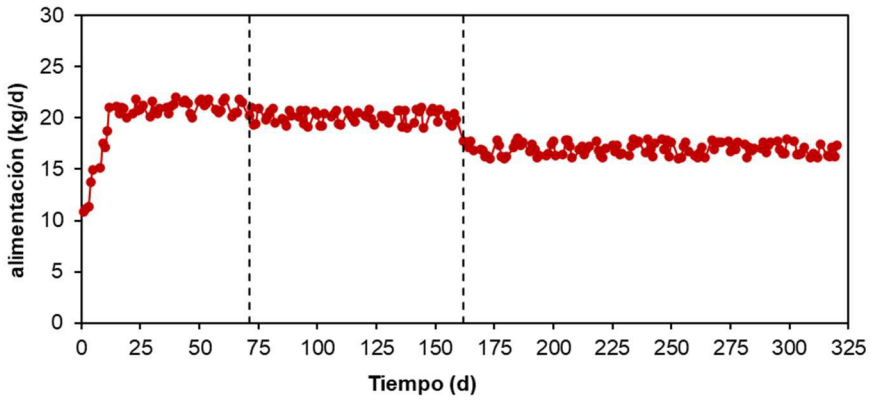


Figura 5. Masa alimentada (●)

En la Figura 6, se marca la variación de los valores de TRH y VCS aplicada durante cada una de las etapas. Si se mantienen las condiciones de alimentación el TRH y la VCS son inversamente proporcionales, de forma que al disminuir el TRH se produce un aumento de la VCS, pero en este caso, al modificar las características de la alimentación dicho comportamiento no se observa tan claramente.

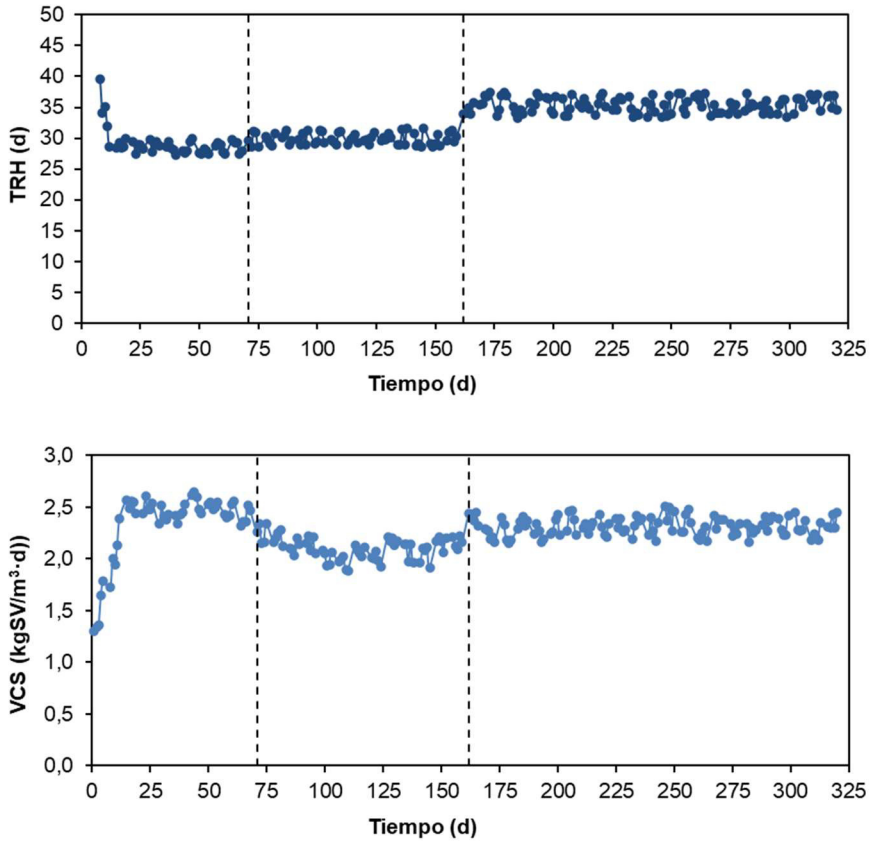


Figura 6. Variación del TRH (●) y VCS (●)

Puede observarse que durante la fase inicial de aclimatación, el TRH y la VCS fueron diferentes a la media de la Etapa 1, para favorecer la adaptación.

Los resultados de operación de los digestores anaerobios son dependientes, entre otros aspectos, de las condiciones de operación impuestas, de forma que cuando se producen cambios en los parámetros operacionales (cambios en el sustrato de alimentación, TRH, temperatura, etc.) debe producirse una adaptación de los microorganismos a las nuevas condiciones. En este caso, el inóculo procedente de la EDAR, especializado en el tratamiento de fangos espesados tuvo que aclimatarse al nuevo sustrato.

La producción y composición de biogás presenta una fase inicial en la que se registraron valores bajos, debida fundamentalmente a la puesta en marcha del reactor y la adaptación del inóculo a las nuevas condiciones de operación.

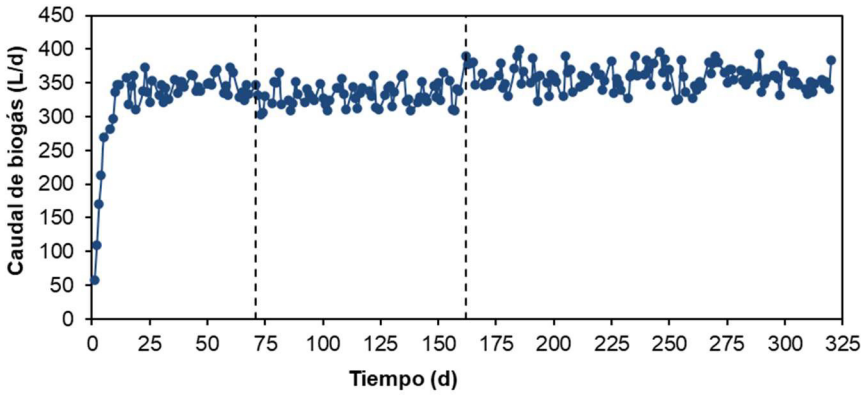


Figura 7. Caudal de biogás (●)

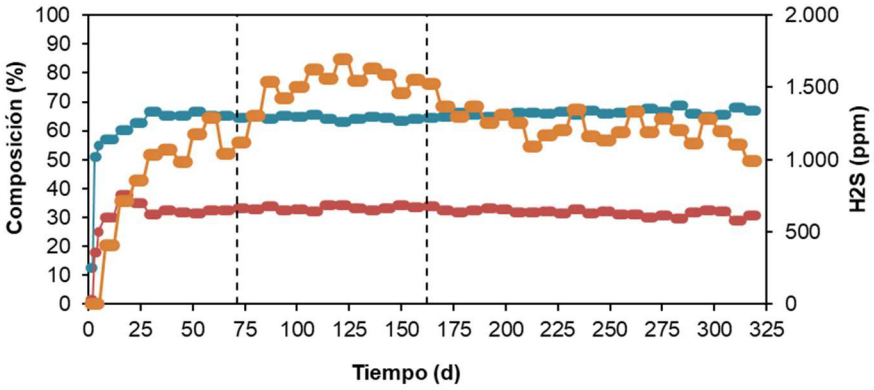


Figura 8. Composición en términos de CO_2 (●), CH_4 (●) y H_2S (●)

En la Figura 7 y Figura 8 puede observarse el comportamiento del reactor durante cada una de las etapas:

- Etapa 1: durante los primeros días se produjo un aumento progresivo del caudal de biogás generado, hasta llegar al día 21, en el que el caudal se mantuvo en valores similares hasta el final de la primera etapa. Se tuvo un promedio de biogás de 345 L/d, con un porcentaje del 65,2 % de CH_4 y 32,4 % de CO_2. Se observó una concentración creciente de la concentración de H_2S, alcanzado valores al final de la etapa en torno a 1000 ppm.
- Etapa 2: la modificación de la alimentación trajo consigo una ligera disminución del caudal promedio de biogás, obteniéndose un valor en la etapa de 332 L/d,

con un porcentaje de metano ligeramente inferior, con un valor promedio de 64,4 %. El valor de CO_2 fue ligeramente superior, con un valor de 33,2 % y la concentración de H_2S aumentó hasta alcanzar valores en torno a 1700 ppm.

- Etapa 3: al modificar la alimentación y aumentar el TRH, se produjo un incremento del caudal de biogás producido, obteniéndose 358 L/d en promedio y un porcentaje en metano del 66,2 %. Tras la modificación de la alimentación se pudo observar una disminución del contenido en H_2S en el biogás.

La masa de alimentación al reactor, expresada en términos de sólidos volátiles y totales (SV, ST), presentó variaciones, en parte por las diferentes mezclas ensayadas y en otra parte por las fluctuaciones a la hora de realizar las mezclas cada vez que se preparaba un lote. La mezcla de entrada tuvo un porcentaje promedio en ST del orden de 8,4 % en la Etapa 1, de 8,6 % en la Etapa 2 y 9,6 % en la Etapa 3, y SV del orden de 7,0 % en la Etapa 1, de 6,3% en la Etapa 2 y 8,2 % en la Etapa 3 tal como se puede observar en la Figura 10.

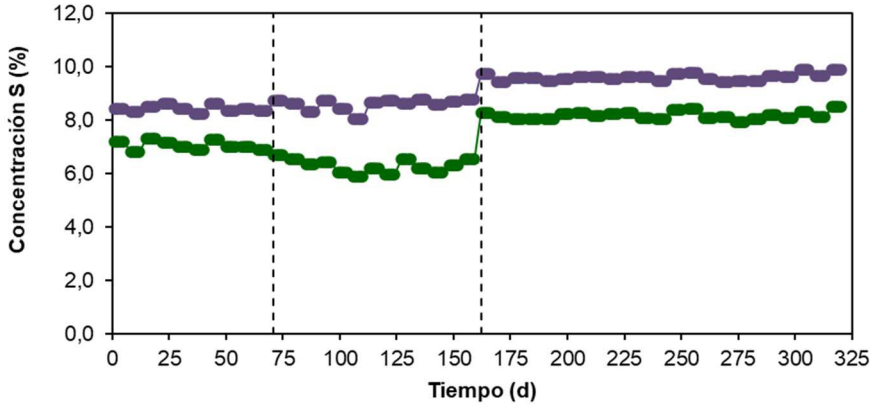


Figura 9. Concentración de ST (●) y SV (●) a la entrada

Durante el proceso de digestión se produce la degradación de los sólidos volátiles, disminuyendo su contenido. Los valores medios de SV obtenidos a la salida fueron de 2,8 % en la Etapa 1 y Etapa 3 y de 3,4 % en la Etapa 2 (Figura 10).

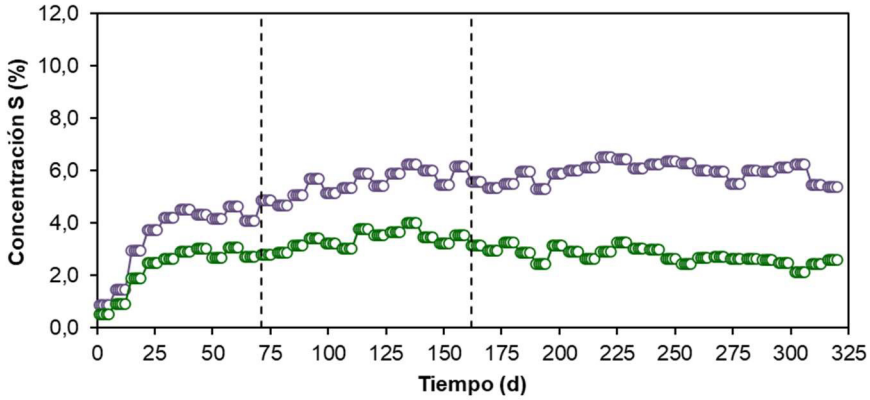


Figura 10. Concentración de ST (○) y SV (○) a la salida

En la Figura 10 también se puede apreciar la proporción del contenido de SV y de ST, que da lugar a la ratio SV/ST, que se mantuvo en de 0,84, 0,73 y 0,85 a la entrada. En el caso de la salida, debido a la degradación de la fracción orgánica, los valores de la ratio SV/ST son más bajos (menor proporción de material orgánico). Durante la operación los valores pasaron a ser de 0,66 en la Etapa 1, 0,61 en la Etapa 2 y 0,47 en la Etapa 3. En los primeros días de operación se observa un valor bajo de concentración de ST y SV, pero es debido principalmente al efecto del inóculo empleado para la puesta en marcha. En la Figura 11 se puede observar como fue la evolución del digestato, apreciándose diferencias claras en cuanto al color.

El digestato obtenido presenta un contenido en humedad elevado, por lo que de cara a su manejo en campo es recomendable una concentración previa.



Figura 11. Imagen del digestato, en el día 10 de operación y en el día 150.

En una operación a largo plazo debe tenerse en cuenta la posible acumulación de inertes en el digestor, causados principalmente por los materiales inorgánicos presentes en la mezcla de alimentación, que pueden causar zonas muertas y disminuir el volumen útil de operación a largo plazo. En este caso, se prestó especial atención a mantener una mezcla homogénea en el interior del reactor, y a retirar el digestato en las mismas condiciones para evitar la acumulación de inertes.

La eliminación de sólidos se determinó en función de la concentración de SV presente en la entrada y la medida a la salida (digestato). En términos de SV, la eficacia de eliminación de sólidos varió desde 60,3 % en la Etapa 1, bajando hasta un valor de 46,5 en la Etapa 2 y remontando hasta un valor de 66,2 % en la Etapa 3 (Figura 12). En los primeros días de operación se observa un valor elevado de degradación, pero como se comentó anteriormente es debido principalmente al efecto del inóculo.

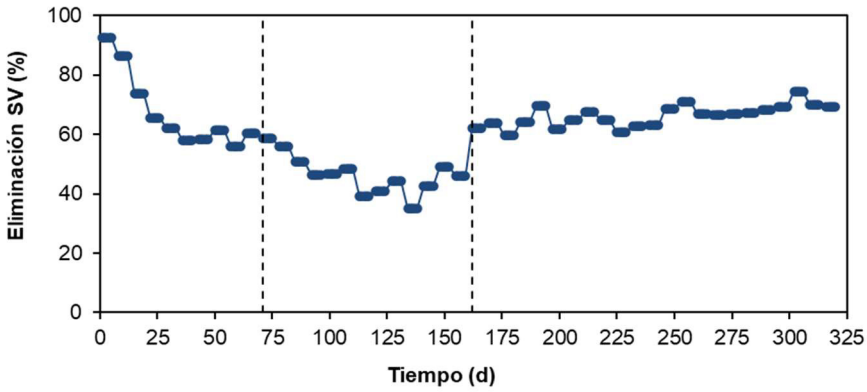


Figura 12. Eficacia de eliminación de SV (●)

La cantidad de biogás y de metano producidos en función de la masa alimentada permite establecer el potencial de producción de la alimentación. La base de referencia se ha establecido en función del contenido de materia orgánica expresado como sólidos volátiles (SV) presentes en la mezcla de alimentación y la masa total alimentada.

La estabilidad de la planta, asociada a las condiciones de operación, se evaluó también en función del pH y la capacidad tampón (ratio de alcalinidad), ambos medidos en la fase líquida.

Los dos parámetros están relacionados entre sí, ya que la capacidad tampón del reactor, debida principalmente al bicarbonato, representa la posibilidad de resistir a los cambios de pH que pueden ser causados por la acumulación de ácidos grasos volátiles (AGV).

Si la tasa de producción de AGV durante las fases iniciales de la digestión anaerobia es mayor que la tasa de consumo por las bacterias metanogénicas ocurre una acumulación de AGV en el reactor que provocaría la acidificación si no hay capacidad tampón, y causar la inestabilidad del proceso. Por este motivo, la ratio AGV/bicarbonato (ratio de alcalinidad) se suele emplear como un indicador de estabilidad. Como regla general, se establece un valor límite máximo[2] de 0,30.

En la Figura 13 se observa que la ratio de alcalinidad, por debajo de 0,3, que son considerados valores normales. La estabilidad también se mantuvo en términos de pH, y el valor se mantuvo en el rango de 8,0 en la Etapa 1, en 7,8 en la Etapa 2 y en 7,7 en la Etapa 3.

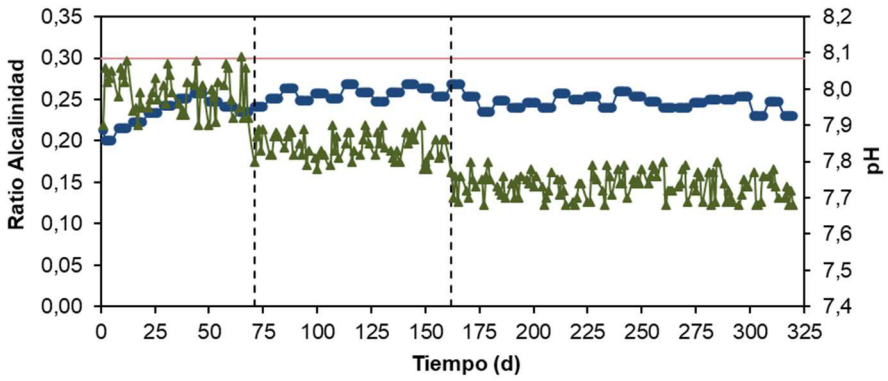


Figura 13. Valor de alcalinidad (●) y de pH (▲) en el digestato. (—) valor límite de alcalinidad.

Las inhibiciones del proceso de digestión anaerobia también pueden deberse a la presencia de compuestos nitrogenados en forma de amonio libre, por lo que se realizó el seguimiento de las formas de amonio, tanto en la alimentación como en el digestato. En este caso, debido a la dilución empleada, las concentraciones obtenidas no resultaron problemáticas para el proceso.

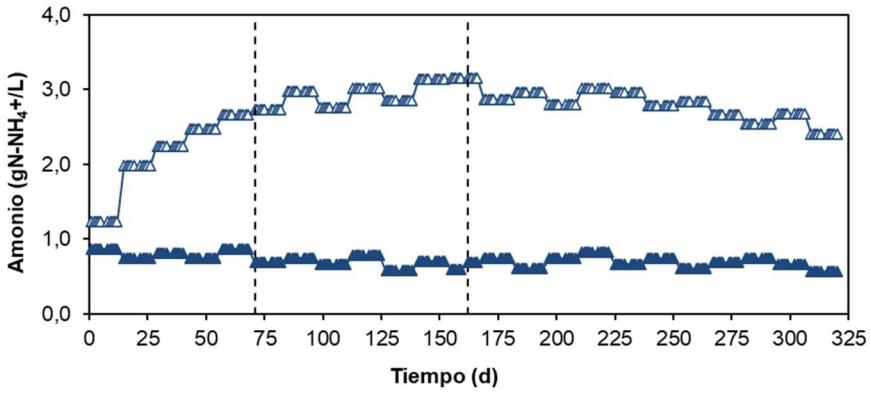


Figura 14. Valor de concentración de amonio en la alimentación (▲) y (△) en el digestato.

En los procesos de digestión anaerobia, al descomponerse la materia orgánica se produce la ruptura de los grupos amino presentes en los compuestos proteicos, por lo que es habitual que la concentración de amonio en el digestato sea superior al valor de entrada, tal como se ha observado en la operación de la planta piloto. En el proceso no se van a observar diferencias significativas con respecto al contenido de nitrógeno total, puesto que sólo se produce la transformación de compuestos entre fase particulada y soluble, pero apenas se produce transformación a fase gas.

Durante la fase de operación del reactor se realizó el seguimiento de otros parámetros, como no se produjeron variaciones significativas durante cada etapa, se recogen a continuación en forma de tabla (Tabla 5).

Tabla 5. Otros resultados de operación

	Etapa 1	Etapa 2	Etapa 3
DQO alimentación (gO_2/kg)	76,8 ± 3,2	75,3 ± 1,9	86,6 ± 4,8
DQO digestato (gO_2/kg)	26,3 ± 6,8	28,3 ± 1,6	27,1 ± 0,5
NTK alimentación (gN/kg)	2,70 ± 0,06	2,71 ± 0,11	2,85 ± 0,20
NTK digestato (gN/kg)	2,96 ± 0,04	3,10 ± 0,13	3,12 ± 0,14
CE digestato (mS/cm)	7,01 ± 0,48	7,50 ± 0,34	6,94 ± 0,47

En la Figura 15 se presentan las gráficas de producción de potencial de metano, en las que se puede observar que los valores de potencial fluctuaron entre 143 m^3 CH_4/tSV de la etapa 1 y 160,5 y 160,9 de las Etapa 2 y Etapa 3. El valor de potencial referenciado por tonelada de materia fresca varió entre 10,1 m^3 CH_4/t (Etapa 1 y Etapa 2) y 13,1 m^3 CH_4/t.

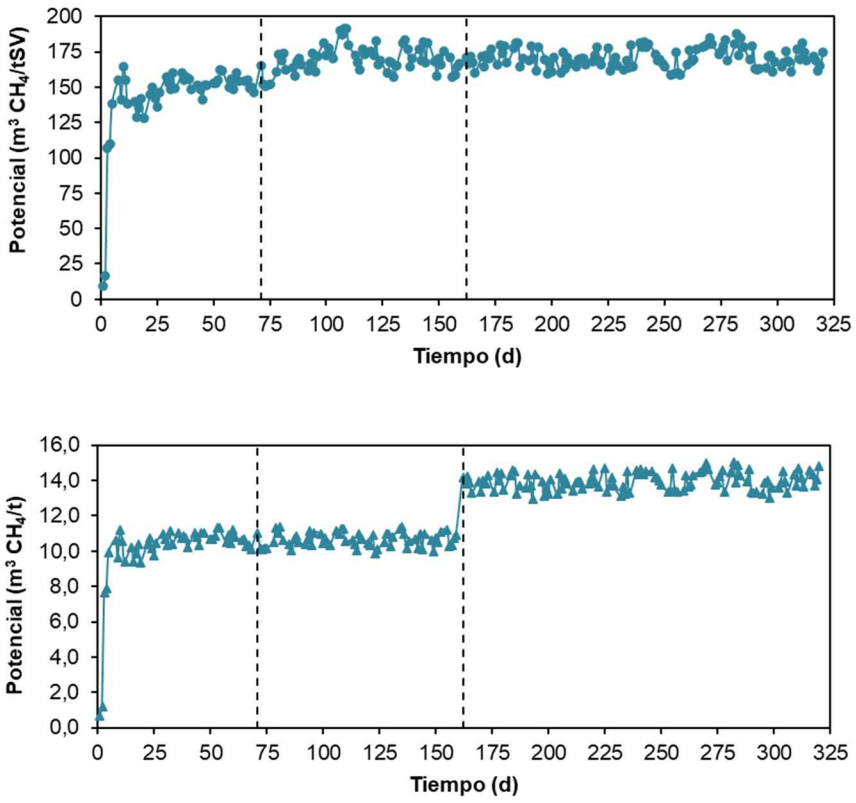


Figura 15. Potencial de producción de metano en m^3 CH_4/tSV (●) y m^3 CH_4/t (▲)

El potencial en base al metano es el valor que se emplea generalmente de referencia, ya que es el gas con valor energético.

De manera general, se observa que, debido a las variaciones observadas en la composición de biogás, el potencial de producción presenta ligeras fluctuaciones. En la Tabla 6 se resumen los datos de potencial en función de las diferentes bases de cálculo.

Tabla 6. Valores de potencial obtenidos en la planta piloto

	Etapa 1	Etapa 2	Etapa 3
m^3 CH_4/tSV	151,9 ± 38,3	169,7 ± 12,0	170,9 ± 7,3
m^3 CH_4/t	10,7 ± 2,7	10,7 ± 0,4	14,0 ± 1,4
m^3 biogas/tSV	232,7 ± 42,1	263,4 ± 19,5	258,1 ± 10,1
m^3 biogas/t	16,4 ± 2,8	16,5 ± 0,5	21,1 ± 1,9

Puede observarse que los valores obtenidos para cada una de las recetas se aproximan a los valores teóricos establecidos en el ensayo discontinuo. Las desviaciones (valores superiores e inferiores) están relacionados principalmente a la aclimatación de los microorganismos en un proceso de operación en continuo o a procesos inhibitorios surgidos por acumulación a largo plazo.

Una vez establecido el potencial de metano que es posible obtener en la planta de digestión anaerobia, se puede hacer una extrapolación para determinar el cálculo energético, teniendo en cuenta que por cada m^3 de CH_4 se pueden obtener 9,96 kWh.

En la Tabla 7 se presentan los valores energéticos asociados a la operación de la planta piloto, extrapolando la energía bruta de cada etapa a un periodo anual.

Tabla 7. Valores de energía

	Etapa 1	Etapa 2	Etapa 3
Potencial (m^3 CH_4/t)	10,7 ± 2,7	10,7 ± 0,4	14,0 ± 1,4
Residuo alimentado (kg/d)	21,1 ± 3,5	20,1 ± 0,8	17,0 ± 1,4
CH_4 producido (l/d)	225,2 ± 62,4	214,2 ± 12,4	237,0 ± 15,0
Energía bruta anual (kWh)	819	779	862

Los valores de energía no resultan elevados, pero hay que tener en cuenta que la escala de la planta piloto es muy pequeña, y debe valorarse la energía para el tratamiento de una cantidad de residuos mayor.

8 Conclusiones

Tras la finalización de esta actividad se ha podido disponer de un sistema de digestión anaerobia instalado en A Pendurada, para el tratamiento de los residuos objeto de valorización, operando durante un periodo de más de 300 días.

Aunque no se observaron problemas significativos al trabajar con las tres recetas ensayadas durante la fase de operación, cabe destacar que fue necesario incrementar

el contenido en agua para poder hacer una mezcla bombeable. En el caso de una operación a escala industrial, es necesario disponer de un buen sistema de recirculación de corriente líquida para disminuir la entrada de agua fresca.

Se ha podido comprobar que el uso de co-sustratos mejora la operación del digestor, de forma que aumenta la cantidad de metano obtenido. El tratamiento de una corriente sólo de pollinaza da lugar a una mayor liberación de compuestos amoniacales, lo que conduce a una ligera inhibición de la fase metanogénica.

La degradación de la materia orgánica se evaluó también en términos de degradación de sólidos volátiles, y se pudo comprobar que en la Etapa 1 y Etapa 3 los valores se mantuvieron en 60 % y 66 %, disminuyendo en la Etapa 2 a 46 %.

Se ha conseguido obtener un biogás con un porcentaje de CH_4 superior al 65% en la Etapa 1 y Etapa 3 de operación, siendo ligeramente más bajo en la Etapa 2.

9 Anexos

9.1. Referencias

[1] Flotats, X., & Fernández, B. (2008). Tratamiento anaerobio de residuos de la industria alimentaria.

[2] Ripley, L. E., Boyle, W. C., & Converse, J. C. (1986). Improved alkalimetric monitoring for anaerobic digestion of high-strength wastes. *Journal (Water Pollution Control Federation)*, 406-411.

Responsable de Bioenergía
monica.figueroa@energylab.es

Edificio CITEXVI

Fonte das Abelleiras, s/n. 36310, Vigo.

T_986 12 04 50 F_986 12 04 51

EnergyLab@ EnergyLab.es

http://www.EnergyLab.es/

R 10.7_v03

Informe de viabilidad técnico-económica del proceso de digestión anaerobia con pollinaza

Índice

1 Modificaciones 1

2 Introducción y objeto 2

3 Residuos en la región 3

3.1. Residuos avícolas 3

3.2. Residuos agrarios 4

4 Consumo energético de la granja objeto de estudio 5

4.1.1. Energía térmica consumida 6

4.1.2. Energía eléctrica consumida 6

5 Análisis técnico-económico 7

5.1.1. Análisis de costes 9

5.1.2. Análisis de beneficios 13

5.1.3. Plan de viabilidad económica 13

6 Conclusiones 18

7 Anexo – Lista de referencias 20

7.1. Índice de tablas 20

7.2. Índice de figuras 20

7.3. Índice de referencias 20

1 Modificaciones

Fecha	Versión	Aclaraciones
02/09/2024	V00	

2 Introducción y objeto

El proyecto APROAVI pretende aplicar los criterios de economía circular mediante **la gestión y tratamiento sostenibles** de las **deyecciones** generadas en el **sector avícola**, mejorando así la competitividad y sostenibilidad de dicho sector promoviendo la obtención y uso de **energía renovable**, así como de fertilizantes aditivados. Para todo ello se evaluarán dos alternativas tecnológicas. Por un lado, se llevará a cabo la **digestión anaerobia** de la pollinaza mezclada con residuos agrícolas mayoritarios de la zona de estudio, con objeto de maximizar la generación de biogás y la obtención de **fertilizantes** en forma de **digestato** anaerobio. Por otro lado, se evaluará el uso de la pollinaza como biocombustible en un proceso de **pirólisis**, en el que además de un **gas con poder calorífico se generará biochar**. En una última etapa del proyecto se estudiará y comparará la capacidad fertilizante tanto de la pollinaza como del **digestato anaerobio y el biochar mediante pruebas de valorización agronómica en el campo**.

Tanto en el proceso de digestión anaerobia como en el de pirólisis se acometerá un **estudio de la viabilidad técnico-económica** de ambos procesos en la explotación avícola participante en el proyecto, analizando los consumos térmicos y eléctricos y analizando los posibles usos de la energía obtenida con los procesos propuestos.

En el presente informe se incluyen los **resultados del estudio técnico-económico** llevado a cabo sobre el proceso de digestión anaerobia empleando pollinaza como residuo mayoritario.

3 Residuos en la región

3.1. Residuos avícolas

En el marco del proyecto APROAVI se realizó una evaluación de la disponibilidad de residuos avícolas.

El sector avícola está basado principalmente en la ganadería de gallinas, y se divide en el subsector de **avícola de puesta** y el de **avícola de carne**.

En el caso de avícola de puesta, la adaptación del sector a la normativa de bienestar animal en el año 2012 supuso una reconversión del sector productor, polarizado en dos modelos de producción: por una parte, unas explotaciones industriales de gran dimensión que alojan las gallinas ponedoras, y por otra un número creciente de explotaciones de carácter alternativo (ecológico y campero).

En Galicia, existen en torno a 6.700 explotaciones, pero muchas de ellas son de autoconsumo. De manera general, las explotaciones más abundantes son **las granjas de producción para carne**. En la provincia de Ourense había registradas un total de 655 explotaciones, con 381 con más de 2 UGT.

La capacidad de estas granjas permitirá establecer el volumen máximo de animales en su interior (Tabla 1)

Tabla 1. Capacidad de las explotaciones en Galicia (año 2020)

	A Coruña (nº)	Lugo (nº)	Ourense (nº)	Pontevedra (nº)	Galicia (nº)
Cría para carne	33.824	229.926	61.070	816.989	**1.141.809**
Cría para huevos	0	189.841	198.496	1.279.718	**1.668.055**
Multiplicación para carne	0	257.601	598.311	38.000	**893.912**
Multiplicación para huevos	0	0	270.760	0	**270.760**
Producción para carne	1.515.123	4.407.728	8.771.782	5.262.802	**19.957.435**
Producción para huevos campera	321.851	218.060	0	86.949	**626.860**
Producción para huevos en jaula	78.903	911.668	40.976	215.482	**1.247.029**
Producción para huevos ecológica	65.482	33.346	0	36.528	**135.356**
Selección para carne	0	0	0	0	**0**
Incubadoras	0	135.000	591.600	0	**726.600**
Total (nº aves)	**2.015.183**	**6.383.170**	**10.532.995**	**7.736.468**	**26.667.816**

Por lo tanto, en **Galicia**, si todas las explotaciones trabajasen en el máximo de su capacidad (plazas), podría haber más de 26,6 millones de efectivos, con más de 20 millones dedicados a la cría y producción de carne y más de 2 millones dedicados a la

producción de huevos. En el caso de **Ourense** habría más de **10,5 millones.** En 2020, el censo indicaba la existencia de 24,8 millones de efectivos

Según la tipología de explotación, se producen deyecciones con características diferentes. En algunos casos se recoge directamente de los cubículos de las aves mediante cintas transportadoras, mientras que, en otros casos, debe ser recogida del suelo y viene mezclada con materiales como el serrín o la cáscara de arroz usada como cama (yacija).



Figura 1. Explotaciones avícolas

El sector avícola no suele disponer de terrenos propios para la gestión de las deyecciones, por lo que depende de la demanda de los agricultores de las zonas próximas y puede suponer un grave problema de gestión.

Las estimaciones realizadas indican que en Galicia se podrían producir más de 480 millones de toneladas anuales, con 195 millones en la provincia de Ourense. Teniendo en cuenta las explotaciones en las comarcas de A Limia y A Baixa Limia, se ha establecido una aproximación de la generación de residuos en ambas comarcas y en Ourense, tal como se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2. Generación de residuos de las explotaciones

	Capacidad (nº aves)	Generación (t/a)
A Limia	5.170.595	93.070,7
A Baixa Limia	790.187	14.223,4

3.2. Residuos agrarios

Tal como se comentó en los informes anteriores, el uso de co-sustratos es necesario para mejorar el proceso de digestión anaerobia de la pollinaza. Por lo tanto, se van a considerar las producciones estimadas de los principales cultivos en las comarcas de A Limia y A Baixa Limia, estableciendo una aproximación de los principales residuos en ambas comarcas. En la Tabla 3 se presentan los resultados de generación de residuos de los cultivos principales de la comarca de A Limia.

Tabla 3. Producción de cultivo y generación de residuos A Limia

Tipo	Producto	Producción (t/a)	Residuos (t/a)
Cerealeros	Maíz grano	488	708
	Trigo	17.941	8.971
Tubérculos	Patata	55.259	3.316
Resto de hortalizas	Hortícolas	5.037	302
	Residuos totales		13.297

En la Tabla 4 se presentan los residuos asociados a los principales cultivos de la comarca de A Baixa Limia.

Tabla 4. Producción de cultivo y generación de residuos A Baixa Limia

Tipo	Producto	Producción (t/a)	Residuos (t/a)
Cerealeros	Maíz grano	1.036	1.502
	Trigo	46	23
Tubérculos	Patata	3.140	188
Resto de hortalizas	Hortícolas	1.875	113
	Residuos totales		1.826

En la comarca de A Limia destaca la generación de residuos asociados al cultivo de trigo y en A Baixa Limia los residuos asociados al maíz en grano, pero teniendo en cuenta que presentan un contenido en humedad más bajo que el resto de los residuos, no sería el más adecuado para ser empleado como co-sustrato con pollinaza. Por lo tanto, los residuos más interesantes serían los asociados a la patata y a las hortalizas.

Los mayores volúmenes vendrán dados por patatas no comerciales, que no tienen el tamaño comercial que va desde 40 mm hasta 85 mm, cortadas, con defectos, etc.

4 Consumo energético de la granja objeto de estudio

Las granjas avícolas requieren de energía para proveer el máximo confort térmico, calidad del aire y luminosidad adecuada para las aves en las distintas etapas de su desarrollo, independientemente de las condiciones climáticas externas. Las condiciones ambientales apropiadas en el interior del galpón inciden favorablemente en la genética de las camadas, permitiendo obtener un mayor rendimiento en términos del factor de conversión de alimento que relaciona la cantidad de alimento suministrado en el animal con la ganancia de peso producto de esa ingesta.

En general, dentro de una granja avícola **el consumo energético se basa en energía eléctrica y térmica**, siendo la iluminación, la humedad relativa y la temperatura factores claves que han de mantenerse para la maximización del proceso productivo.

Las granjas de broilers o pollos de engorde como es el caso de la estudiada, consumen energía para calefacción (combustibles fósiles o biomasa), ventilación y motores y por último iluminación (en los dos últimos casos mediante energía eléctrica).

4.1.1. Energía térmica consumida

En el caso que nos ocupa, la calefacción se aporta mediante un turbo gas de 50 kW de potencia térmica en el que se combustiona directamente el propano.

Con los datos proporcionados por la granja participante en el proyecto se establecerán los consumos térmicos de la granja en kWh/año así como los costes asociados a dicho consumo. En la siguiente tabla se muestra el consumo promedio anual calculado a partir de diciembre de 2020 hasta abril de 2024.

Tabla 5. Energía térmica

	Promedio años 2021-2024
Propano (kg/año)	6.603,60
Coste anual (€/año)	8.740,52
Energía consumida (kWh/año)	85.052,70

El coste de los combustibles fósiles ha sufrido un gran aumento en los últimos años y se prevé que esta tendencia continúe. Según el BOE, el precio estipulado para el propano en el mes de Julio de 2024 ha sido aproximadamente 1,103 €/kg. Teniendo en cuenta el coste asociado al transporte y a la reposición del depósito (con un coste promedio de un 20% sobre la factura del propano) el precio asciende hasta 1,32 €/kg, valor que coincide con el importe promedio pagado por la granja durante el último año. Esto asociado al consumo de la granja avícola se traduce en unos costes de 8.740,52 €.

4.1.2. Energía eléctrica consumida

El consumo eléctrico de la granja de pollos de engorde se debe principalmente al uso de ventiladores, motores y a la iluminación. En los últimos años se ha optado por ventilación natural con el objetivo de reducir el consumo, lo que ha obtenido excelentes resultados.

Se ha analizado el consumo eléctrico de la granja durante el último año y se ha observado cierta variabilidad en función a la temperatura exterior y al número de camadas. En la siguiente ilustración se muestran los consumos mensuales a lo largo del último año

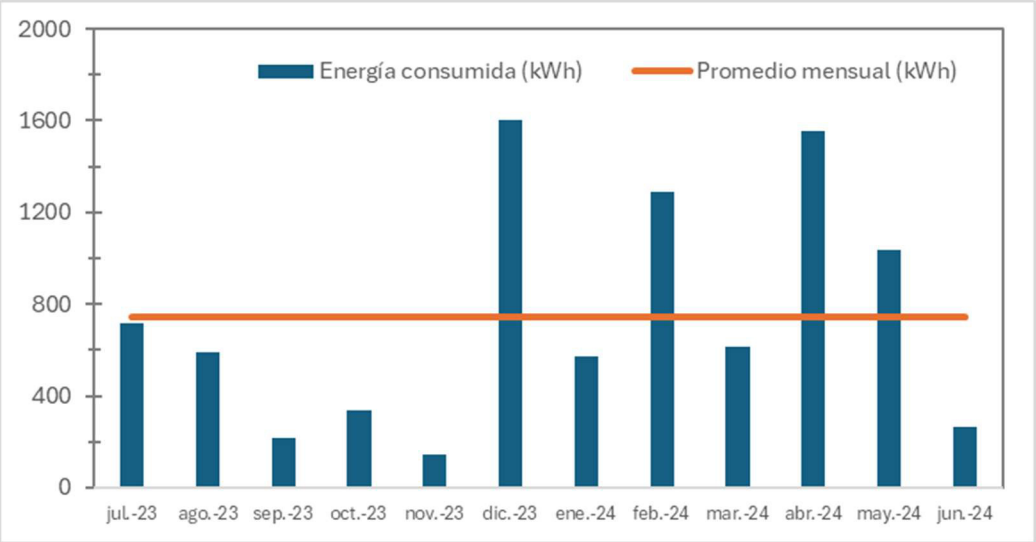


Figura 2. Consumo eléctrico desde julio del 2023 hasta junio del 2024

En la Figura 2, destaca la diferencia en el consumo entre unos meses y otros, habiendo una diferencia de más de 1.000 kWh. El consumo promedio mensual es de 745 kWh y el consumo total anual ha sido de 8.941 kWh. Según el ministerio de Turismo e Industria el coste promedio del kWh durante el año 2023 (incluyendo impuestos ha sido de 0,212 €/kWh, lo que se traducen un gasto anual de 1.895,49 €.

5 Análisis técnico-económico

El modelo de negocios adecuado para un proyecto de biogás debe asegurar, en la medida de lo posible, la valorización de todos sus productos. Por un lado, el aprovechamiento del biogás, y por el otro, el digestato generado.

El **biogás** se obtiene en una planta de **digestión anaerobia**, donde tiene un proceso biológico en ausencia de oxígeno. En este proceso, parte de la materia orgánica de los residuos se transforma, por la acción de los microorganismos, por un lado, en una mezcla de gases (biogás), constituido principalmente por metano y dióxido de carbono y, por otro, en digestato.

La producción de biogás es una **tecnología madura**, ampliamente utilizada para el tratamiento de residuos de granja, capaz de adaptarse a las necesidades y condiciones de proyectos a pequeña escala.

El tipo de planta de biogás adecuado para estos casos son las de autoconsumo o “smallbiogas”, personalizadas, a escala y modulares.

Estas plantas de biogás presentan ciertas particularidades y tres enfoques diferentes de presentación:

- **Auto-construcción**: se trata de plantas de biogás de baja tecnología que se utilizan fundamentalmente en el sector agrícola. Los costes de inversión,

operación y gestión necesarios para este tipo de plantas son mínimos, pero también resultan menos eficientes.

- **Plantas de biogás estándar a pequeña escala**: se trata de soluciones comerciales consistentes en plantas contenerizadas, transportadas e instaladas *in situ* de forma rápida, o en pequeñas plantas entregadas y listas para ser usadas. En estos casos, los costes de inversión son de tipo medio al tratarse de soluciones estandarizadas.

- **Plantas de biogás a escala reducida**: estas son soluciones a pequeña escala, donde **se puede optimizar la instalación** contenerizando parte de la misma y disminuyendo el tiempo de trabajo para su construcción y puesta en marcha. **La opción tecnológica será la adecuada a cada caso teniendo en cuenta las condiciones particulares donde se instale** (tipo de residuo, destino final de la energía producida, etc.). Los periodos de amortización de este tipo de plantas de biogás son similares a los de las plantas de mayor escala (5-8 años).

En este caso, se van a calcular los costes de inversión, partiendo de la base de que se tiene una **planta de biogás a escala reducida**.

Desde el **punto de vista técnico**, los usos del biogás pueden ser diversos, y no excluyentes entre sí:

- **Térmico**. Uso del biogás como fuente generadora de calor para autoconsumo de la propia instalación en hornos, estufas, secadoras, calderas u otros sistemas de combustión. Esta aplicación es menos frecuente, y su uso estará limitado a pequeñas plantas de biogás.

- **Cogeneración.** La mayoría de los digestores anaerobios o plantas de biogás están conectadas a motores de gas, y pueden producir calor, energía o son plantas combinadas de calor y energía eléctrica (Combined Heat and Power generation, CHP). A partir de los motores de CHP se obtienen unos rendimientos en energía eléctrica de entre 35-40% y en energía térmica entre 30-40%. La electricidad generada a partir del motor CHP puede utilizarse para autoconsumo de la instalación o a nivel comercial (inyectándola directamente en la red eléctrica local). El calor se recupera del flujo de escape del motor CHP para convertirlo en energía térmica útil que podrá destinarse a diversos usos, generalmente de autoconsumo de la instalación (calefacción, agua caliente sanitaria, secado, producción de frío, etc.).

- **Upgrading a biometano**. Mediante la técnica conocida como upgrading se logra una concentración y purificación del metano del biogás con el fin de aumentar su proporción, convirtiéndolo en biometano, un producto muy similar en composición, características, posibilidad de usos y potencial energética al gas natural. El biometano se transporta y almacena utilizando los mismos sistemas que el gas natural, sea la red de gasoductos o como gas licuado, o empleándolo directamente como combustible de vehículos.

La **producción de biometano** está cobrando cada vez mayor importancia, ya que:

- Reduce la dependencia energética de combustibles fósiles de origen foráneo.
- Se integra directamente en la red de gas natural, aprovechando la infraestructura existente y es fácilmente almacenable para aplicaciones de movilidad.
- Fomenta una economía circular.

La **producción** y uso generalizado y deslocalizada de **biometano** desempeñará un papel fundamental en la transición hacia un modelo energético sostenible con bajas emisiones de carbono, y transformará sectores como la agricultura o la ganadería. Es por esto, que se va a analizar esta **opción de aprovechamiento**.

El **digestato** como subproducto obtenido tras la digestión anaerobia de la materia orgánica puede tener diferentes usos en función de su origen, tratamiento o valorización posterior.

La fracción sólida se puede utilizar para secar o para hacer compost. Mientras que la fracción líquida se puede someter a procesos de recuperación de nutrientes para obtener, por ejemplo, sulfato/nitrato de amonio o estruvita. Se puede evaporar o filtrar para lograr una concentración de nutrientes o directamente eliminarlos, aplicando un proceso de nitrificación-desnitrificación.

Todo ello con diferentes usos, en el ámbito agronómico, como enmiendas orgánicas para mejorar la estructura del suelo, para el regadío de cultivos, para generar otros productos agronómicos de valor añadido. En el ámbito industrial, para la producción de productos químicos e incluso la producción de bioplásticos. En el ámbito de la energía para generar calor.

En cualquier caso, el uso del digestato debe estar en línea con las regulaciones y normativas, ya que su aplicación debe cumplir con los estándares de calidad y protección ambiental. Para este caso, en particular, se va a la posibilidad de aprovechamiento como **fertilizante**.

5.1.1. Análisis de costes

5.1.1.1. COSTES DE INVERSIÓN

En general, los **costes de inversión** para las plantas de biogás se pueden dividir en tres grupos, dependiendo de su naturaleza:

- Inversiones relacionadas con la obra civil
- Inversiones de equipos y material
- Inversiones relacionadas con la conversión de biogás y las redes de distribución del calor producido.

En la siguiente tabla se muestran los principales costes de inversión en plantas convencionales de digestión anaerobia tipo CSTR y su porcentaje con respecto al coste total[1].

Tabla 6. Distribución de costes de inversión en plantas de biogás

Ítem	100 kW	500 kW	1000 kW
Obras civiles (%)	30-35	37-45	43-50
Maquinarias y equipos (%)	9-12	9-12	8-10
Electrotecnia y control (%)	10-12	3-5	2-3
Grupo Electrógeno (%)	33-38	28-33	25-30
Otros (%)	12-15	13-15	12-15

La construcción de una planta de biogás implica una inversión inicial significativa. Estos costes incluyen la adquisición de equipos especializados, como digestores anaeróbicos, sistemas de recolección de residuos y sistemas de purificación de biogás. Sin embargo, es importante destacar que los avances tecnológicos y las economías de escala han permitido una reducción en los costes de construcción en los últimos años, en particular si la intención es la generación de electricidad, por lo que proyectos más pequeños podrían presentar mayores dificultades para ser rentables ya que suponen costes de inversión más elevados[1] (Figura 3).

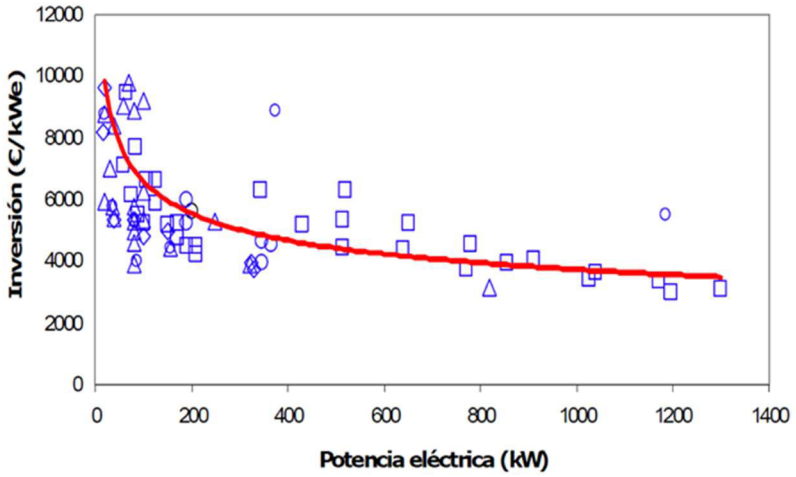


Figura 3. Economía de escala en plantas de digestión anaerobia convencionales

Cuando se trata de plantas grandes, se recomienda que el productor tenga un suministro de residuos asegurado y que el radio de suministro de los sustratos no sobrepase los 30 km para minimizar los gastos de transporte.

En el caso de las plantas de tamaño pequeño, la posibilidad de ingresos mediante venta ya sea de energía o de digestato, pueden resultar más limitada y los periodos de amortización resultarán mayores.

Para el aprovechamiento del biogás existen diversos métodos, sin embargo, se ha optado por considerar un sistema de purificación de biogás para tener biometano. La principal ventaja del biometano frente al biogás es que ofrece una enorme flexibilidad al ser equiparable al gas natural, lo que le permite acceder y descarbonizar sectores de difícil electrificación, como sería el caso de la granja.

El desarrollo de las tecnologías de purificación ha sido significativo en los últimos 5-10 años, en los que se ha pasado del uso de 2 técnicas de purificación (absorción con agua y PSA) en la mayoría de las instalaciones, a que en este momento compitan 5 (absorción con agua, absorción con Genosorb®, absorción con aminas, PSA, membranas), y se espera que en unos pocos años también se haga un hueco la criogenia puesto que es la mejor opción si se quiere obtener biometano líquido, aunque todavía se tienen que resolver los problemas actuales.

La correcta selección de las etapas de limpieza y purificación del biogás se basa en la técnica de eliminación de CO_2 escogida, así como en conocer la composición química del biogás a limpiar (conocer la concentración de los contaminantes presentes). La evaluación de las incompatibilidades entre procesos sirve para asegurar que se cumple con las especificaciones de calidad con el mínimo de etapas necesarias.

Los costes específicos de inversión para todas las técnicas son similares, situándose en torno a los 2.000 €/Nm^3/h para las instalaciones con capacidades de producción mayores de 1.000 Nm^3/h. En el caso de las instalaciones más pequeñas el coste específico aumenta considerablemente por lo que es necesario considerar la economía de escala durante la planificación de las nuevas instalaciones. Se han encontrado **soluciones modulares para caudales pequeños** con flujo de gas de **100 Nm^3/h**[2]. Este va a ser el caudal mínimo, que se va a considerar técnicamente viable para utilizar un proceso de upgrading de biogás para obtener biometano. Con este sistema, cuya tecnología es la separación por membranas, se obtiene una eficacia del ≥99,5% y tiene un consumo eléctrico de 0,26 kWh/Nm^3 de biogás bruto.

5.1.1.2. COSTES DE OPERACIÓN

Los aspectos más importantes a considerar respecto a los costes de operación de una planta de tratamiento como la considerada, corresponden a[3]:

- costes asociados al sustrato
- energía utilizada por la planta
- personal
- disposición de residuos
- insumos de operación
- utilización del biogás

En general, los proyectos de biogás se basan en la utilización de un **sustrato** residual. De esta forma, no se consideran costes asociados a su uso, sino que pueden considerarse ingresos por concepto de disposición y tratamiento de residuos. De estos ingresos deben deducirse los costes incurridos en la recolección del sustrato y su transporte desde su origen a la planta.

La **energía utilizada** por la planta dependerá de su grado de automatización, de las tecnologías seleccionadas, fundamentalmente para los agitadores y bombas; y del pretratamiento de los sustratos en plantas industriales. De acuerdo a la experiencia recopilada en las plantas de biogás existentes en Europa, especialmente en Alemania, se considera que la demanda eléctrica del proceso fluctúa entre el 5% y 15% de la producción de energía de la planta. La demanda de energía térmica para calefacción

dependerá de las condiciones climáticas del sitio de emplazamiento de la planta, del tipo de sistema de biodigestión y del aislamiento térmico utilizado. Esta demanda puede alcanzar valores entre un 10% y 35% de la energía térmica producida.

En el caso de la **purificación**, el consumo energético de las instalaciones es bastante similar entre las diferentes opciones, situándose en torno a 0,20-0,30 kWh/Nm^3 de biogás. Los costes específicos de la purificación oscilan entre 0,9 y 2,5 c€/kWh de gas producto en función de la capacidad de purificación, siendo aún mayores para las instalaciones pequeñas (< 250 Nm3 /h)[4].

En el tema del coste el **personal** y de acuerdo a la experiencia europea, para una planta de 500 kW se necesita una persona con nivel técnico en jornada completa más un ayudante en jornada completa a parcial. En general, puede considerarse una dedicación entre 2.000 a 3.000 horas/hombre por año, dependiendo del grado de automatización de la planta y la frecuencia de recepción de sustratos y de disposición de digestato[1].

En cuanto a los **insumos**, el coste estaría directamente relacionado, por ejemplo, con el consumo de polímeros para la deshidratación del digestato. Otros insumos necesarios están relacionados con el proceso de acondicionamiento/limpieza del biogás. La corriente de biogás obtenida deberá ser sometida a estos procesos para reducir la cantidad de vapor de agua, partículas, ácido sulfhídrico, siloxanos y/o compuestos orgánicos volátiles. El sistema de tratamiento dependerá de los contaminantes iniciales y de su uso final. Generalmente, para el uso directo del gas en calderas para producción de calor se necesita un tratamiento mínimo, mientras que, para su aprovechamiento en un motor de cogeneración o su valorización en sistemas de generación de gas renovable, se necesita un tratamiento más exhaustivo. Algunos sistemas de tratamiento de este biogás emplean adsorción con carbón activo u otros materiales similares o bien se pueden usar sales férricas en el digestor para atenuar la formación de ácido sulfhídrico.

A continuación, se muestra una tabla resumen de los principales costes asociados:

Tabla 7. Resumen de costes de operación para una planta de 500 kW[1]

Ítem	Rango	Notas
Consumo de electricidad (en % de la energía total generada)	5-10	Dependiente del tipo y cantidad de equipamiento instalado (agitadores, bombas,etc)
Consumo de calor (en % de la energía total generada)	20-40	Dependiente fundamentalmente de las condiciones climáticas de la zona y del sistema de biodigestión
Mano de obra (hh/año)	2.000-3.000	Depende del grado de automatización de la planta, frecuencia de recepción de sustrato y de disposición de digestato, necesidad de pretratamiento…
Sustrato	Determinar en cada caso	Considerar usos alternativos, eventuales costes de transporte a la planta o ingresos por disposición de residuos industriales
Disposición del digestato	Determinar en cada caso	Depende de su posible venta como fertilizantes o mejorador de suelos. Debe cotizarse con empresas de residuos locales

5.1.2. Análisis de beneficios

Entre las **ventajas** que presenta la producción de biogás, destacan, en este caso, el beneficio económico por la **venta de biometano**, la disminución de residuos orgánicos potencialmente contaminantes y la reducción de las emisiones de dióxido de carbono a la atmósfera.

En cuanto al **digestato**, como subproducto obtenido tras la digestión anaerobia de la materia orgánica, puede tener los siguientes usos en función de su origen, tratamiento o valorización posterior, pero se va a considerar que se utiliza como **fertilizante**.

5.1.3. Plan de viabilidad económica

Para poder hacer el plan de viabilidad económica de la planta, es preciso calcular en la cantidad de biogás generado. En los apartados anteriores, se ha visto que para que el proyecto sea técnicamente viable, se deben producir al menos **100 Nm^3/h**.

En la granja se generan anualmente unos **247,5 m^3 de pollinaza** con una densidad aproximada de 800 kg/m^3, que son el resultado de considerar 45 m^3 de estiércol de media, con cada camada.

Además de emplear pollinaza, se van a añadir **otros residuos hortícolas** de la zona en una proporción equivalente a la estudiada en la fase de ensayos. Los resultados se muestran en la Tabla 8.

Tabla 8. Mezcla empleada en el estudio y producción de biogás

Receta		Mezcla 3
Proporción	Pollinaza (%)	18,25
	Patata (%)	5,69
	Restos hortícolas (%)	1,51
Proporción	Pollinaza (t/a)	198,0
	Patata (t/a)	61,7
	Restos hortícolas (t/a)	16,4
Potencial de la mezcla (m^3 CH_4/t)		14,0
Producción de biogás		
Biogás producido (Nm^3/h)		2,9

Por lo tanto, la **cantidad de residuo no sería suficiente para garantizar la viabilidad** del sistema de purificación.

Dado que los residuos de la granja no son suficientes, se propone un escenario, en el cual, empleando residuos cercanos de la comarca, se garantice que no se superan los radios de suministro y se genere el objetivo fijado de producción de biogás que, en este caso, será de al menos **100 Nm^3/h**.

Las cantidades de los residuos que se van a considerar, se muestran en la tabla siguiente y suponen un **9% de los residuos de Limia**.

Tabla 9. Producción de biogás

Receta		Mezcla 3
Proporción	**Pollinaza (t/a)**	9.656,5
	Patata (t/a)	252,0
	Restos hortícolas (t/a)	35,2
Potencial de la mezcla (m^3 CH_4/t)		14,0
Producción de biogás		
Biogás producido (Nm^3/h)		100,3

Con estos valores se va a evaluar la rentabilidad económica del sistema, para ello se analizan, tanto las inversiones y gastos que la planta ocasionará, como los ingresos que se prevén obtener.

Los **datos generales** de la planta se recogen en la siguiente tabla:

Tabla 10.Principales datos de proceso

DATOS GENERALES DEL PROCESO		
Tipología de residuo	**Mezcla residuos**	Pollinaza + Hortícola
Cantidad de residuos introducidos en el digestor	9.929,3	t/a
Energía térmica requerida para el calentamiento del digestor anaerobio	59,9	kWh/h
Caudal medio de biogás producido	100,3	Nm^3 biogás/h
Producción de digestato fertilizante	9.780,5	t/a

Los datos correspondientes a la **inversión inicial** del proyecto incluyen el equipamiento de la planta de biogás (bombas, sistema de agitación y calentamiento, depósitos, etc) y los equipos de valorización de biogás (que abarca un sistema de limpieza del biogás con carbón activo para retirar partículas y humedad, y el sistema de purificación).

Tabla 11. Datos relativos a la inversión inicial

INVERSIÓN		
Planta de biogás	1.558.421	€
Equipo para valorización de biogás	250.750	€
Otras inversiones	-	€
TOTAL	**1.809.171**	**€**

En cuanto a los **ingresos** se puede considerar que estos proceden de las siguientes fuentes3:

- Ahorro de energía y venta de biometano: En este caso, los ingresos son derivados del ahorro de la energía autoconsumida proveniente de la utilización de biogás en una caldera y la venta de biometano.
- Ahorro de fertilizante: Como se ha comentado, se produce una fracción sólida (que permite obtener compost) y una líquida (rica en nitrógeno y fósforo), en la que ambas tienen características de alto valor fertilizante y de mejorador de suelos cuando se aplica en los cultivos. Por lo tanto, si se sustituye el fertilizante mineral por este fertilizante procedente de la planta de digestión anaerobia, se puede conseguir un ahorro en los costes de fertilización.

En este caso, para el cálculo de los ingresos, se van a considerar los siguientes precios como hipótesis:

Tabla 12. Hipótesis para el cálculo de los ingresos

Hipótesis cálculo de ingresos	Valor	Unidades
Precio digestato (ahorro de fertilizante)	8	€/kg
Precio biometano	0,71	€/kWh

Los resultados se muestran a continuación:

Tabla 13. Datos relativos a los ingresos anuales

INGRESOS		
Venta de biometano	321.954	€/año
Ahorro de energía	8.741	€/año
Ahorro por el uso de digerido	78	€/año
TOTAL	**330.773**	**€/año**

Los **gastos** asociados a la planta incluyen[3]:

- Costes de explotación asociados a la operación y mantenimiento de la planta. Destinados principalmente a la electricidad y repuestos de equipos.
- Costes de mano de obra asociado al personal que opera la planta. No se considera una nueva contratación, sino destinar una pequeña fracción del tiempo de trabajo a las tareas de supervisión
- Costes de logística asociado al transporte y manejo de residuos; a la carga y descarga de sustratos, o al almacenamiento del fertilizante generado.
- Otros costes adicionales no incluidos en los puntos anteriores, como puede ser material de protección del personal, o para la realización de analíticas.
- Costes de purificación.

En este caso, para el cálculo de los costes de operación se van a considerar las siguientes hipótesis:

Tabla 14. Hipótesis para el cálculo de los costes de operación

Hipótesis cálculo de costes	Valor	Unidades
Gastos de explotación como porcentaje de ventas	5	%
Uso de la mano de obra	0,002	h/t·d
Coste de la mano de obra	15	€/h
Nº días trabajados al año	258	jornadas
Coste de logística	1	€/t
Coste de purificación	1	c€/kWh

Los resultados obtenidos son los siguientes:

Tabla 15. Datos relativos a los gastos anuales

GASTOS		
Explotación	16.539	€/año
Mano de obra	76.854	€/año
Logística	9.929	€/año
Otros costes	1.654	€/año
Purificación	52.507	€/año
TOTAL	**157.482**	€/año

A continuación, se va a proceder a analizar el **estudio financiero**. En este estudio financiero se tomarán las siguientes hipótesis:

- Porcentaje aportado por subvención: 0%
- Porcentaje correspondiente a fondos propios: 20%
- Porcentaje de deuda o préstamo: 80%
- Tipo de interés del préstamo: 3%

Esto da lugar a los siguientes valores:

Tabla 16. Datos relativos a la financiación

FINANCIACIÓN		
Subvenciones	0	€
Fondos propios	361.834	€
Préstamo	1.447.337	€
TOTAL	1.809.171	€

Los **indicadores económicos** se calculan de la siguiente manera[3]:

- Beneficio bruto de explotación o beneficio antes de intereses, impuestos, depreciaciones y amortizaciones (EBITDA): Se corresponde con la diferencia entre los ingresos y los gastos anuales, es decir el flujo de caja.
- Valor actual neto (VAN): Valor de los flujos de caja esperados a lo largo de la vida del proyecto (“n” años) y actualizados al momento del inicio del proyecto.

Se ha utilizado como tasa de actualización el "coeficiente de descuento" (t). Un valor con signo positivo del VAN, implica que el proyecto genera valor.

$$VAN = -Inversión + \sum_{t=1}^{n} \frac{FlujosCaja}{(1+t)^n}$$

- Índice de enriquecimiento (VAN/inversión inicial) o *Profitability Index* (PI): Se calcula como la relación entre el VAN y la inversión inicial (fondos propios más préstamo). Si este valor es mayor de cero, será indicativo de rentabilidad de la inversión para toda la vida del proyecto.
- Tasa interna de retorno (TIR): Es la tasa de descuento con la que el VAN es igual a cero. Se utiliza para decidir sobre la aceptación o no de un proyecto de inversión.
- Periodo de retorno o *Payback period*: Es el tiempo que se tarda en recuperar la inversión inicial. Se calcula como la relación entre el desembolso inicial (fondos propios más préstamo) y el EBITDA. Cuando el EBITDA tiene un valor con signo negativo o el tiempo de recuperación es mayor que la vida del proyecto, no se recuperaría la inversión antes que la vida útil del proyecto llegue a su fin.

$$PR = \frac{(FFPP + D)}{EBITDA}$$

Donde:
FFPP= fondos propios
D= deuda o préstamo
EBITDA= beneficio bruto de explotación o beneficio antes de intereses, impuestos, depreciaciones y amortizaciones

- Coeficiente de descuento (t) o *Weighted Average Cost of Capital* (WACC): Es la tasa de descuento que se utiliza para actualizar los flujos de caja esperados del proyecto de inversión durante la vida útil del proyecto. Este coeficiente es un promedio ponderado entre un coste (el coste de deuda o préstamo) y una rentabilidad exigida (Ke). Este coeficiente se utiliza para el cálculo del VAN y el TIR. A continuación se incluye la fórmula para el cálculo del coeficiente de descuento. En este cálculo se excluye la subvención.

$$WACC = Ke \cdot \frac{FFPP}{FFPP + D} + Kd \cdot (1 - T) \cdot \frac{D}{FFPP + D}$$

Siendo:
Ke= tipo de retorno sobre fondos propios
Kd=tasa de interés de la deuda o préstamo.
T=tasa de impuestos a las ganancias. Se incluyen los impuestos ya que tienen un beneficio fiscal. Como los intereses de la deuda son deducibles del impuesto de sociedades, se debe multiplicar "Kd" por uno menos la tasa impositiva para tener en cuenta el ahorro fiscal que ello conlleva.
FFPP=fondos propios
D=deuda o préstamo
Se van a considerar los siguientes valores:

  - Tipo de retorno sobre fondos propios (Ke)=12%
  - Tasa de interés de la deuda (Kd)=2,5%
  - Tasa impositiva (T)=25%

Los valores obtenidos se recogen en la siguiente tabla:

Tabla 17. Datos relativos a los indicadores económicos

INDICADORES ECONÓMICOS		
EBITDA	2.246.243,94	€/año
Valor actual neto (VAN)	766.276,88 €	€
Índice de enriquecimiento	0,42	
Tasa interna de retorno (TIR)	**28,90%**	%
Periodo de retorno	**8**	años
Coeficiente de descuento (WACC)	**3,50**	%

Según los indicadores económicos obtenidos, los valores de rentabilidad hacen que se necesiten **8 años** para empezar a recuperar la inversión realizada, lo que se corresponde con los resultados esperados para una **planta de biogás a escala reducida**, donde los periodos de amortización son entre 5 y 8 años.

6 Conclusiones

En el presente documento se ha llevado a cabo un **estudio de viabilidad técnico-económica** para la implantación de una planta de biogás con el objetivo de inyectar el biometano obtenido a la red de gas natural. La materia prima utilizada ha sido una mezcla de codigestión formada por **pollinaza y residuos hortofrutícolas** de la zona, en este caso, patatas, tomates y pimientos.

El uso de **procesos de codigestión**, donde se mezclan diferentes tipos de sustratos, han demostrado ser un método efectivo para equilibrar el balance de nutrientes y las características físico-químicas del sustrato. Esto permite una mejor estabilización del sistema y una mayor producción de biogás.

Con los residuos generados no era suficiente para alcanzar el tamaño mínimo viable y por eso se decidió ampliar la mezcla de residuos, empleando el **9% de residuos** similares de la zona de **Limia**, con el fin de conseguir un **caudal de generación de 100 Nm^3/h de biogás**.

Con este caudal, se procedió a realizar el **plan de viabilidad económica**, en el cual se consideró que el **biometano generado** se iba a emplear para **sustituir el propano** empleado la granja y el excedente se iba a **inyectar a red**.

En cuanto al **digestato** producido, consideró que se podría emplear como fertilizante y como consecuencia de ello, se produciría un **ahorro en los fertilizantes** que actualmente se están empleando en los terrenos colindantes.

Para completar el plan, en el **estudio financiero**, se supuso que no había ninguna subvención y que el 20% del dinero necesario para la inversión, procedía de fondos propios y el 80% de un crédito.

Con todo ello, el periodo de retorno de la inversión fue de **8 años**. Aunque es un retorno adecuado para una planta a escala reducida, es necesario el desarrollo de nuevas tecnologías de purificación que **resulten más sencillas y económicas**, **y que faciliten el uso del biometano y su inyección en la red gasista.**

Por último, en cuanto a la **viabilidad** de una planta de biogás, es esencial, no solo considerar los costes asociados tanto con su construcción como con su operación a largo plazo, sino algunos aspectos adicionales, entre los que se incluyen, evaluar la disponibilidad y calidad de la materia prima, los permisos y requisitos legales, la vida útil esperada de la planta, etc. Tener en cuenta estos factores puede ayudar a tomar una decisión informada y crear un modelo de negocio rentable. Para ello, se hacen una serie de recomendaciones a continuación:

- Realizar un diagnóstico inicial evaluando aspectos energéticos, medioambientales, logísticos, agrícolas, legislativos, etc. que influyan en el proyecto.
- Estudiar las características de los residuos y su disponibilidad.
- Realizar ensayos de determinación de potencial máximo de producción de biogás para residuos o mezcla de residuos de mayor importancia, para determinar la mezcla óptima que maximice la producción de biogás.
- Si procede, hacer una simulación del proceso de digestión a escala piloto con mezclas seleccionadas con el fin de hacer una evaluación de la carga orgánica óptima, el efecto de los pretratamientos, la calidad del biogás y el digestato, etc.
- Hacer una evaluación de la calidad del digestato y pruebas de aplicación, por ejemplo, en cultivos.

La inversión en una planta de biogás puede ser altamente beneficiosa desde diversas perspectivas. Los **beneficios económicos, socioambientales y energéticos son claros y significativos**. Además, la posibilidad de acceder a incentivos y subsidios gubernamentales podría aumentar aún más la rentabilidad de esta inversión. En general, invertir en una planta de biogás ofrece una oportunidad única para contribuir a la **sostenibilidad y promover un futuro energético más limpio**.

7 Anexo – Lista de referencias

7.1. Índice de tablas

Tabla 1. Capacidad de las explotaciones en Galicia (año 2020)..... 3
Tabla 2. Generación de residuos de las explotaciones..... 4
Tabla 3. Producción de cultivo y generación de residuos A Limia 5
Tabla 4. Producción de cultivo y generación de residuos A Baixa Limia..... 5
Tabla 5. Energía térmica 6
Tabla 6. Distribución de costes de inversión en plantas de biogás 10
Tabla 7. Resumen de costes de operación para una planta de 500 kW[1] 12
Tabla 8. Mezcla empleada en el estudio y producción de biogás 13
Tabla 9. Producción de biogás 14
Tabla 10.Principales datos de proceso.....14
Tabla 11. Datos relativos a la inversión inicial 14
Tabla 12. Hipótesis para el cálculo de los ingresos 15
Tabla 13. Datos relativos a los ingresos anuales.....15
Tabla 14. Hipótesis para el cálculo de los costes de operación 16
Tabla 15. Datos relativos a los gastos anuales.....16
Tabla 16. Datos relativos a la financiación 16
Tabla 17. Datos relativos a los indicadores económicos 18

7.2. Índice de figuras

Figura 1. Explotaciones avícolas..... 4
Figura 2. Consumo eléctrico desde julio del 2023 hasta junio del 2024..... 7
Figura 3. Economía de escala en plantas de digestión anaerobia convencionales.....10

7.3. Índice de referencias

[1] Guía de planificación para proyectos de biogás de Chile, 2012

[2] https://www.bright-renewables.com/es/soluciones/sistemas-de-gas-renovables/mejora-del-biog%C3%A1s/

[3] Small biogas. guía de uso del software e interpretación de resultados, 2014

[4] TFM: Evaluación de las tecnologías de purificación de biogás. Eloy Lanao Sisó, 2013



Área de Bioenergía

energylab@energylab.es

Edificio CITEXVI

Fonte das Abelleiras, s/n. 36310, Vigo.

T_986 12 04 50 F_986 12 04 51

energylab@energylab.es

www.energylab.es

09-2023

Informe sobre el proceso de secado

Índice

1 INTRODUCCIÓN Y OBJETO 3

2 EXPERIENCIAS DE SECADO 4

2.1. Recogida de pollinaza 4

2.2. Determinación del contenido de humedad de pollinaza 5

2.3. Estudio del proceso de secado natural 5

3 RESULTADOS 8

3.1. Condiciones climáticas en proceso de secado natural 8

3.2. Secado natural muestras pollinaza 10

4 CONCLUSIONES 11

1. Introducción y objeto

El proyecto APROAVI pretende aplicar los criterios de economía circular mediante **la gestión y tratamiento sostenibles** de las **deyecciones** generadas en el **sector avícola**, mejorando así la competitividad y sostenibilidad de dicho sector promoviendo la obtención y uso de **energía renovable**, así como de fertilizantes aditivados. Para todo ello se evaluarán dos alternativas tecnológicas. Por un lado, se llevará a cabo la **digestión anaerobia** de la pollinaza mezclada con residuos agrícolas mayoritarios de la zona de estudio, con objeto de maximizar la generación de biogás y la obtención de **fertilizantes** en forma de **digestato** anaerobio. Por otro lado, se evaluará el uso de la pollinaza como biocombustible en un proceso de **pirólisis**, en el que además de un **gas con poder calorífico se generará biochar**. En una última etapa del proyecto se estudiará y comparará la capacidad fertilizante tanto de la pollinaza como del **digestato anaerobio y el biochar mediante pruebas de valorización agronómica en el campo**.

En el contexto de la actividad 3 del proyecto con título “Producción de biochar mediante pirólisis” se hace fundamental el proceso de secado de la pollinaza. Normalmente, los estiércoles procedentes de plantas de producción avícola (pollinaza) presentan un **elevado contenido de humedad** (mayores al 50% en base seca), lo que plantea una serie de **problemas** en el acondicionado para su utilización **con fines energéticos**. Estas operaciones hacen posible obtener productos de mayor valor añadido, lo que posibilita la ampliación de su mercado y su consumo. No obstante, para que este acondicionamiento previo sea viable, es necesario que el incremento de valor del producto final compense los gastos de transformación del material. De esta forma, en función del tipo de aplicación a la que se destine, será necesario aplicar distintas etapas de transformación y acondicionado.

El secado natural se basa en aprovechar las condiciones ambientales favorables para facilitar la deshidratación de los residuos. En el secado al aire, la pollinaza se almacena en pilas a la intemperie o en cobertizos abiertos, de modo estén expuestos a la atmósfera ambiental para que tenga lugar el paso de la humedad de la pollinaza al aire. El movimiento del aire, causado por vientos o corrientes de convección locales, favorece tanto el aporte de calor necesario para producir la evaporación del agua de la pollinaza como el arrastre del vapor resultante de dicha evaporación lejos de la superficie de ésta. La velocidad de secado, y por consiguiente la duración de éste, depende grandemente de las **condiciones atmosféricas** que imperan en cada lugar. Aplicando ciertas técnicas se puede sacar el máximo provecho de dichas condiciones, consiguiendo un secado mucho más rápido y de mejor calidad.

En este informe se evalúa el efecto en el contenido de humedad de la pollinaza (deyección de pollo broiler mezclada con los restos de la cama de los animales) al ser sometida a un proceso de secado por oreo natural. Dicho proceso ha sido desarrollado en la granja de pollos de engorde **A Pendurada**, participante en el proyecto y situada en Lobios, Ourense.

2. Experiencias de secado

Se realizaron **dos experiencias** de secado por oreo natural en muestras de pollinaza con cama de viruta de pino obtenidas de dos de las tandas de producción de engorde de pollos coincidentes con los meses de entre **diciembre de 2022 y mayo de 2023** y de **junio de 2023 y septiembre de 2023**.

En ambos casos el proceso de secado natural se realizó sometiendo las muestras de pollinaza a la exposición directa a las condiciones climáticas presentes mediante su proceso de almacenado bajo cubierta en el estercolero de la industria avícola. Ambas pilas de pollinaza se volteaban cada 3 – 5 días de un modo manual.

A continuación, en la Figura 1 se muestra el estercolero de la granja objeto de estudio en el presente proyecto.



Figura 1. Estercolero de A Pendurada.

2.1. Recogida de pollinaza

Tras la retirada de los 15.000 pollos de la tanda de engorde, se procedió a la limpieza y recogida de la pollinaza resultante por medios mecánicos, para ser reubicada en el estercolero cubierto del que dispone la granja para almacenar la pollinaza.

2.2. Determinación del contenido de humedad de pollinaza

La humedad de las muestras se determinó periódicamente (tras cada volteo) en una estufa modelo Venticell Eco Line por desecación, sometiendo las muestras a una temperatura constante de 105ºC hasta alcanzar estado anhidro.

2.3. Estudio del proceso de secado natural

La pollinaza procedente de la explotación avícola se almacena en el estercolero hasta su aplicación como enmienda orgánica. El estercolero es una superficie cubierta y cerrada por muro de hormigón, presentando una base con film de polietileno Galga 700 (175 micras) para evitar posibles escorrentías de lixiviados de la pollinaza (estiércol).

Se formó una pila en forma de prisma triangular con unas dimensiones aproximadas de 1 x 1,5 x 6 metros (Figura 2), lo que determina un volumen de unos 3 m^3 de pollinaza y se expuso a las condiciones climáticas.

La primera pila (Figura 3 a Figura 5) se volteó de modo regular (cada 3 – 5 días aproximadamente) de un modo manual durante un periodo de 5 meses (Diciembre 2022/Mayo 2023), mientras que la segunda pila (Figura 6) se volteó del mismo modo durante 3 meses (Junio 2023/Septiembre 2023).

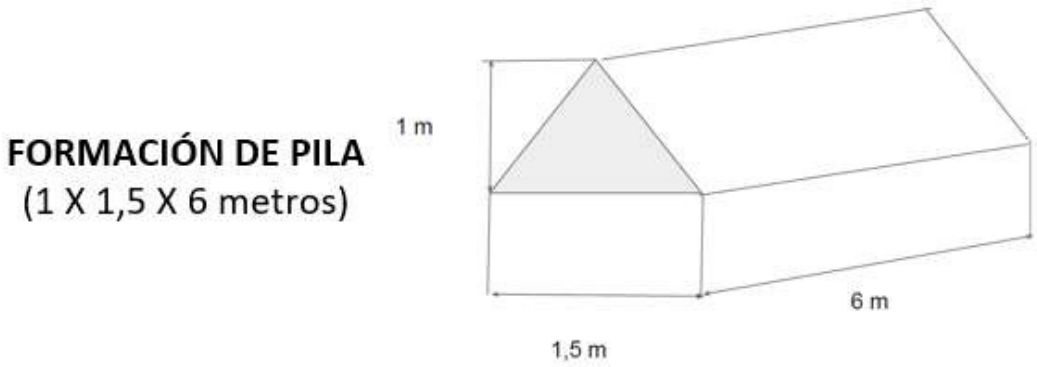


Figura 2. Formación de la pila de pollinaza.



Figura 3. Pila 1 de pollinaza formada en A Pendurada.



Figura 4. Pila 1 en proceso de volteo.



Figura 5. Pila 1 de pollinaza formada en A Pendurada.



Figura 6. Pila 2 de pollinaza formada en A Pendurada.

El estudio del secado fue llevado a cabo en colaboración con el centro tecnológico EnergyLab al cual el responsable de la granja envió muestras de pollinaza con cadencia regular para la evaluación del contenido de humedad, en concreto cada 10 - 15 días.

Para evaluar la interacción entre las condiciones climáticas presentes en el periodo de la experiencia se realizó un seguimiento de las condiciones mediante los datos obtenidos en la estación meteorológica más cercana de AEMET Agencia Estatal de Meteorología, en este caso Xinzo de Limia, ubicada a unos 44 km del lugar de realización de la experiencia de secado natural.

3. Resultados

3.1. Condiciones climáticas en proceso de secado natural

La primera experiencia de secado se realizó desde diciembre de 2022 hasta mayo del año siguiente (un total de 152 días). En este periodo las temperaturas medias diarias a 1,5 m oscilaron entre 0 – 18ºC aproximadamente (Figura 7). Las precipitaciones fueron bastante frecuentes, salvo en el mes de febrero, destaca el 19 de diciembre con 116 mm de precipitaciones acumuladas durante el día (Figura 7). Respecto al viento, su velocidad media a 10 m llegó a valores de hasta 31 km/h (Figura 8).

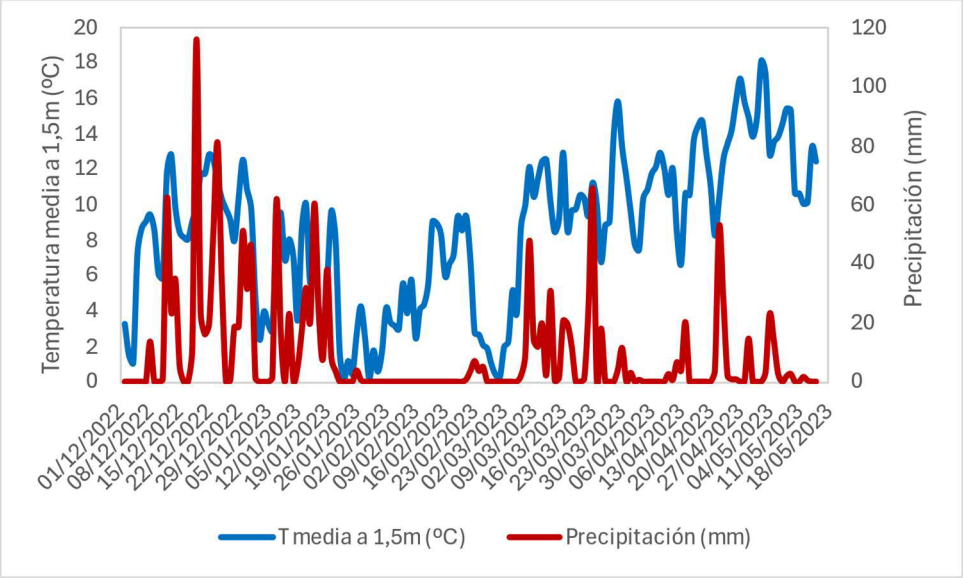


Figura 7. Temperatura media diaria y precipitación acumulada durante la primera experiencia de secado

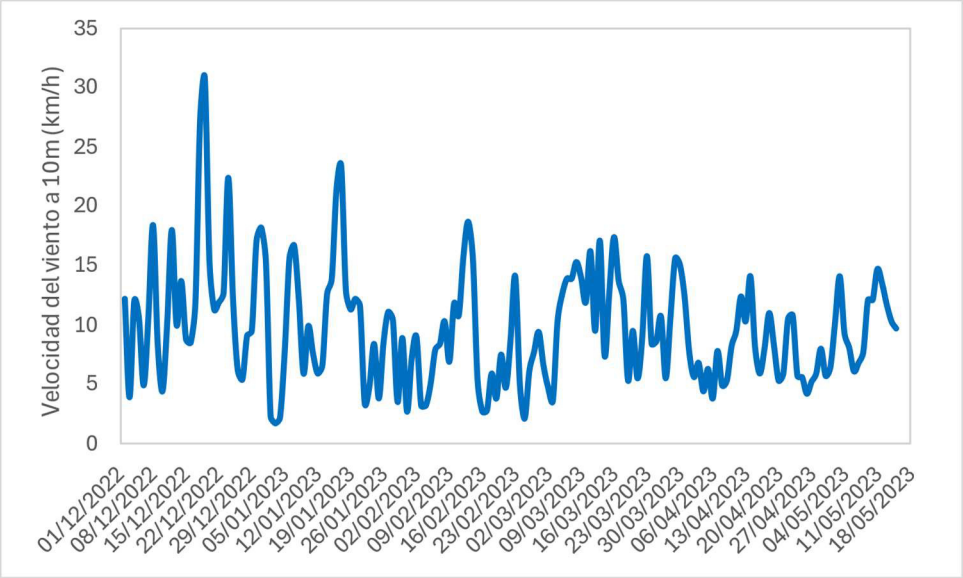


Figura 8. Velocidad media del viento durante la primera experiencia de secado

La segunda experiencia de secado se realizó desde junio de 2023 hasta septiembre de dicho año (un total de 88 días). En este periodo las temperaturas medias diarias oscilaron entre los 15 – 26ºC (Figura 9). Las precipitaciones fueron bastante escasas tratándose de chubascos de tipo tormentoso escasos la mayor parte del periodo, con lluvias más abundantes en septiembre (Figura 9). La velocidad media del viento llegó a alcanzar los 22 km/h (Figura 10).

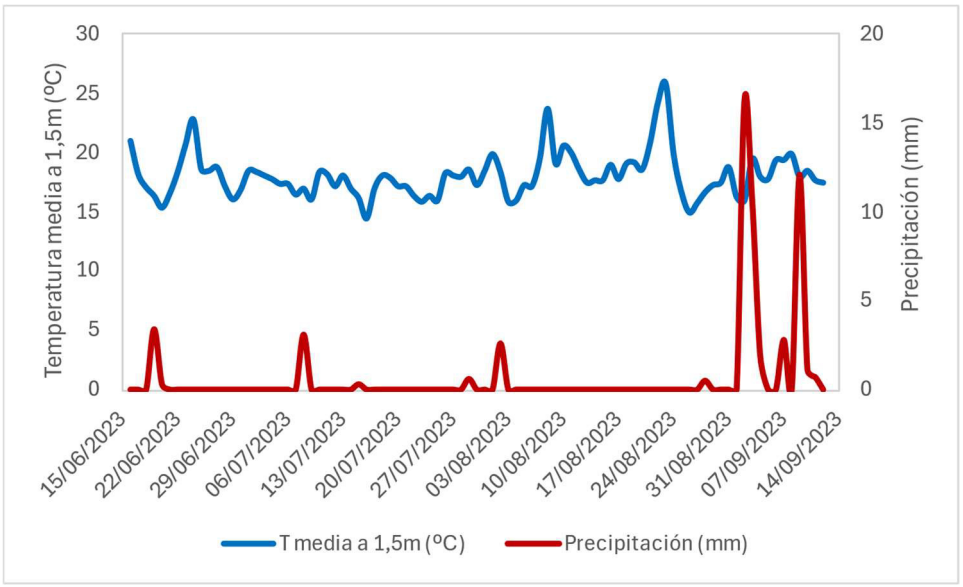


Figura 9. Temperatura media diaria y precipitación acumulada durante la segunda experiencia de secado

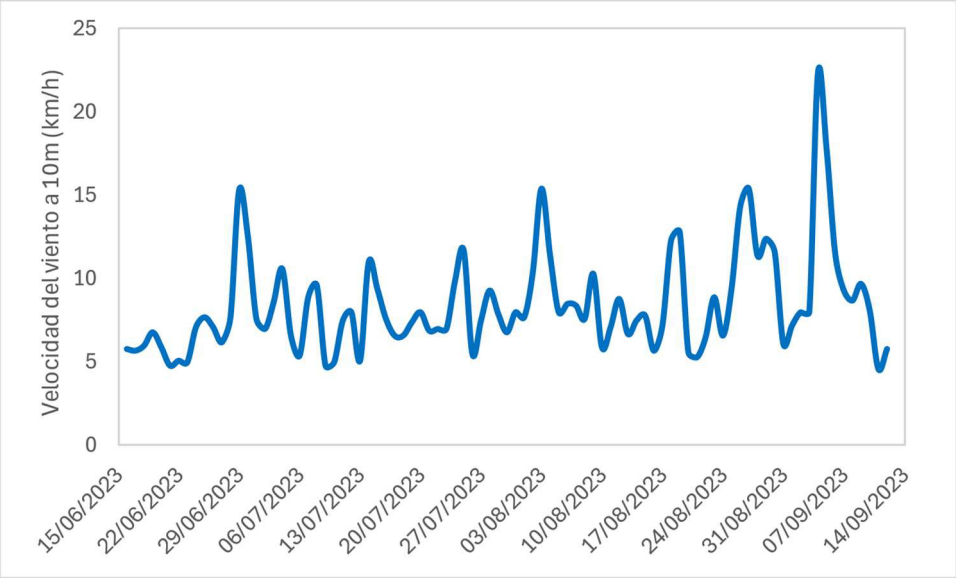


Figura 10. Velocidad media del viento durante la segunda experiencia de secado

3.2. Secado natural muestras pollinaza

A continuación, se muestran los gráficos correspondientes a los dos procesos de secado natural realizados.

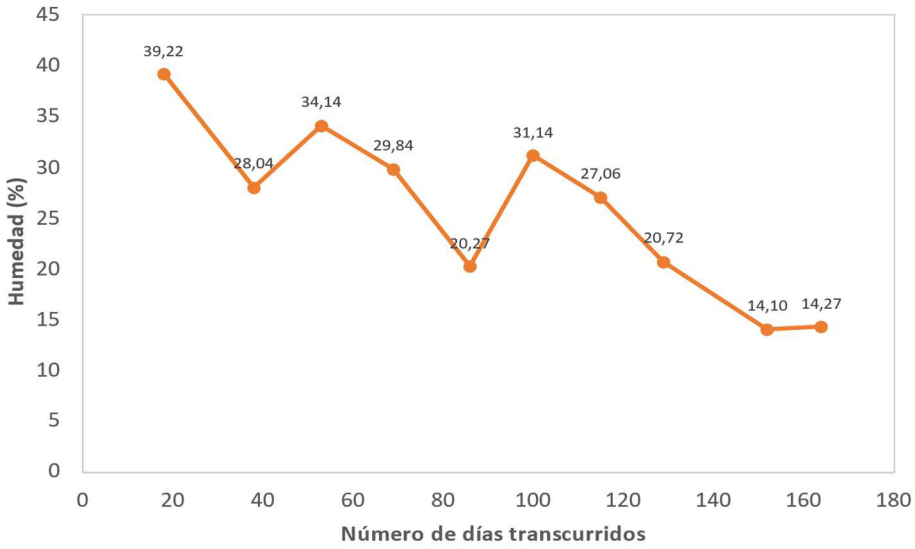


Figura 11. Estudio del proceso de secado natural 1 de la pollinaza (de diciembre a mayo).

Como se puede apreciar en la Figura 11, el valor inicial de humedad de la pollinaza es de aproximadamente 40% y el final de un 14% cuando el secado se realiza entre diciembre y mayo. La disminución del contenido de humedad fue bastante inestable durante los primeros meses, probablemente debido a las abundantes precipitaciones y a que las temperaturas eran más bajas. Sin embargo, después de 152 días se consiguió

bajar este contenido hasta un 14%, porcentaje más que suficiente para el empleo de la pollinaza como combustible sólido.

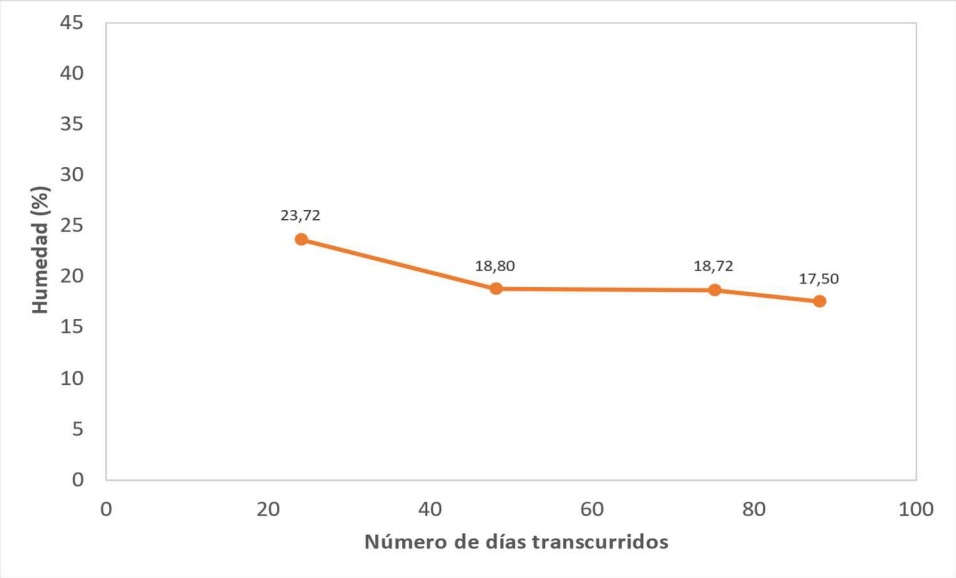


Figura 12. Estudio del proceso de secado natural 2 de la pollinaza (de junio a septiembre).

En el caso de la segunda pila, se puede apreciar en la Figura 12 que el valor inicial de humedad de la pollinaza es de aproximadamente 24% y el final de un 18% cuando el secado se realiza entre junio y septiembre, en este caso las precipitaciones fueron escasas y las temperaturas más cálidas. Como ya se partía de un contenido de humedad relativamente bajo la disminución no fue muy acusada, pero a partir de los primeros 48 días el porcentaje de humedad ya era inferior al 20 %, por lo que se podría emplear la pollinaza como combustible sólido.

4. Conclusiones

En la granja de pollos de engorde A Pendurada, para alcanzar un nivel de humedad de la pollinaza del 14% a partir de un contenido de humedad del 40% y a través de un método de secado natural con volteos, fueron necesarios entre 152 y 164 días. Mientras que al partir de un contenido de humedad del 24%, en los meses más cálidos, solo fueron necesarios 48 días para que el contenido de humedad fuera inferior al 20%.

Si bien es cierto que las experiencias con aireación forzada reducen de forma significativa los tiempos de secado, lo cierto es que el ahorro del proceso por oreo natural permite minimizar los costes de granjero obteniendo sólo beneficios de la valorización termoquímica posterior de la pollinaza.

Para optimizar el tiempo de secado se podría implementar un proceso intermedio para obtener una partícula con una granulometría más adecuada para el procesado logístico y de alimentación en los equipos termoquímicos y mejorar la calidad del biocombustible, así como el proceso de secado.

R 10.7_v03

Informe de caracterización fisicoquímica pollinaza

Índice

1 Modificaciones 2

2 Introducción y objeto 3

3 Metodología 4

3.1. Muestras analizadas 4

3.1.1. Preparación de la muestra 5

3.2. Caracterización fisicoquímica 5

3.2.1. Análisis inmediato 5

3.2.2. Análisis elemental 5

3.2.3. Análisis de elementos inorgánicos 6

3.2.4. Poder calorífico (análisis energético) 6

3.2.5. Comportamiento de la fusión de las cenizas 6

4 Resultados obtenidos 7

4.1. Análisis inmediato 7

4.2. Análisis elemental 8

4.3. Análisis de elementos inorgánicos 9

4.4. Poder calorífico (análisis energético) 11

4.5. Comportamiento de fusión de las cenizas 11

5 Conclusiones 12

6 Anexo – Lista de referencias 14

6.1. Índice de tablas 14

6.2. Índice de figuras 14

6.3. Referencias 14

1 Modificaciones

Fecha	Versión	Aclaraciones
01/02/2023	V00	

2 Introducción y objeto

El proyecto APROAVI pretende aplicar los criterios de economía circular mediante **la gestión y tratamiento sostenibles** de las **deyecciones** generadas en el **sector avícola**, mejorando así la competitividad y sostenibilidad de dicho sector promoviendo la obtención y uso de **energía renovable**, así como de fertilizantes aditivados. Para todo ello se evaluarán dos alternativas tecnológicas. Por un lado, se llevará a cabo la **digestión anaerobia** de la pollinaza mezclada con residuos agrícolas mayoritarios de la zona de estudio, con objeto de maximizar la generación de biogás y la obtención de **fertilizantes** en forma de **digestato** anaerobio. Por otro lado, se evaluará el uso de la pollinaza como biocombustible en un proceso de **pirólisis**, en el que además de un **gas con poder calorífico se generará biochar**. En una última etapa del proyecto se estudiará y comparará la capacidad fertilizante tanto de la pollinaza como del **digestato anaerobio y el biochar mediante pruebas de valorización agronómica en el campo**. Para ello, se cuenta con la participación de A Pendurada.

El primer paso para evaluar el uso de un material como combustible para un proceso de pirólisis es realizar la **caracterización fisicoquímica** del mismo. El material que se pretende valorizar en este caso concreto es **residuo de granja avícola** que consta de una mezcla de deyecciones con el material que conforma la cama de los animales, como puede ser paja, viruta de madera, cáscara de arroz, etc. Es conveniente por tanto comparar la caracterización del residuo con el material primitivo de la cama para evidenciar las modificaciones que suponen las deyecciones.

La caracterización fisicoquímica asociada a procesos de valorización termoquímica, como este caso, generalmente incluye el **análisis elemental** del combustible (determinación de contenido en carbono, nitrógeno, hidrógeno, azufre y cloro), **análisis inmediato** (humedad, cenizas, volátiles), **poder calorífico**, **composición de cenizas** (elementos inorgánicos) y, por último, **determinación del comportamiento de fusión de las cenizas**.

En el presente informe se incluyen los **resultados de la caracterización fisicoquímica** de residuo de una granja avícola, en concreto **pollinaza**, que ha sido proporcionado por Silvares de Grou S. Coop. Gallega. El objetivo es la determinación del potencial de este residuo como materia prima para un **proceso de pirólisis**. Esta caracterización es fundamental para establecer una primera aproximación a la revalorización de una biomasa y permite sentar las bases de futuras hipótesis de trabajo en la experimentación con la misma. Con todo, los resultados aquí expuestos permiten un mayor conocimiento preliminar del residuo.

3 Metodología

3.1. Muestras analizadas

Las muestras analizadas son residuos de granja avícola provenientes de Silvares de Grou S. Coop. Gallega, concretamente, **pollinaza con viruta de madera y con cáscara de arroz**. El material de la cama de los animales se alterna entre estos según disponibilidad, por lo que debido a las posibles diferencias en la composición final y al ser esta altamente influyente en los procesos de valorización termoquímica consecuentes, se ha llevado a cabo la **caracterización fisicoquímica de ambas clases de pollinaza, así como del material de las camas** limpio, es decir, sin deyecciones. De esta forma, se podrán comparar los resultados obtenidos de **composición de los materiales de las camas y de las mezclas de estos con deyecciones avícolas**.

Las muestras fueron enviadas desde el lugar de producción a los laboratorios de EnergyLab. Las muestras correspondientes a **los materiales de la cama** (viruta de madera y cáscara de arroz) se enviaron **antes de ser utilizados**, mientras que las **muestras de pollinaza** con cada uno de los materiales se enviaron después de retirar el residuo de dentro de la granja, una vez que termina el tiempo de cría de los animales. Este residuo se recoge y se forma una **pila** para llevar a cabo el **secado por oreo natural**, proceso recogido en el Informe proceso de secado". En la siguiente figura se presentan las muestras analizadas:



Figura 1. Muestras recibidas para caracterización fisicoquímica.

3.1.1. Preparación de la muestra

Cada muestra se dividió según el método del cono y cuarteo siguiendo la norma UNE-EN ISO 14780 en **cuatro partes**.

Dos de ellas se utilizaron para la determinación del contenido de **humedad** de recepción de la muestra.

Las partes restantes de las muestras fueron **trituradas** para la realización de los demás ensayos que se describirán en los siguientes apartados. Esta reducción granulométrica se llevó a cabo en un molino centrífugo con una criba de 0,5 mm. Las muestras trituradas se **estabilizaron** en condiciones ambientales de laboratorio.

Tras la trituración y estabilización, una de las partes de cada muestra se utilizó para la determinación de **contenido de cenizas**, **poder calorífico** y **contenido de volátiles**.

La última parte restante de las muestras se utilizó para el **análisis de la composición elemental** (C, H, N, S, Cl), **análisis de elementos inorgánicos** y, por último, la **determinación del comportamiento de fusión de las cenizas**.

3.2. Caracterización fisicoquímica

A continuación, se describen los **diferentes análisis** que se han llevado a cabo con las muestras objeto de estudio. Conviene aclarar que las diferentes determinaciones se han realizado como mínimo por **duplicado**.

3.2.1. Análisis inmediato

Mediante el análisis inmediato se determina el carbono fijo, la materia volátil, la humedad y el porcentaje de cenizas presentes en cada muestra.

La **humedad** de las muestras se determinó siguiendo la norma UNE-EN ISO 18134-2 que consiste en calentar una cantidad de muestra conocida a 105°C y registrar la pérdida de masa hasta alcanzar un valor constante.

Las **cenizas** se obtuvieron siguiendo la norma UNE-EN ISO 18122 que se basa en calcinar la muestra a 550°C durante 3 horas.

La **fracción volátil** de las muestras se ha determinado de acuerdo con la norma UNE-EN ISO 18123 que consiste en calentar la muestra en ausencia de oxígeno a 900°C durante 7 minutos.

El **carbono fijo** se determinó por diferencia considerando el contenido en cenizas y compuestos volátiles.

3.2.2. Análisis elemental

El análisis elemental de una muestra determina el contenido total en la misma de **carbono, hidrógeno, nitrógeno, azufre y cloro**. Es por ello muy útil a la hora de

predecir el comportamiento de un material durante un proceso termoquímico y anticipar los posibles contaminantes o complicaciones que pueda ocasionar.

El análisis elemental se realizó siguiendo dos normas: la UNE-EN ISO 16948 para la determinación del contenido en carbono (C), hidrógeno (H) y nitrógeno (N) y la UNE-EN ISO 16994 para la determinación del contenido en azufre (S) y cloro (Cl).

Para el análisis de C, H y N se utilizó un analizador elemental en el que se realizó la combustión completa de la muestra a 950°C seguida de una transformación catalítica de los gases resultantes y la determinación por infrarrojo de hidrógeno y carbono en forma de H_2O y CO_2 y la determinación por conductividad térmica del nitrógeno en forma de N_2. La determinación del contenido en azufre y cloro se realizó mediante cromatografía iónica previa recuperación de los compuestos procedentes de una bomba calorimétrica.

3.2.3. Análisis de elementos inorgánicos

Los elementos inorgánicos **mayoritarios y minoritarios** presentes en las biomasas de partida se determinaron según un procedimiento que sigue las normas UNE-EN ISO 16967 y UNE-EN ISO 16968.

3.2.4. Poder calorífico (análisis energético)

La determinación del poder calorífico de un combustible es fundamental, ya que indica el **contenido energético** del mismo por unidad de masa.

El poder calorífico bruto o superior (PCS) se determinó siguiendo la norma UNE-EN ISO 18125, que se basa en la determinación del poder calorífico superior con una bomba calorimétrica (volumen constante). De acuerdo con esta norma, el poder calorífico usado más comúnmente para fines prácticos es el poder calorífico neto o inferior (PCI) a presión constante, que se calculó a partir del PCS a volumen constante mediante un cálculo matemático contemplado en la misma norma anteriormente mencionada para el que es necesario conocer el contenido en hidrógeno (H), oxígeno (O) y nitrógeno (N) de la muestra. Se han utilizado los valores de hidrógeno y nitrógeno determinados mediante el análisis elemental de las muestras y que se incluyen en los resultados de este informe. El oxígeno se calcula por diferencia a partir de los resultados del análisis elemental y el contenido de cenizas.

Los resultados de poder calorífico se presentan en base seca y en base húmeda al nivel de humedad de recepción de la muestra. No obstante, la comparativa entre biocombustibles se establece con el poder calorífico superior en base seca dado que estos presentan un contenido en humedad diversa.

3.2.5. Comportamiento de la fusión de las cenizas

Las temperaturas de fusibilidad de las cenizas permiten evaluar la probabilidad de **formación de aglomerados y escorias** durante los procesos de transformación térmica de un combustible. Para proceder a tal determinación se siguió el procedimiento marcado en la norma UNE-EN ISO 21404, mediante la cual se toman muestras de las cenizas de los materiales a partir del combustible calcinado a 550°C. Las cenizas se

homogenizan y se hace una probeta de ensayo de la ceniza preparada. Se calienta a velocidad constante y se observa continuamente mientras se sube la temperatura. Se registran las temperaturas a las que se producen los cambios característicos de la forma, de acuerdo con las siguientes definiciones:

TIC: temperatura inicial de contracción; se define como el área de la probeta de ensayo cuando cae por debajo del 95 % del área original de la probeta de ensayo a 550°C debida a la contracción de esta.

TD: temperatura de deformación; temperatura en la cual se presentan los primeros signos de fusión.

TS: temperatura de semiesfera; temperatura a la cual la probeta de ensayo forma aproximadamente una semiesfera.

TF: temperatura fluida; temperatura a la cual la ceniza se disemina sobre su base de apoyo en una capa y la altura de la capa es la mitad de la altura de la probeta de ensayo a la temperatura de semiesfera.

4 Resultados obtenidos

4.1. Análisis inmediato

Los resultados obtenidos del análisis inmediato de las muestras estudiadas se detallan en la **Tabla 1.** Tal y como se ha mencionado anteriormente, se incluyen entre las muestras las bases de los combustibles, es decir, los materiales de la cama de las aves previos a su uso con fines comparativos.

Tabla 1. Resultados del análisis inmediato de las muestras.

(% m/m*)	Pollinaza (viruta)	Viruta de madera	Pollinaza (cáscara)	Cáscara de arroz
Humedad (b.h.**)	19,10 ± 0,40	11,47 ± 0,08	27,99 ± 0,61	14,93 ± 0,45
Cenizas (b.s.***)	17,81 ± 0,43	0,44 ± 0,03	15,76 ± 0,07	14,01 ± 0,11
Fracción volátil (b.s.)	65,68 ± 2,45	83,96 ± 0,16	67,39 ± 0,10	68,49 ± 0,10
Carbono fijo (b.s.)	16,51	15,6	16,85	17,5

* % m/m: porcentaje de masa; ** b.h: base húmeda; *** b.s: base seca

En primer lugar, destaca el contenido en humedad más elevado para el caso de los residuos avícolas en comparación con los materiales primarios, lo que resulta lógico dada su naturaleza. Nos encontramos con valores de cerca del doble de humedad para las muestras de pollinaza tras un proceso de secado al aire por oreo natural que se detalla en un informe previo donde se facilitan además los resultados de la evolución de la humedad del combustible. El **proceso de pirólisis** al que se someterá el residuo avícola tras el proceso de secado **requiere una humedad inferior al 20%,** por lo que

se ha analizado la muestra de pollinaza en viruta de madera una vez alcanzado ese valor, es decir, al dar por finalizado el proceso de secado. El combustible con esta composición se ha empleado para los ensayos de pirólisis y es la base para la obtención de biochar. La muestra de pollinaza en cáscara de arroz que se ha utilizado para estos análisis se ha tomado durante el proceso de secado sin esperar a alcanzar un valor por debajo del 20%, de ahí la diferencia que se observa en la Tabla 1. El contenido en humedad de los materiales de la cama puede ser debido a la humedad ambiental de la época del año en la que se tomaron las muestras, ya que la climatología afecta a los materiales que no se encuentran perfectamente aislados de las lluvias durante su almacenamiento.

En general, **el contenido en humedad de la pollinaza es muy variable** y depende de diferentes factores, como pueden ser el material de la cama, el diseño de la nave, su sistema de aireación, la modalidad de recogida y el ciclo de las deyecciones.

En cuanto a la **fracción volátil**, se observa que esta **disminuye con las deyecciones** si se compara con los materiales de la cama. Una cantidad mayor de materia volátil puede dar lugar a un biochar también con mayores cantidades de compuestos de carbono volátiles, si se produce mediante un proceso de pirólisis a baja temperatura. Estos procesos se pueden ver como una serie de reacciones de volatilización que progresivamente van dejando una matriz carbonosa más compacta. Los compuestos volátiles son más fácilmente biodegradables que el carbono fijo[1], proporcionando una mayor y más rápida mineralización de la materia orgánica contenida en el biochar, lo que puede ser de interés en la aplicación a suelo para aumentar el contenido orgánico de carbono, por ejemplo.

La cantidad de **carbono fijo** final en el biochar vendrá determinada principalmente por el proceso térmico al que se someta la pollinaza, tanto en temperatura como en tiempo de residencia, dado que las cantidades de partida de carbono fijo de cada material son **similares** y que la intensidad del proceso marca de forma notable el resultado en este sentido.

Por último, en cuanto al **contenido en cenizas**, se observa que este es **superior para la pollinaza** en comparación con el material de origen. Esto está directamente vinculado a las deyecciones. Un valor alto del contenido en cenizas y en concreto más alto que el del material de la cama indica que, tras el proceso de pirólisis, el biochar resultante contará con una masa mayor de residuos que si se utilizase directamente el material de la cama, por ejemplo. Dependiendo del uso final de este biochar, la presencia de ciertos compuestos podría ser ventajosa, por ejemplo, como correctores de acidez de suelos o para neutralizar efectos tóxicos provocados por altas concentraciones de ciertos metales[2]. Del mismo modo, deben caracterizarse estas cenizas en cuanto a su composición elemental (análisis de elementos inorgánicos) para determinar las posibilidades y riesgos que podría tener el uso del biochar producido a partir de pollinaza para la aplicación final que se le vaya a dar.

4.2. Análisis elemental

Los resultados obtenidos del análisis elemental de las muestras estudiadas se detallan en la **Tabla 2**. Tal y como se ha mencionado anteriormente, se incluyen entre las

muestras las bases de los combustibles, es decir, los materiales de la cama de las aves previos a su uso con fines comparativos.

Tabla 2. Resultados del análisis elemental de las muestras.

(% m/m b.s.)	Pollinaza (viruta)	Viruta de madera	Pollinaza (cáscara)	Cáscara de arroz
Carbono (C)	< 48,0 (42,9) *	50,3 ± 3,5	< 48,0 (42,2)	> 48,0 (55,3)
Hidrógeno (H)	< 5,0 (4,9)	> 6,5 (7,0)	5,7 ± 0,9	6,2 ± 0,9
Nitrógeno (N)	2,37 ± 0,36	0,28 ± 0,04	2,48 ± 0,07	0,64 ± 0,10
Azufre (S)	> 0,100 (0,323)	< 0,020 (0,013)	> 0,100 (1,661)	0,060 ± 0,020
Cloro (Cl)	> 0,100 (0,471)	< 0,015 (0,013)	> 0,100 (3,157)	> 0,100 (0,385)

* fuera de rango acreditado por ENAC: los resultados obtenidos se muestran entre paréntesis, pero por encontrarse fuera de rango no se puede proporcionar un valor de incertidumbre de la medida

Los resultados del análisis elemental están directamente ligados a los anteriormente presentados de análisis inmediato y al poder calorífico que se presentará en un apartado posterior. La **cantidad de carbono de la pollinaza es menor que la de la cama** en el caso de viruta de madera, cuyo contenido de este elemento es elevado en comparación con la cáscara de arroz. La **cantidad de hidrógeno es menor** en ambos casos para la pollinaza. Estos dos elementos son indicativos del **poder calorífico**, por lo que es de esperar que el potencial energético de la pollinaza sea menor que el de los materiales de la cama.

El **contenido en nitrógeno es superior en el estiércol** en comparación con el material de la cama, lo que está directamente vinculado a las deyecciones. Debido a este alto contenido en nitrógeno con respecto a la biomasa de partida, la pollinaza es comúnmente utilizada para aplicación a suelo, suponiendo un aporte directo de nitrógeno, entre otros beneficios. Teniendo en cuenta la aplicación de interés en este caso, el proceso de pirólisis se lleva a cabo en ausencia de oxígeno y a una temperatura suficientemente baja, condiciones adecuadas para evitar la formación de emisiones gaseosas de óxidos de nitrógeno, que son altamente contaminantes.

El **contenido en azufre y cloro es muy superior en la pollinaza** en comparación con los materiales de la cama. Estos elementos pueden dar lugar a compuestos gaseosos altamente contaminantes o compuestos líquidos corrosivos generados durante el proceso de pirólisis.

En general, los resultados de análisis elemental de la pollinaza dependen de la composición de las deyecciones y estas, a su vez, de la **alimentación de los animales**. La alimentación varía en función del avance del ciclo productivo, por lo que es de esperar que haya variaciones.

4.3. Análisis de elementos inorgánicos

Los resultados obtenidos del análisis de elementos inorgánicos de las muestras estudiadas se detallan en las **Tabla 3 y 4**. Tal y como se ha mencionado anteriormente,

se incluyen entre las muestras las bases de los combustibles, es decir, los materiales de la cama de las aves previos a su uso con fines comparativos.

Tabla 3. Resultados del análisis de elementos inorgánicos minoritarios de las muestras.

(mg/kg b.s.*)	Pollinaza (viruta)	Viruta de madera	Pollinaza (cáscara)	Cáscara de arroz
Arsénico (As)	< 0,75 (0,37)	< 0,75 (0,47)	< 0,75 (0,38)	< 0,75 (0,39)
Cadmio (Cd)	0,46 ± 0,09	< 0,40 (0,07)	< 0,40 (0,25)	0,46 ± 0,09
Cromo (Cr)	> 12,5 (14,0)	< 7,5 (1,9)	> 12,5 (15,1)	> 12,5 (187,7)
Cobre (Cu)	> 12,5 (86,6)	< 7,5 (1,0)	> 12,5 (81,1)	> 12,5 (32,8)
Mercurio (Hg)	< 0,075 (0,01)	< 0,075 (0,008)	< 0,075 (0,008)	< 0,075 (0,007)
Níquel (Ni)	10,1 ± 2,5	< 7,5 (2,2)	9,6 ± 2,4	> 12,5 (84,1)
Plomo (Pb)	8,4 ± 1,9	< 7,5 (0,9)	< 7,5 (6,7)	> 12,5 (16,2)
Zinc (Zn)	> 125,0 (341,0)	< 75,0 (6,1)	> 125,0 (328,4)	< 75,0 (41,9)

* %mg/kg b.s: miligramos de elemento por kilogramo de muestra en base seca

Tabla 4. Resultados del análisis de elementos inorgánicos mayoritarios (óxidos) de las muestras.

(% m/m b.s.c.*)	Pollinaza (viruta)	Viruta de madera	Pollinaza (cáscara)	Cáscara de arroz
Na_2O	3,37	2,01	3,28	0,41
MgO	8,47	12,2	8,23	1,48
Al_2O_3	1,06	3,07	0,98	0,23
SiO_2	8,88	14	17	87,5
P_2O_5	12,70	5,1	13	1,81
K_2O	28,03	25,2	25,25	5,37
CaO	21,4	27,7	18,7	1,78
TiO_2	0,09	0,14	0,06	< 0,01
Fe_2O_3	0,93	1,31	1	0,1

* %m/m b.s.c: porcentaje de masa en base seca sobre cenizas

Los resultados muestran tendencias dispares. Algunos elementos están claramente presentes en la **alimentación de los animales** y las cantidades iniciales en los materiales de la cama son mucho menores que los que se encuentran en la pollinaza, lo que se vincula con un alto contenido de estos elementos en las deyecciones. Este es el caso del **cobre** o del **fósforo**, por ejemplo.

El estiércol avícola muestra diferentes características durante el **proceso de pirólisis** según sus componentes, en especial, los **metales alcalinos** como el potasio o el calcio. Estos metales funcionan como **catalizadores** de la degradación térmica de la biomasa, concretamente de la parte celulósica de la misma[3], disminuyendo la temperatura necesaria para que comience la descomposición[4].

Las **cenizas de la pollinaza** tienen cantidades abundantes de **potasio y calcio**, que pueden afectar a las velocidades de degradación térmica y los mecanismos de pirólisis. Por este motivo, los procesos de pirólisis de este tipo de residuos pueden ser más complejos de caracterizar que los de otras biomasas celulósicas. Este efecto catalizador podría incluso alterar la distribución de productos en términos de proporción de gas, biochar y bioaceite para unas mismas condiciones de pirólisis[5].

Los metales **calcio, potasio, magnesio y hierro** pueden combinarse con CO_3^{2-} para formar **compuestos carbonatados**, por lo que los contenidos de estos elementos en la pollinaza indican que puede ser un material rico en carbonatos. En los **procesos de pirólisis**, la descomposición de ciertos carbonatos requiere temperaturas superiores a los 600ºC, por lo que un mayor contenido de estos compuestos indica que posiblemente el **biochar** producido a una temperatura de unos 400ºC contendrá cantidades de calcio, potasio, magnesio y hierro que no se han transformado a otros productos (bioaceite o emisiones gaseosas).

4.4. Poder calorífico (análisis energético)

Los resultados obtenidos del poder calorífico de las muestras estudiadas se detallan en la **Tabla 5**. Tal y como se ha mencionado anteriormente, se incluyen entre las muestras las bases de los combustibles, es decir, los materiales de la cama de las aves previos a su uso con fines comparativos.

Tabla 5. Resultados de la determinación del poder calorífico de las muestras.

(MJ/kg)	Pollinaza (viruta)	Viruta de madera	Pollinaza (cáscara)	Cáscara de arroz
PCS* (b.s.)	16,87 ± 0,19	21,05 ± 0,05	16,55 ± 0,09	16,94 ± 0,46
PCS (b.h.)	13,65 ± 0,19	18,64 ± 0,05	11,92 ± 0,09	14,41 ± 0,46
PCI** (b.s.)	15,80 ± 0,19	19,53 ± 0,05	15,33 ± 0,09	15,59 ± 0,46
PCI (b.h.)	12,32 ± 0,19	17,01 ± 0,05	10,35 ± 0,09	12,90 ± 0,46

* PCS: poder calorífico superior a volumen constante; ** PCI: poder calorífico inferior a presión constante

El poder calorífico hace referencia al **contenido energético** de un combustible. Los resultados muestran valores de poder calorífico para pollinaza menores a los esperados para un combustible común, como puede ser la viruta de madera. Las **deyecciones** disminuyen el poder calorífico de la mezcla debido principalmente a su **alta cantidad de cenizas**. Además, los contenidos de **humedad** más elevados en comparación con otros combustibles también afectan negativamente a los resultados (en base húmeda) si se comparan nuevamente con viruta de madera como combustible de referencia.

4.5. Comportamiento de fusión de las cenizas

Los resultados obtenidos del análisis del comportamiento de fusión de las cenizas de las muestras estudiadas se detallan en la **Tabla 6**. Tal y como se ha mencionado

anteriormente, se incluyen entre las muestras las bases de los combustibles, es decir, los materiales de la cama de las aves previos a su uso con fines comparativos.

Tabla 6. Resultados del análisis del comportamiento de fusión de las cenizas.

(°C)	Pollinaza (viruta)	Viruta de madera	Pollinaza (cáscara)	Cáscara de arroz
TIC*	< 950 (710)	< 950 (900)	< 950 (850)	< 950 (920)
TD**	< 950 (890)	< 950 (930)	< 950 (910)	960 ± 60
TS***	1420 ± 65	1360 ± 65	1100 ± 65	> 1500
TF****	1500 ± 70	1430 ± 70	1120 ± 70	> 1500

* TIC: temperatura inicial de contracción; ** TD: temperatura de deformación; *** TS: temperatura de semiesfera; **** TF: temperatura fluida

La **temperatura a la que comienzan la fusión de las cenizas** indica un **límite en el proceso de pirólisis**, ya que se debe evitar que esto ocurra por diferentes razones. En primer lugar, la fusión de las cenizas y posterior solidificación puede dar lugar a **incrustaciones** en el reactor difíciles de retirar una vez finalice el proceso de pirólisis. Además, el **área superficial del biochar** resultante puede verse reducida por este fenómeno mediante la reestructuración de la matriz con el aumento de temperatura. La fusión de las cenizas puede dar lugar a que este comportamiento fluido rellene los microporos disponibles en el biochar y reduzca dramáticamente el área superficial del mismo. Por este motivo, una temperatura baja de comienzo de fusión de las cenizas junto con un contenido alto de las mismas, delimita las condiciones del proceso de pirólisis en cuanto a temperatura y/o tiempo de residencia.

5 Conclusiones

Los resultados de caracterización de la pollinaza revelan propiedades que se deben tener en cuenta de cara a la valorización de este material mediante un proceso de pirólisis.

La **humedad** del combustible debe reducirse por debajo del límite de 20% establecido para este tipo de procesos termoquímicos, ya que la humedad inicial del estiércol es superior a este valor. El **contenido y composición de las cenizas** indica un posible proceso catalítico en el que se degradará el material a temperaturas más bajas debido, principalmente, a su alto contenido en potasio y calcio. Además, el biochar resultante posiblemente cuente con cantidades relevantes de estos elementos si la temperatura escogida para el proceso de pirólisis se mantiene por debajo de los 600ºC, ya que de este modo la energía aportada al material no será suficiente para romper los compuestos carbonatados que lo conformen.

La temperatura del proceso de pirólisis también influirá en el resultado por la **temperatura de fusión de las cenizas** de la pollinaza, que ha sido evaluada en el presente informe. Para evitar dentro de lo posible la reducción de área superficial del biochar resultante, la temperatura de pirólisis debe mantenerse en todo caso por debajo de 710ºC, que es la temperatura inicial de deformación más baja de acuerdo con los resultados de las analíticas realizadas.

El contenido en humedad y cenizas del estiércol avícola reduce su **poder calorífico** en comparación con otros combustibles y con los materiales de la cama, por lo que las deyecciones producen esta reducción en el contenido energético del material. Este hecho también se pone de manifiesto al observar el **contenido en carbono e hidrógeno** de cada material ya que ambos están directamente relacionados con el poder calorífico. El contenido de estos elementos es más bajo para la pollinaza en comparación con el material libre de deyecciones.

Por último, los **altos contenidos en nitrógeno, azufre y cloro** indican posibles emisiones contaminantes durante procesos térmicos. Las emisiones de amoníaco, compuestos de azufre y cloro suponen un riesgo medioambiental y, además, pueden dar lugar a problemas de corrosión de los equipos.

Con todo, los resultados presentados en este informe de la caracterización de la pollinaza no son suficiente para evaluar los productos que se podrán obtener mediante el proceso de pirólisis, ya que influirán notablemente las condiciones del mismo.

6 Anexo – Lista de referencias

6.1. Índice de tablas

Tabla 1. Resultados del análisis inmediato de las muestras. 7
Tabla 2. Resultados del análisis elemental de las muestras. 9
Tabla 3. Resultados del análisis de elementos inorgánicos minoritarios de las muestras. 10
Tabla 4. Resultados del análisis de elementos inorgánicos mayoritarios (óxidos) de las muestras. 10
Tabla 5. Resultados de la determinación del poder calorífico de las muestras. 11
Tabla 6. Resultados del análisis del comportamiento de fusión de las cenizas. 12

6.2. Índice de figuras

Figura 1. Muestras recibidas para caracterización fisicoquímica. 4

6.3. Referencias

[1] Ronsse, F., Van Hecke, S., Dickinson, D., & Prins, W. (2013). Production and characterization of slow pyrolysis biochar: influence of feedstock type and pyrolysis conditions. *Gcb Bioenergy*, 5(2), 104-115.

[2] Zhou, S., Han, L., Huang, G., Yang, Z., & Peng, J. (2018). Pyrolysis characteristics and gaseous product release properties of different livestock and poultry manures: Comparative study regarding influence of inherent alkali metals. *Journal of analytical and applied pyrolysis*, 134, 343-350.

[3] Nowakowski, D. J., Jones, J. M., Brydson, R. M., & Ross, A. B. (2007). Potassium catalysis in the pyrolysis behaviour of short rotation willow coppice. *Fuel*, 86(15), 2389-2402.

[4] Raveendran, K., Ganesh, A., & Khilar, K. C. (1995). Influence of mineral matter on biomass pyrolysis characteristics. *Fuel*, 74(12), 1812-1822.

[5] Patwardhan, P. R., Satrio, J. A., Brown, R. C., & Shanks, B. H. (2010). Influence of inorganic salts on the primary pyrolysis products of cellulose. *Bioresource technology*, 101(12), 4646-4655.



Área de Bioenergía

energylab@energylab.es

Edificio CITEXVI

Fonte das Abelleiras, s/n. 36310, Vigo.

T_986 12 04 50 F_986 12 04 51

energylab@energylab.es

www.energylab.es

R 10.7_v03



Informe de la pirólisis de pollinaza a diferentes temperaturas



Índice

1 Modificaciones 0

2 Introducción y objeto 2

3 Caracterización de la materia prima 4

4 Obtención de biochar 6

4.1. Metodología 6

4.2. Resultados 7

4.3. Consumo energético del horno de pirólisis 8

4.4. Estimación de la energía obtenida en el proceso 9

4.5. Conclusiones 9

5 Optimización del proceso 10

5.1. Metodología 10

5.1.1. Condiciones de pirólisis 10

5.1.2. Consumo energético 10

5.2. Resultados 10

5.2.1. Producción de biochar 10

5.2.2. Consumo energético del horno de pirólisis 11

5.3. Conclusiones 12

6 Conclusiones 12

7 Anexo – Lista de referencias 13

7.1. Índice de tablas 13

7.2. Índice de figuras 13

7.3. Referencias 13

1 Modificaciones

Fecha	Versión	Aclaraciones
12/06/2023	V00	Versión inicial

2 Introducción y objeto

El proyecto APROAVI pretende aplicar los criterios de economía circular mediante **la gestión y tratamiento sostenibles** de las **deyecciones** generadas en el **sector avícola**, mejorando así la competitividad y sostenibilidad de dicho sector promoviendo la obtención y uso de **energía renovable**, así como de fertilizantes aditivados. Para todo ello se evaluarán dos alternativas tecnológicas. Por un lado, se llevará a cabo la **digestión anaerobia** de la pollinaza mezclada con residuos agrícolas mayoritarios de la zona de estudio, con objeto de maximizar la generación de biogás y la obtención de **fertilizantes** en forma de **digestato** anaerobio. Por otro lado, se evaluará el uso de la pollinaza como biocombustible en un proceso de **pirólisis**, en el que además de un **gas con poder calorífico se generará biochar**. En una última etapa del proyecto se estudiará y comparará la capacidad fertilizante tanto de la pollinaza como del **digestato anaerobio y el biochar mediante pruebas de valorización agronómica en el campo**.

Una gestión inadecuada de la pollinaza podría contaminar el agua y el aire como fuente de proliferación y diseminación de plagas y enfermedades de importancia sanitaria humana y animal. Además, contribuye el cambio climático y afecta los ecosistemas, a parte de la emisión de olores desagradables. Por ello, una gestión adecuada de estos residuos contribuye el ahorro de materias primas, la conservación de los recursos naturales y el desarrollo sostenible.

El estiércol de aves de corral se puede procesar mediante algún tratamiento térmico como la pirólisis para recuperar energía y producir productos de valor agregado. En el caso de la pirólisis, se puede obtener un **gas con poder calorífico, bio-aceite y biochar**, este último con propiedades aclamadas como sustrato para el suelo y que asimismo permite una reducción importante del volumen de pollinaza inicial, lo cual permite no sólo evitar los problemas ambientales asociados al almacenamiento de la misma, sino también incrementar el ahorro en el espacio necesario para su almacenamiento. La pirólisis de pollinaza para la obtención de biochar es objeto de pocas investigaciones y aún no se ha ampliado a las instalaciones operativas debido fundamentalmente al elevado consumo energético que conlleva.

Las propiedades del biochar están influenciadas por las condiciones de pirólisis como la temperatura y tiempo de tratamiento, velocidad de calentamiento y características del horno. También están influenciadas por las características de la materia prima como son el carbono total, el carbono fijo y los elementos minerales, mientras que el área superficial del biochar y el pH están influenciados por los tratamientos a mayores o menores temperaturas [1].

El objeto del presente informe es determinar las **condiciones óptimas del proceso de pirólisis** aplicado a la **pollinaza** procedente de la granja participante en el proyecto con objeto de obtener al menos 1 biochar con propiedades aptas para su uso como sustrato fertilizante con el menor coste energético posible. Es por ello que en el presente documento se resumen los resultados obtenidos de los trabajos realizados para la producción de biochar a partir de pollinaza, mediante el proceso de pirólisis lenta.

Primeramente, se describen los trabajos iniciales realizados, consistentes en 3 experimentos de pirólisis a 400ºC, 450ºC y 550ºC, manteniendo la velocidad de

calentamiento en 5ºC/min y un tiempo de residencia de la muestra en el reactor, una vez alcanzada la temperatura máxima, de 1h (para cada caso).

A continuación, se describen los trabajos llevados a cabo para la optimización de la producción de biochar en base a los resultados de los ensayos previos. Estos trabajos consistieron en la realización de un **ensayo adicional** reduciendo el tiempo de pirólisis a una temperatura de 550ºC.

3 Caracterización de la materia prima

En primer lugar, se llevó a cabo **una caracterización de la materia prima** (Figura 1a) basada en un análisis termogravimétrico (**TGA**) y una calorimetría diferencial de barrido (**DSC**) con el equipo TGA-DSC Netzsch STS449 F3 Jupiter. El análisis TGA permite estudiar las propiedades térmicas de los materiales y determinar parámetros como el contenido de humedad, contenido de compuestos volátiles y la estabilidad de los materiales a través de la pérdida de peso que se produce en cada temperatura en condiciones controladas. Asimismo, el análisis DSC proporciona información sobre transiciones de fase, reacciones químicas, cambios de entalpía y cambios de cristalinidad. Estas técnicas han permitido **estimar el comportamiento térmico de la pollinaza y establecer las temperaturas óptimas de pirólisis** para la obtención del biochar. Previo a la caracterización, se molió la pollinaza con un molino de corte SM 200 marca Restch con un tamaño de malla de 4 mm para homogeneizar la muestra y realizar una correcta caracterización de la pollinaza (Figura 1b). Conviene aclarar que el material fue proporcionado por la granja de pollos participante en el proyecto.

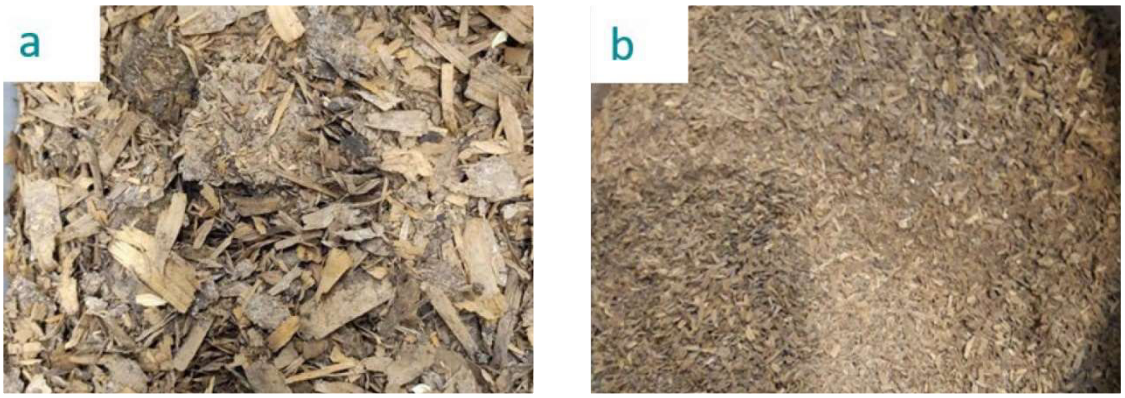


Figura 1. a) Pollinaza sin tratar, b) pollinaza molida con un tamaño de malla de 4 mm.

Los análisis TGA y DSC se realizaron con una velocidad de calentamiento de 5ºC min^{-1} en atmosfera inerte (flujo de N_2 de 25 mL min^{-1}) desde 30 hasta 900ºC. En la Figura 2 se observan las curvas de TGA-DTGA (derivada de la curva TGA) y en la Figura 3 las curvas DSC-DDSC obtenidas en el análisis.

En las curvas TGA-DTGA se distinguen 4 zonas en función de los componentes que se degradan en cada rango de temperatura. El comportamiento térmico observado en la pollinaza se compara con las características térmicas de otros estiércoles como el de camello[2], bovino[3], y equino[4].

- Zona I: rango de temperaturas entre 70-125ºC que cubre la primera endotermia, corresponde a la liberación de humedad, se confirma con el pico a la temperatura 86,6ºC. Se puede considerar la pérdida de peso hasta los 200ºC de la humedad higroscópica.
- Zona II: rango de temperaturas entre 180-380ºC que cubre la segunda endotermia, corresponde a la degradación de la hemicelulosa y la celulosa, se confirma con el pico a 296,1ºC. La degradación de la lignina ocurre más progresivamente entre los 150-900ºC[5].

- Zona III: rango de temperaturas entre 600-700ºC que corresponde a la degradación de los carbonatos[6] (pico a 633,4ºC), que se encuentran frecuentemente en este tipo de materias primas tipo estiércol.
- Zona IV: rango de temperaturas entre 700-900ºC corresponde a la descomposición del char que se formó tras el proceso de desvolatilización.

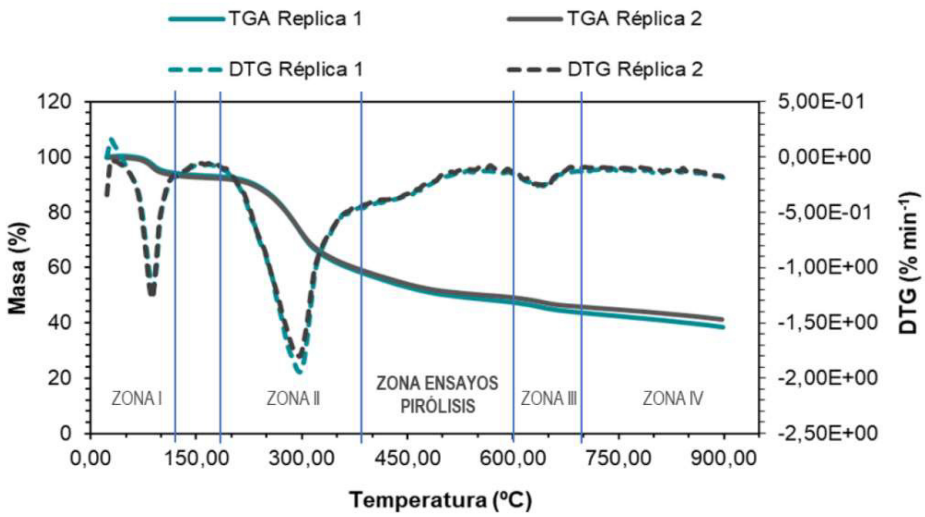


Figura 2. Curvas TGA (líneas continuas) y DTGA (líneas discontinuas) de pollinaza con velocidad de calentamiento 5ºC min-1 hasta 900ºC.

El contenido en humedad, residuo sólido y compuestos volátiles se calculó a partir de los resultados obtenidos en el análisis TGA (tabla siguiente).

Tabla 1. Resultados del análisis TGA de la pollinaza.

PARÁMETROS	RÉPLICA 1	RÉPLICA 2	PROMEDIO
% Humedad higroscópica (200ºC)	7,47	8,27	7,87
% Residuo sólido	38,48	41,195	39,84
% Volátiles	54,05	50,53	52,29

Como la humedad de la pollinaza es de 7,87%, dado que venía de un proceso de secado natural realizado previamente en el proyecto, y se trata de un valor inferior al 15%[7] (valor de humedad máxima recomendado para cualquier proceso de transformación térmica de biomasa), no fue necesario un tratamiento de secado previo a los ensayos de pirólisis. La cantidad de residuo sólido se calculó en función del residuo sólido final que se genera y el porcentaje de compuestos volátiles.

La energía generada en el proceso se estimó a partir del análisis del DSC (Figura 3) en la que se puede observar un primer pico endotérmico, en el que el proceso consume energía para evaporar el agua contenida en la muestra, seguida de varios picos exotérmicos que se corresponden con la degradación de los distintos compuestos orgánicos que forma la muestra, siendo los principales: celulosa, hemicelulosa y lignina. A partir de las áreas de la derivada de la curva de DSC se obtiene una **emisión total de energía de 0,3 kJ/mg de pollinaza.**

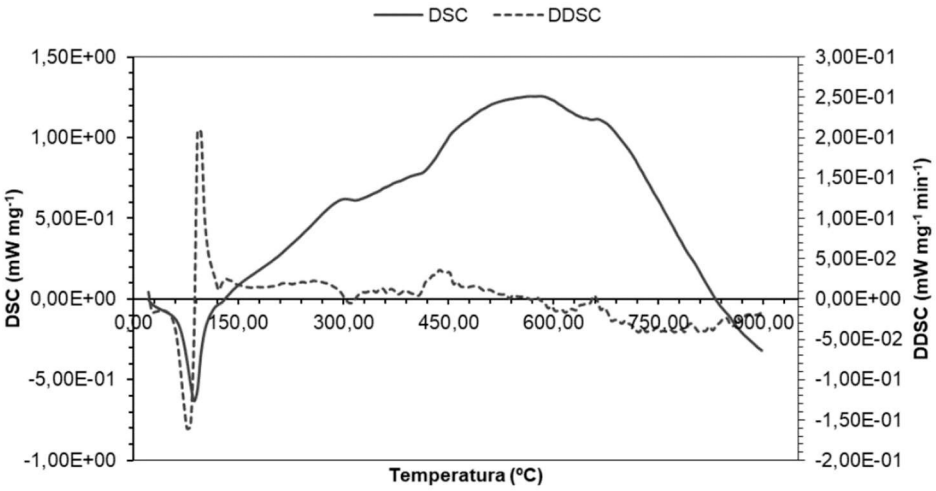


Figura 3. Curvas DSC (líneas continuas) y DDSC (líneas discontinuas) de pollinaza con velocidad de calentamiento 5ºC min-1 hasta 900ºC.

Finalmente se concluyó que **el rango de temperaturas de los ensayos pirolíticos debe comprender entre 400-600ºC** para asegurar una correcta carbonización de la materia orgánica sin descomponer el biochar que se forma durante el proceso de pirólisis lenta. Es por ello que **las temperaturas máximas seleccionadas para los 3 ensayos fueron 400ºC, 450ºC y 550ºC.**

4 Obtención de biochar

4.1. Metodología

La obtención de biochar se realizó mediante el proceso de pirólisis de biomasa, que consiste en la descomposición térmica de materia orgánica en ausencia o con una cantidad limitada de oxígeno. Durante este proceso, además de un producto sólido (biochar) se obtienen otros co-productos de valor: una parte líquida, el bio-oil, que puede tener aplicaciones en la producción de biocombustibles, lubricantes o productos químicos; y un gas, conocido como syngas y que está formado principalmente por CO_2, CO y otros compuestos volátiles que pueden ser utilizados como fuentes de energía o para otros fines, como la producción de calor o la generación de electricidad.

Los ensayos de pirólisis con pollinaza se llevaron a cabo en una planta de pirólisis formada por un horno tubular abierto de la marca Carbolite Gero (modelo TS1 12/200/1200) (Figura 4 a) conectado con un sistema de condensación que permite recoger los aceites producidos durante todo el proceso (Figura 4 b). Además del biochar y el bio-oil se obtuvo otro subproducto, un compuesto de color oscuro de gran viscosidad con una apariencia semejante al alquitrán, que se condensó en la tapa de salida del horno, y que ha sido tenido en cuenta para los balances de materia del sistema. El porcentaje de gases producidos se calculó por diferencia de los distintos co-productos recogidos. En todos los procesos se introdujo la materia prima tal cual se recibió, sin realizarle ningún tratamiento de molienda ni secado.

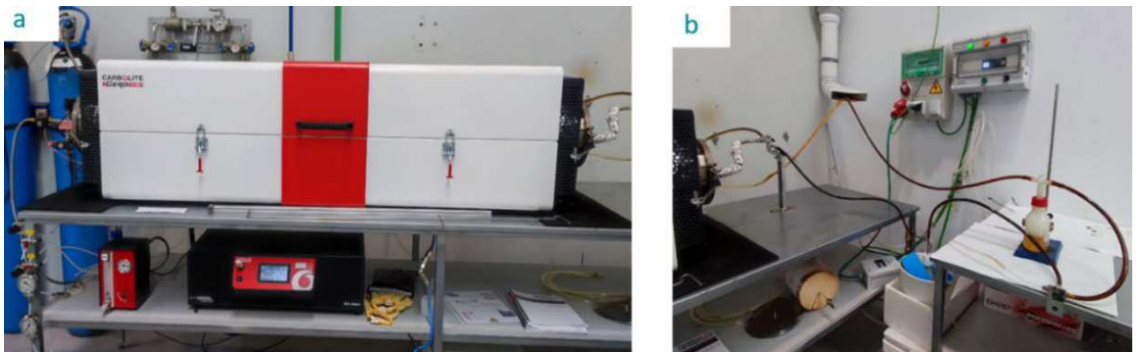


Figura 4. Planta de pirólisis: a) horno tubular Carbolite; b) sistema de condensación.

Durante los trabajos iniciales, se realizaron un total de 7 ensayos para la obtención de aproximadamente 250 g de biochar para cada temperatura máxima (400ºC, 450ºC y 550ºC). Todos los ensayos se realizaron con una velocidad de calentamiento de 5ºC min^{-1} y un tiempo de residencia de 1 h.

Para los cálculos de la disminución del volumen de material de partida se tuvieron en cuenta el volumen del reactor empleado y los valores de densidad aparente de cada biochar, presentados en el informe "Caracterización fisicoquímica de biochar" realizado en el presente proyecto.

La composición de los gases obtenidos en el proceso fue determinada mediante un micro-cromatógrafo.

4.2. Resultados

En la Tabla 2 se recogen los resultados obtenidos para cada ensayo realizado con la pollinaza a las temperaturas máximas seleccionadas. Si bien en todas las reacciones se ha obtenido biochar, durante los ensayos a 400ºC y 450ºC se observó que se seguía emitiendo gas de pirólisis una vez terminado el proceso térmico, lo que puede indicar que necesita un mayor tiempo de residencia para una correcta carbonización. Por otro lado, el carbón fabricado a 550ºC cesó la generación de gases 45 minutos después de haber alcanzado la temperatura máxima de pirólisis, por lo que se podría reducir el tiempo de residencia a esta temperatura.

Los rendimientos de obtención de biochar se encuentran dentro de los rangos bibliográficos observados con materias primas similares derivadas de residuos ganaderos de tipo estiércol[8].

Tabla 2. Ensayos pirolíticos con pollinaza a las temperaturas máximas: 450ºC, 550ºC y 400ºC.

TEMPERATURA MÁXIMA (ºC)	POLLINAZA (g)	BIOCHAR (g)	RENDIMIENTOS			
			BIOCHAR (%)	ALQUITRÁN (%)	BIO-OIL (%)	SYNGAS (%)
400	387,78	171,01	44,10	1,18	19,28	40,60
400	336,62	142,37	42,29	2,10	19,21	36,39
450	116,17	44,87	38,53	1,83	21,19	38,44
450	305,65	120,03	39,27	2,31	20,63	37,79
450	407,80	161,65	39,64	1,62	19,65	39,09
550	300,23	115,68	38,53	1,95	21,19	40,66
550	385,54	150,42	39,02	1,54	16,45	42,99

En la Tabla 3 se recogen los rendimientos totales obtenidos para cada temperatura. El **rendimiento de fabricación de biochar disminuye con el aumento de la temperatura**[9] ya que a mayor temperatura es mayor el grado de carbonización del biochar. Por otro lado, **el porcentaje de gases aumenta** debido a la descomposición térmica más completa de los componentes orgánicos y la mayor cinética de reacción a esta temperatura. Si solo tenemos en cuenta los rendimientos de fabricación del biochar, el obtenido a 400ºC presenta un mayor rendimiento en comparación con las otras temperaturas ensayadas, pero habría que tener en cuenta aumentar el tiempo de residencia por encima de 1h.

Tabla 3. Biochar total obtenido y rendimientos totales de los ensayos pirolíticos a las tres temperaturas de ensayo.

TEMPERATURA MÁXIMA (ºC)	BIOCHAR (G)	RENDIMIENTOS			
		BIOCHAR (%)	ALQUITRÁN (%)	BIO-OIL (%)	SYNGAS (%)
400	313,38	43,18	1,51	19,25	35,91
450	326,55	39,17	1,86	18,57	39,99
550	266,10	38,77	1,68	18,52	40,59

De cara al almacenaje del sólido, es interesante conocer la reducción de volumen que representa el tener el material de partida en su forma original o en forma de biochar. Es por ello que se determinó la **reducción de volumen de la biomasa sólida de partida respecto a la cantidad de biochar formada en el proceso de pirólisis,** siendo ésta de valores aproximados a un 57%, 60% y 61% a T=400-450 y 550ºC respectivamente, siendo por tanto mayor la reducción de volumen a la temperatura máxima de trabajo.

4.3. Consumo energético del horno de pirólisis

El consumo energético del horno pirolítico se cuantificó con un medidor digital de potencia MEMO TD80. En cada ensayo se registraron los valores de consumo energético acumulativos (kWh) y los valores de potencia total acumulada (kw). El consumo total de cada ensayo se obtuvo por la diferencia entre el valor de consumo al final del proceso y el valor de consumo al inicio del proceso.

En la Tabla 4 se registran los datos de consumo energético del horno pirolítico para cada temperatura ensayada. El 60% del consumo del equipo corresponde a la etapa de calentamiento del horno hasta la temperatura máxima de pirólisis fijada en cada proceso y el 40% restante al mantenimiento de esta temperatura durante el tiempo de residencia, que fue de 1h en todos los ensayos realizados.

Tabla 4. Consumos energéticos del horno pirolítico Carbolite para cada temperatura.

TEMPERATURA MÁXIMA (ºC)	CONSUMO ENERGÉTICO (kWh)
400	3,9
450	5,5
550	6,3

4.4. Estimación de la energía obtenida en el proceso

A continuación se presenta la composición de los gases mayoritarios obtenidos durante el proceso de pirolisis medida mediante micro-cromatografía.

Tabla 5. Composición de los gases mayoritarios

TEMPERATURA MÁXIMA (ºC)	CONCENTRACIÓN				PCI_{GAS} (Kcal/Nm^3)
	H_2 (%)	CH_4 (%)	N_2 (%)	CO_2 (%)	
400	1,62	3,00	90,00	5,00	297,95
450	1,82	0,66	90,42	3,55	103,33
550	4,43	1,10	86,08	2,77	208,27

Con la composición de los gases del proceso de pirólisis y su poder calorífico, se estima que el contenido energético obtenido estaría en torno a 100-300 Kcal/Nm^3. Este valor varía según las condiciones de ensayo (temperatura, rampa de calentamiento y tiempo de residencia). En los ensayos la muestra calentada a 400ºC presenta el mayor PCI_{GAS} debido a su alto contenido en CH_4.

La corriente está compuesta principalmente por N_2 ya que es el gas empleado para inertizar el horno y evitar la combustión de la gallinaza. La corriente de N_2 de trabajo es de 1,5 NL/min y su concentración se mantiene próxima al 90%. En cuanto al contenido en H_2 se observa que será mayor a mayor temperatura de proceso. El equipo de medición detectó la presencia de C_2H_4 y C_2H_6 en pequeñas cantidades no cuantificadas en las tres temperaturas estudiadas en donde las mayores concentraciones se registraron para el ensayo realizado a 450ºC.

4.5. Conclusiones

Se ha producido biochar a partir de pollinaza en un total de 313,38 g a 400ºC; 326,55 g a 450ºC y 266,10 g a 550ºC. La temperatura de operación con mayor rendimiento de obtención de biochar y menor consumo energético fue 400ºC. Con el aumento de la

temperatura máxima disminuye el rendimiento de biochar y aumenta el consumo del equipo. La reducción de volumen respecto al material original es mayor conforme se incrementa la temperatura de pirólisis.

5 Optimización del proceso

Tal y como se indicó en el objeto del presente informe, una vez finalizados los trabajos iniciales, se llevó a cabo una prueba adicional para la optimización del proceso de obtención de biochar mediante pirólisis, en base a los resultados iniciales obtenidos. En este apartado se procede a la descripción de estos trabajos posteriores.

5.1. Metodología

5.1.1. Condiciones de pirólisis

Al igual que en el caso anterior, los ensayos de pirólisis con pollinaza se llevaron a cabo en una planta de pirólisis formada por un horno tubular abierto de la marca Carbolite Gero (modelo TS1 12/200/1200) (Figura 4 a) conectado con un sistema de condensación que permite recoger los aceites producidos durante todo el proceso (Figura 4 b).

El porcentaje de gases producidos se calculó por diferencia de los distintos co-productos recogidos. En todos los procesos se introdujo la materia prima tal cual se recibió, sin realizarle ningún tratamiento de molienda ni secado.

Las condiciones del experimento fueron las siguientes: temperatura máxima de 550ºC, velocidad de calentamiento de 5ºC/min y tiempo de residencia, una vez alcanzada la temperatura máxima, de 45 min en atmosfera inerte (N_2, 1,5 L/min).

5.1.2. Consumo energético

El consumo energético del horno pirolítico se cuantificó con un medidor digital de potencia MEMO TD80. En cada ensayo se registraron los valores de consumo energético acumulativos (kWh) y los valores de potencia total acumulada (kW). El consumo total de cada ensayo se obtuvo por la diferencia entre el valor de consumo al final del proceso y el valor de consumo al inicio del proceso.

5.2. Resultados

5.2.1. Producción de biochar

En la Tabla 6 se recogen los resultados obtenidos en los dos ensayos a 550ºC y 45 min de tiempo de residencia realizados con la pollinaza. Se observa replicabilidad en las dos reacciones y los rendimientos de obtención de biochar se encuentran en los rangos de los obtenidos en la bibliografía a partir de materias primas similares derivadas de residuos ganaderos de tipo estiércol[10].

Tabla 6. Ensayos pirolíticos con pollinaza a 550ºC con tiempo de residencia de 45 minutos.

TEMPERATURA MÁXIMA (ºC)	POLLINAZA (G)	BIOCHAR (G)	RENDIMIENTOS			
			BIOCHAR (%)	BIO-OIL (%)	ALQUITRÁN (%)	SYNGAS (%)
550	375,46	142,31	37,90	5,33	2,04	54,73
550	318,48	118,03	37,06	6,15	2,54	54,25

En la Tabla 7 se recogen los rendimientos totales obtenidos en todas las reacciones realizadas a distintas temperaturas y tiempos de residencia, para facilitar la comparación de los resultados obtenidos. Como era de esperar, el rendimiento de fabricación de biochar disminuye con el aumento de la temperatura[11], mientras que el porcentaje de gases aumenta debido a la descomposición térmica más completa de los componentes orgánicos y la mayor cinética de reacción a esta temperatura.

Comparando las reacciones realizadas a la misma temperatura (550ºC), el rendimiento en la producción de biochar disminuye un 1,3% al reducir el tiempo de pirólisis, lo que es una pérdida asumible considerando el ahorro de energía que supone. En todo caso, es conveniente caracterizar el biochar para ver cómo afectan estos cambios en las condiciones de pirólisis a la calidad del mismo.

Tabla 7. Biochar total obtenido y rendimientos totales de los ensayos pirolíticos a las tres temperaturas de ensayo.

TEMPERATURA MÁXIMA (ºC)	TIEMPO RESIDENCIA (min)	BIOCHAR (g)	RENDIMIENTOS			
			BIOCHAR (%)	BIO-OIL (%)	ALQUITRÁN (%)	GASES (%)
400	60	313,38	43,18	19,25	1,51	35,91
450	60	326,55	39,17	18,57	1,86	39,99
550	60	266,10	38,77	18,52	1,68	40,59
550	45	260,34	37,48	5,74	2,29	54,49

5.2.2. Consumo energético del horno de pirólisis

En la Tabla 8 se registran los datos de consumo energético del horno pirolítico a 550ºC con tiempo de residencia 45 min.

Tabla 8. Consumos energéticos del horno pirolítico Carbolite en los ensayos adicionales.

TEMPERATURA MÁXIMA (ºC)	Consumo energético (kWh)
550	5,4
550	5,3

El 60% del consumo del equipo corresponde a la etapa de calentamiento del horno hasta la temperatura máxima de pirólisis fijada y el 40% restante al mantenimiento de esta temperatura durante el tiempo de residencia, que fue de 45 min en los dos ensayos realizados. Si se comparan estos resultados con el consumo obtenido para un tiempo

de residencia de 1 h y a una temperatura de 550 ºC (6,3 kWh), se observa que se ha conseguido reducir el consumo energético en un 15,9%.

5.3. Conclusiones

Se ha producido biochar a partir de pollinaza en un total de 260,34 g a 550ºC con un tiempo de residencia de 45 minutos. El consumo del equipo se redujo en un 15,9% al reducir el tiempo de residencia de 1h a 45 minutos, mientras que el rendimiento en la producción de biochar solo se redujo en un 1,3%.

6 Conclusiones

Se ha llevado a cabo un proceso de pirólisis lenta con pollinaza a diferentes temperaturas (400-450-550ºC) y se ha estudiado la distribución en % de los diferentes productos obtenidos, prestando especial atención al biochar, principal objeto de estudio en el presente trabajo de investigación.

El **rendimiento de biochar disminuye con el aumento de** temperatura, siendo el mayor porcentaje obtenido a 400ºC (valores en torno a un 43%) siendo a las otras temperaturas objeto de estudio de entre un 38-40%. Esto hace que la **reducción en volumen del residuo** sólido original haya sido de prácticamente un 60% en todos los casos estudiados, con los beneficios que ello puede conllevar (no sólo en espacio, sino en generación de olores, contaminación de suelos y aguas, etc), siendo este término ligeramente superior al incrementarse la temperatura de trabajo.

En cuanto a la **energía consumida en el proceso de pirólisis**, ésta es superior al incrementar la temperatura del proceso, como cabría esperar, con valores comprendidos entre 3,9-6,3 kWh por lo que, de cara al objetivo de obtener un biochar con condiciones óptimas con el menor consumo energético posible parece que lo ideal sería su empleo a la temperatura más baja de las estudiadas, esto es, a 400ºC.

En lo referente al **poder calorífico del syngas** obtenido, éste también es superior a menor temperatura, con calores en todos los casos en torno a 100-300 Kcal/Nm^3.

Los resultados obtenidos permiten determinar que, a priori, el biochar más óptimo para su empleo como sustrato fertilizante tanto como por el menor consumo energético que implica su obtención como por el mayor porcentaje de sólido obtenido en el proceso sería aquel obtenido a 400ºC.

7 Anexo – Lista de referencias

7.1. Índice de tablas

Tabla 1. Resultados del análisis TGA de la pollinaza. 5
Tabla 2. Ensayos pirolíticos con pollinaza a las temperaturas máximas: 450ºC, 550ºC y 400ºC. 8
Tabla 3. Biochar total obtenido y rendimientos totales de los ensayos pirolíticos a las tres temperaturas de ensayo. 8
Tabla 4. Consumos energéticos del horno pirolítico Carbolite para cada temperatura. 9
Tabla 5. Composición de los gases mayoritarios..... 9
Tabla 6. Ensayos pirolíticos con pollinaza a 550ºC con tiempo de residencia de 45 minutos. 11
Tabla 7. Biochar total obtenido y rendimientos totales de los ensayos pirolíticos a las tres temperaturas de ensayo. 11
Tabla 8. Consumos energéticos del horno pirolítico Carbolite en los ensayos adicionales. 11

7.2. Índice de figuras

Figura 1. a) Pollinaza sin tratar, b) pollinaza molida con un tamaño de malla de 4 mm. 4
Figura 2. Curvas TGA (líneas continuas) y DTGA (líneas discontinuas) de pollinaza con velocidad de calentamiento 5ºC min-1 hasta 900ºC. 5
Figura 3. Curvas DSC (líneas continuas) y DDSC (líneas discontinuas) de pollinaza con velocidad de calentamiento 5ºC min-1 hasta 900ºC. 6
Figura 4. Planta de pirólisis: a) horno tubular Carbolite; b) sistema de condensación. . 7

7.3. Referencias

[1] Trujillo, E., Valencia, A., & Cecilia Alegría, M. (2019). Producción y caracterización química de biochar a partir de residuos orgánicos avícolas. *Revista de la Sociedad Química del Perú*, *85*(4), 489-504.

[2] Prakash Parthasarathy, Tareq Al-Ansari, Hamish R. Mackey, Gordon McKay (2023). Effect of heating rate on the pyrolysis of camel manure. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 13, 6023-6035.

[3] Thanh-An Ngo, Jinsoo Kim, Seung-Soo Kim (2010). Characteristics and kinetics of cattle litter pyrolysis in a tubing reactor. *Bioresource Technology*, 101, S104-S108.

[4] Cheng Tung Chong, Guo Ren Mong, et al (2019). Pyrolysis characteristics and kinetic studies of horse manure using thermogravimetric analysis. *Energy Conversion and Management* 180, 1260-1267.

[5] H. Yang, R. Yang, H. Chen, D. Lee & C. Zheng (2007). Characteristics of hemicellulose, cellulose and lignin pyrolysis. Fuel, 86, 1781-1788.

[6] T. Wang, M. Camps-Arbestain, M. Hedley, B. Pal Singh, R. Calvelo-Pereira & C. Wang (2014) Determination of carbonate-C in biochars. Soil Research, 52(5), 495-504.

[7] Joseph Eke, Jude A. Onwudili & Anthony V. Bridgwater (2020). Influence of Moisture Contents on the Fast Pyrolysis of Trommel Fines in a Bubbling Fluidized Bed Reactor. Waste and Biomass Valorization, 11, 3711–3722.

[8] Cely, P., Gascó, G., Paz-Ferreiro, J., & Méndez, A. (2015). Agronomic Properties of Biochars from Different Manure Wastes. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*.111, 173-82.

[9] Jolanta Sobik-Szołtysek, Katarzyna Wystalska, Krystyna Malińska, Erik Meers (2021). Influence of Pyrolysis Temperature on the Heavy Metal Sorption Capacity of Biochar from Poultry Manure. Material, 24 (21), 6566.

[10] Cely, P., Gascó, G., Paz-Ferreiro, J., & Méndez, A. (2015). Agronomic Properties of Biochars from Different Manure Wastes. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*.111, 173-82.

[11] Jolanta Sobik-Szołtysek, Katarzyna Wystalska, Krystyna Malińska, Erik Meers (2021). Influence of Pyrolysis Temperature on the Heavy Metal Sorption Capacity of Biochar from Poultry Manure. *Material*, 24 (21), 6566.



Área de Bioenergía

energylab@energylab.es

Edificio CITEXVI

Fonte das Abelleiras, s/n. 36310, Vigo.

T_986 12 04 50 F_986 12 04 51

energylab@energylab.es

www.energylab.es

R 10.7_v03



Informe de caracterización fisicoquímica del biochar

APROAVI

Índice

1 Modificaciones 1

2 Introducción y objeto 2

3 Metodología empleada 3

3.1. Muestras analizadas: 3

3.2. Caracterización fisicoquímica: 3

3.2.1. Análisis inmediato 3

3.2.2. Análisis elemental 4

3.2.3. Poder calorífico 4

3.2.4. Elementos inorgánicos. 4

4 Resultados obtenidos 5

4.1. Análisis inmediato 5

4.2. Poder calorífico 6

4.3. Análisis elemental 7

4.4. Análisis de elementos inorgánicos. 8

5 Conclusiones 9

6 Anexo – Lista de referencias 10

6.1. Índice de tablas 10

6.2. Referencias 10

1 Modificaciones

Fecha	Versión	Aclaraciones
01/08/2023	V00	Versión inicial

2 Introducción y objeto

El proyecto APROAVI pretende aplicar los criterios de economía circular mediante **la gestión y tratamiento sostenibles** de las **deyecciones** generadas en el **sector avícola**, mejorando así la competitividad y sostenibilidad de dicho sector promoviendo la obtención y uso de **energía renovable**, así como de fertilizantes aditivados. Para todo ello se evaluarán dos alternativas tecnológicas. Por un lado, se llevará a cabo la **digestión anaerobia** de la pollinaza mezclada con residuos agrícolas mayoritarios de la zona de estudio, con objeto de maximizar la generación de biogás y la obtención de **fertilizantes** en forma de **digestato** anaerobio. Por otro lado, se evaluará el uso de la pollinaza como biocombustible en un proceso de **pirólisis**, en el que además de un **gas con poder calorífico se generará biochar**. En una última etapa del proyecto se estudiará y comparará la capacidad fertilizante tanto de la pollinaza como del **digestato anaerobio y el biochar mediante pruebas de valorización agronómica en el campo**. Para ello, se cuenta con la participación de A Pendurada.

En el informe precedente con título “Informe de la pirólisis de pollinaza a diferentes temperaturas”, se obtuvo biochar a 400ºC, 450ºC y 550ºC, manteniendo la velocidad de calentamiento en 5ºC/min y un tiempo de residencia de 1h para cada caso y en el caso de 550ºC también para un menor tiempo de residencia (45 minutos), lo que da un total de 4 tipos de biochar.

El **biochar**[1] es carbón vegetal que se obtiene de restos vegetales y residuos de biomasa. A diferencia del carbón vegetal clásico que es empleado como combustible, el biochar o biocarbón se aplica al suelo para mejorar sus propiedades. En suelos donde se ha aplicado el biocarbón en combinación con fertilizantes la producción vegetal incrementa y se estimula la actividad microbiana. Mejora su estructura y presenta una mayor capacidad de retención de agua. Asimismo, el biochar ayuda a regular el pH de los suelos muy ácidos y mejora sus propiedades físicas y químicas.

Además de las propiedades fertilizantes, el **biochar contribuye al secuestro de carbono de la atmósfera** y lo almacena en el suelo en formas químicas que son muy estables durante mucho tiempo.

Otro aspecto positivo a tener en cuenta es **la estabilidad** del biochar en el suelo. Si bien es difícil predecir cuál será su comportamiento a largo plazo, los experimentos que se han realizado en condiciones de laboratorio indican que puede perdurar entre cientos y miles de años, ya que es sólo una pequeña fracción de éste la que se degrada en un período corto de tiempo.

Dentro del presente proyecto se estudiarán las propiedades del biochar como fertilizante mediante su el estudio de sus propiedades y su uso en suelo.

En este informe **se evalúan las características fisicoquímicas del biochar** obtenido en el proceso de pirólisis llevado a cabo dentro del proyecto, en concreto de aquellos biochares obtenidos a temperaturas de 400ºC, 450ºC y 550ºC, manteniendo la velocidad de calentamiento en 5ºC/min y un tiempo de residencia de 1h para cada caso y en el caso de 550ºC también para un menor tiempo de residencia (45 minutos), lo que da tal y como se comentó con anterioridad un total de 4 tipos de biochar.

3 Metodología empleada

3.1. Muestras analizadas:

Se han analizado las 4 muestras biochar obtenido tras la pirólisis de pollinaza a diferentes temperaturas (400ºC, 450ºC y 500ºC) y tiempos de residencia (45 minutos y 1 hora), desde este momento la nomenclatura de las muestras será la que sigue:

Tabla 1. Nomenclatura de las muestras empleadas.

Muestra	Muestra 1
Biochar T=400ºC, t=1h	B-400
Biochar T=450ºC, t=1h	B-450
Biochar T=550ºC, t=1h	B-550A
Biochar T=550ºC, t=45min	B-550B

El biochar presenta una ligera variación en sus propiedades físicas en función a la muestra. Las muestras B-400 y B-450 son más laminadas y las muestras B-550A y B-550B más arenosas. Todas son de un color negro opaco y de estructura endeble.



Muestra B-550B Muestra B-550A Muestra B-450 Muestra B-400

Ilustración 1. Muestras de biochar

3.2. Caracterización fisicoquímica:

Se llevó a cabo la caracterización fisicoquímica al completo de los 4 biochar obtenidos: análisis inmediato, análisis elemental, poder calorífico, elementos mayoritarios y minoritarios (inorgánicos).

3.2.1. Análisis inmediato

Mediante el análisis inmediato se determina el carbono fijo, los volátiles, la humedad y el porcentaje de cenizas presentes en cada muestra.

La humedad de las diferentes muestras se determinó siguiendo la norma UNE-EN ISO 18134-2 que consiste en calentar una cantidad de muestra conocida a 105°C y registrar la pérdida de masa hasta alcanzar un valor constante.

Las cenizas se obtuvieron siguiendo el procedimiento UNE-EN ISO 18122 que se basa en calcinar la muestra a 550°C durante 3 horas. Para la determinación de la fracción

volátil de la muestra se utilizó la norma UNE-EN ISO 18123 que consiste en calentar la muestra en ausencia de aire a 900°C. El carbono fijo se determinó por diferencia considerando el contenido en cenizas y compuestos volátiles.

3.2.2. Análisis elemental

El análisis elemental de una muestra determina el contenido total en la misma de carbono, hidrógeno, nitrógeno, azufre y cloro.

El análisis elemental se realizó siguiendo dos normas, la UNE-EN ISO 16948 para la determinación de C, H y N y la UNE-EN ISO 16994 para la determinación de S y Cl.

Para el análisis de C, H y N se utilizó un analizador elemental en el que se realizó la combustión completa de la muestra a 950°C seguida de una transformación catalítica de los gases resultantes y la determinación por infrarrojo de hidrógeno y carbono en forma de H_2O y CO_2 y la determinación por conductividad térmica del nitrógeno en forma de N_2. La determinación del contenido en azufre y cloro se realizó mediante cromatografía iónica previa recuperación de los compuestos procedentes de una bomba calorimétrica.

3.2.3. Poder calorífico

La determinación del poder calorífico se realizará con el objetivo de comparar su potencial como combustible con su valor agronómico. Conocer el poder calorífico de un combustible es fundamental, ya que indica el contenido energético del mismo por unidad de masa.

El poder calorífico superior (PCS) se determinó siguiendo la norma UNE-EN ISO 18125, que se basa en la determinación del poder calorífico superior con una bomba calorimétrica. El poder calorífico inferior (PCI) se calculó a partir del PCS mediante un cálculo matemático contemplado en la norma anteriormente mencionada para el que es necesario conocer el contenido en hidrógeno (H), oxígeno (O) y nitrógeno (N) de la muestra. Los datos se presentan en base seca y en base húmeda.

3.2.4. Elementos inorgánicos.

Los elementos inorgánicos mayoritarios presentes en las biomasas de partida se determinaron por ICP—OES según un procedimiento que sigue la norma UNE-EN ISO 16967. Los elementos minoritarios se determinaron por ICP—OES de acuerdo con la norma UNE-EN ISO 16968. Para realizar este análisis las muestras fueron previamente secadas, molidas y digeridas con microondas en medio ácido. En la Tabla 5 y en la Tabla 6 se recoge el análisis de los elementos inorgánicos presentes en las muestras. De cara a su valoración como combustible, son de especial importancia los elementos que influyen en la aglomeración de las cenizas (Na, K, P, Ca, Si y Mg) y los tóxicos como Hg, Cd, Cr y Zn que, además de dificultar la utilización de las cenizas pueden dar lugar a la emisión de partículas y a problemas de suciedad e incrustaciones menores [2] [3].

Dado a que el estudio se va a centrar en la aplicación del biochar como fertilizante se analizará y comparará su composición en macronutrientes (nitrógeno, fósforo, sodio,

potasio, calcio y magnesio) y micronutrientes (hierro, el manganeso, zinc, cobre, boro y molibdeno) ambos necesarios para el desarrollo de las plantaciones.

Se reflejará también el ratio C/N, siendo este el cociente de carbono entre el nitrógeno presente en las muestras. Para su empleo como compostaje se considera óptimo próximo para valores de 30 ya que los microorganismos necesitan los nutrientes en esa proporción. Además se ha observado que a menores C/N (<10), se traduce en un exceso de nitrógeno dando lugar a la perdida de este con la aparición de amonio. Por otra parte cuanto mayor sea C/N más lento se producirán las reacciones de compostaje.

Al tratarse de un material de pirólisis valorizado a partir de residuos y siendo además un subproductos del proceso, queda libre del cumplimiento de la Directiva 2008/98/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 19 de noviembre de 2008. En ella, se regula el contenido elemental para su uso como abono en suelos. Aun así se empleará esta normativa como base con el fin de valorar su empleo.

Por otra parte, tal y como se recoge en el ANEXO VI del Real Decreto 1051/2022, de 27 de diciembre, se establecen normas para la nutrición sostenible en los suelos agrarios. Se recogen los parámetros relativos de materiales pesados como cadmio, cobre, níquel, plomo, zinc, mercurio o arsénico. Se estudiará también el cumplimiento de estos parámetros con los resultados obtenidos tras el análisis de las cuatro muestras de biochar.

4 Resultados obtenidos

4.1. Análisis inmediato

A continuación, se muestran los datos obtenidos para el análisis inmediato del biochar.

Tabla 2. Análisis inmediato.

(% m/m*)	B-400	B-450	B-550A	B-550B
Humedad (b.h.**)	5,83 ± 0,16	4,18 ± 0,04	4,84 ± 0,01	2,13 ± 0,05
Cenizas (b.s.***)	35,88 ± 0,88	36,55 ± 0,01	39,17 ± 0,38	42,42 ± 5,18
Volátiles (b.s.)	24,71 ± 0,49	19,93 ± 0,75	15,77 ± 0,79	13,88 ± 0,40
Carbono Fijo (b.s.)	39,41	43,52	45,06	43,70

* % m/m: porcentaje de masa; ** b.h: base húmeda; *** b.s: base seca

Conviene destacar que, de cara a su aplicación en suelo, a más carbono fijo más estable será el biochar, y a mayor material volátil, menos, lo cual no es deseable. Por otra parte un mayor contenido en cenizas podría conducir a un mayor riesgo de lixiviados en su aplicación por lo que tampoco sería adecuado para el uso anteriormente citado.

Si analizamos los resultados obtenidos, de la Tabla 2 destaca, en primer lugar, que **la humedad** de todas las muestras es muy similar, siendo en el caso de la muestra B-550B la más baja, y en las restantes muy próximas entre si e inferiores a un 6%, se

puede por tanto concluir que la humedad de los materiales es **baja, lo cual es lógico dado el proceso del que proceden.**

En cuanto al **contenido en cenizas, éste es mayor a mayor temperatura de pirólisis,** subiendo gradualmente de un 35,88% en el caso de B-400 a 42,42% en el caso de B-550B. Conviene destacar que cuando la pirólisis se realiza a 550ºC el contenido en cenizas es superior a un menor tiempo de residencia de la muestra en el reactor. Dicho contenido en cenizas es **elevado.**

En lo referente a la materia **volátil**, ésta crece al disminuir la temperatura, con valores que van desde un 13,88% (B-550B) hasta un 24,71% en la muestra B-400. Destaca el menor contenido de materia volátil en la muestra a 550ºC con menor tiempo de residencia.

Por último, los valores de **carbono fijo** siguen el orden de 39,41% para la muestra B-400, 43,52% y 43,70% para las muestras B-450 y B-550B respectivamente. Por último la concentración de carbono fijo para la muestra B-550A asciende hasta 45,06%. Este elevado contenido de carbono fijo indica un elevado grado de conversión de las biomasas de partida. Se puede considerar de esta forma que el biochar **a mayor temperatura y mayor tiempo de residencia mayor estabilidad** por su alta concentración en carbono fijo.

Según estos datos los materiales con mayor contenido en cenizas lo son también en carbono fijo por lo que, para seleccionar el material óptimo para su uso en suelo como fertilizante habría que hacer pruebas más específicas.

4.2. Poder calorífico

Los resultados obtenidos del poder calorífico de las muestras estudiadas se muestran en la Tabla 3. Tal y como se ha mencionado antes, los datos se presentarán en base seca y en base húmeda para las 4 muestras.

Tabla 3. Poder calorífico de las muestras

(MJ/kg)	B-400	B-450	B-550A	B-550B
PCS* (b.s.)	19,38	16,77	17,38	18,47
PCS (b.h.)	18,59	16,22	16,56	18,08
PCI** (b.s.)	18,84	16,38	17,16	18,24
PCI (b.h.)	17,97	15,76	16,24	17,80

El poder calorífico hace referencia al contenido energético de un combustible los cuales están recogidos en la tabla anterior. Los resultados muestran una ligera variación entre las diferentes muestras. Debido al bajo contenido en humedad de todas ellas, la diferencia entre los resultados en base seca y base húmeda es despreciable. La muestra con el mayor PCI (b.s.) es el biochar producido a una menor temperatura (B-400), seguido del biochar con menor tiempo de residencia (B-550B).

Para todas ellas, su poder calorífico es similar teniendo así un valor similar como combustible. Debido a su composición elemental, detallada en los siguientes apartados, se presentan mejores alternativas de uso para esta biomasa.

4.3. Análisis elemental

Los resultados del análisis elemental realizado a las muestras estudiadas se recogen en la Tabla 4. Al igual que en los apartados anteriores, se muestra su composición en función a la temperatura máxima alcanzada en el proceso y a los tiempos de residencia en cámara, todo ello con fines comparativos.

Tabla 4. Análisis elemental de las muestras

(% m/m b.s.)	B-400	B-450	B-550A	B-550B
Carbono (C)	50,1± 3,5	51,3 ± 3,5	50,6 ± 3,5	51,8 ± 3,5
Hidrógeno (H)	< 5,0 (2,5) *	< 5,0 (1,8)	< 5,0 (1,0)	< 5,0 (1,1)
Nitrógeno (N)	>2,4 (2,42)	2,21±0,33	1,78 ± 0,27	2,01 ± 0,30
Azufre (S)	> 0,100 (0,175)	> 0,100 (0,140)	> 0,100 (0,245)	> 0,100 (0,223)
Cloro (Cl)	> 0,100 (0,389)	> 0,100 (0,293)	> 0,100 (0,507)	> 0,100 (0,437)

* fuera de rango acreditado por ENAC: los resultados obtenidos se muestran entre paréntesis, pero por encontrarse fuera de rango no se puede proporcionar un valor de incertidumbre de la medida

Los resultados de la composición elemental de las muestras estudiadas están relacionados con los mostrados en los apartados anteriores del poder calorífico y del análisis inmediato de las muestras. El elemento principal de las muestras es el carbono, siendo superior al 50% en todas ellas. En cambio, la concentración de hidrógeno es muy pequeña, ésta disminuye a medida que se aumenta la temperatura pasando de un 2,5% para la muestra B400 a un 1,0% para la muestra B550A.

Su contenido en nitrógeno es bajo en todos ellos y, al igual que el hidrógeno se reduce al aumentar la temperatura y el tiempo de residencia. Como se menciona anteriormente, el nitrógeno es considerado como uno de los macronutrientes más importantes, por lo que este aporte de nitrógeno supone un beneficio de cara a su utilización como fertilizante.

Todas las mezclas presentan un índice C/N notablemente alto con el siguiente orden creciente para las cuatro muestras: B-400 (20,52) < B-450 (22,76) < B-550B (25,77) < B-550A (28,42). Según el C/N considerado óptimo para el empleo del biochar como fertilizante, la mejor muestra es la B-550A, aunque todas ellas presentan valores similares.

Por último, el contenido en azufre y cloro es relativamente constante para todas las muestras. Éste asciende desde 0,175% de S y 0,389% de Cl para la muestra B-400 hasta el 0,223% de Cl y 0,437% de S en la muestra B-550A.

Tras analizar su composición elemental, se observa que no hay una gran diferencia en la composición de las cuatro muestras por lo que se concluye que ésta no será un factor

limitante en la aplicación de ninguna de ellas y serán necesarios la realización de diferentes análisis.

4.4. Análisis de elementos inorgánicos.

Los resultados obtenidos del análisis de elementos inorgánicos de las muestras estudiadas se detallan en la Tabla 5 y la Tabla 6.

Tabla 5. Análisis de elementos inorgánicos minoritarios de las muestras

(mg/kg b.s.*)	B-400	B-450	B-550A	B-550B
Arsénico (As)	<0,75 (0,41)	<0,75 (0,53)	<0,75 (0,58)	<0,75 (0,41)
Cadmio (Cd)	<0,40 (0,22)	<0,40 (0,23)	<0,40 (0,21)	<0,40 (0,07)
Cromo (Cr)	<7,5 (3,2)	<7,5 (3,3)	<7,5 (2,2)	<7,5 (1,7)
Cobre (Cu)	<7,5 (4,0)	<7,5 (3,9)	<7,5 (5,4)	<7,5 (1,1)
Mercurio (Hg)	<0,075 (0,08)	<0,075 (0,012)	<0,075 (0,011)	<0,075 (0,005)
Níquel (Ni)	<7,5 (1,6)	<7,5 (1,6)	<7,5 (1,4)	<7,5 (1,2)
Plomo (Pb)	<7,5 (3,1)	<7,5 (3,2)	<7,5 (2,3)	<7,5 (0,6)
Zinc (Zn)	<75,0 (40,1)	<75,0 (40,6)	<75,0 (36,3)	<75,0 (5,2)

* %mg/kg b.s: miligramos de elemento por kilogramo de muestra en base seca

Tabla 6. Resultados del análisis de elementos inorgánicos mayoritarios (óxidos) de las muestras.

(% m/m b.s.c.*)	B-400	B-450	B-550A	B-550B
Na_2O	3,20	3,48	3,46	3,89
MgO	9,44	10,20	10,40	9,74
Al_2O_3	2,05	1,33	1,37	1,16
SiO_2	12,00	10,30	9,54	9,44
P_2O_5	12,60	13,60	14,10	13,40
SO_3	5,95	5,96	6,30	620
K_2O	24,76	25,27	24,90	27,07
CaO	21,60	22,20	22,42	21,30
TiO_2	1,47	0,40	0,23	0,23
MnO	0,64	0,73	0,68	0,73
Fe_2O_3	0,90	0,85	0,94	0,83

* %m/m b.s.c: porcentaje de masa en base seca sobre cenizas

Los resultados de ambas tablas muestran un comportamiento similar de las diferentes muestras, lo cual es lógico ya que se parte en todas ellas de la misma biomasa.

La notable cantidad de macronutrientes necesarios para las plantas es un buen indicador para su valoración como fertilizante. Macronutrientes como el potasio, calcio o fósforo son los más abundantes, conteniendo además pequeñas cantidades de sodio

y magnesio. Por otra parte, la presencia de micronutrientes como el hierro, manganeso, cobre o zinc refuerzan la idea de su uso como fertilizante.

En cuanto a las limitaciones respecto a la composición en metales pesados recogidas en el ANEXO VI del Real Decreto 1051/2022, se ha detectado la presencia de cadmio, cobre, mercurio, níquel, plomo, zinc y arsénico. se observa que en ninguno de ellos se acercan a los límites permitidos (apenas superan el 2% en los peores casos) siendo la mayoría de ellas despreciables y llegando a ser alguna de ellas, en pequeñas cantidades, beneficiosas para el suelo.

5 Conclusiones

Se ha realizado el estudio de las características fisicoquímicas para el empleo del biochar, obtenido tras un proceso de pirólisis de la pollinaza estudiada a diferentes temperaturas de 400ºC, 450ºC y 550ºC, manteniendo la velocidad de calentamiento en 5ºC/min y un tiempo de residencia de 1h para cada caso y en el caso de 550ºC también para un menor tiempo de residencia (45 minutos).

Tras el análisis y estudio de las muestras, se considera que el biochar presenta una composición muy favorable para su empleo como biofertilizante en comparación a su uso como combustible ya que su composición en elementos que aumentan su valor como fertilizante, están también relacionados con la aglomeración de cenizas reduciendo su valor como combustible.

Respecto a cuál de las muestras presenta el resultado más favorable, destacan ligeramente las muestras obtenidas a una mayor temperatura de pirólisis (B-550A y B-550B) ya que presentaron mejores características en todos los parámetros analizados.

Aun conociendo esto, la diferencia no se considera tan notable como para contradecir el anterior informe en donde se escogía a la muestra B-400 como la mejor para su valoración tanto por el menor consumo energético que implica su obtención como por el mayor porcentaje de sólido obtenido en el proceso.

6 Anexo – Lista de referencias

6.1. Índice de tablas

Tabla 1. Nomenclatura de las muestras empleadas. 3
Tabla 2. Análisis inmediato..... 5
Tabla 3. Poder calorífico de las muestras..... 6
Tabla 4. Análisis elemental de las muestras..... 7
Tabla 5. Análisis de elementos inorgánicos minoritarios de las muestras..... 8
Tabla 6. Resultados del análisis de elementos inorgánicos mayoritarios (óxidos) de las muestras. 8

6.2. Referencias

[1] Escalante Rebolledo, A., Pérez López, G., Hidalgo Moreno, C., López Collado, J., Campo Alves, J., Valtierra Pacheco, E., & Etchevers Barra, J. D. (2016). Biocarbón (biochar) I: Naturaleza, historia, fabricación y uso en el suelo. Terra Latinoamericana, 34(3), 367-382.

[2] Salo, K. and W. Mojtahedi (1998), Fate of alkali and trace metals in biomass gasification. Biomass and Bioenergy, 15(3), 263-267.

[3] Obernberger, I., Biedermann, F., Widmann, W., & Riedl, R. (1997). Concentrations of inorganic elements in biomass fuels and recovery in the different ash fractions. Biomass and bioenergy, 12(3), 211-224.



Área de Bioenergía

energylab@energylab.es

Edificio CITEXVI

Fonte das Abelleiras, s/n. 36310, Vigo.

T_986 12 04 50 F_986 12 04 51

energylab@energylab.es

www.energylab.es

R 10.7_v03



Informe de viabilidad técnico-económica del proceso de pirólisis con pollinaza



Índice

1 Modificaciones 2

2 Introducción y objeto 3

3 Generación de residuos y consumo eléctrico de la granja objeto de estudio 4

3.1. Cantidad de residuo generado 4

3.2. Consumo energético 4

3.2.1. Energía térmica consumida 5

3.2.2. Energía eléctrica consumida. 5

4 Energía renovable obtenida a partir del biocombustible de partida 6

4.1.1. Energía renovable obtenida a partir del biocombustible 6

4.1.2. Porcentaje de energía cubierta de la demandada 8

4.1.3. Biochar generado en la pirólisis. 9

4.1.4. Indicadores económicos y parámetros de viabilidad 10

4.2. Análisis técnico-económico con la planta piloto empleada en el proyecto 12

5 Conclusiones 14

6 Anexo – Lista de referencias 16

6.1. Índice de tablas 16

6.2. Índice de figuras 16

6.3. Índice de referencias 16

1 Modificaciones

Fecha	Versión	Aclaraciones
10/07/2024	V00	Versión inicial

2 Introducción y objeto

El proyecto APROAVI pretende aplicar los criterios de economía circular mediante **la gestión y tratamiento sostenibles** de las **deyecciones** generadas en el **sector avícola**, mejorando así la competitividad y sostenibilidad de dicho sector promoviendo la obtención y uso de **energía renovable**, así como de fertilizantes aditivados. Para todo ello se evaluarán dos alternativas tecnológicas. Por un lado, se llevará a cabo la **digestión anaerobia** de la pollinaza mezclada con residuos agrícolas mayoritarios de la zona de estudio, con objeto de maximizar la generación de biogás y la obtención de **fertilizantes** en forma de **digestato** anaerobio. Por otro lado, se evaluará el uso de la pollinaza como biocombustible en un proceso de **pirólisis**, en el que además de un **gas con poder calorífico se generará biochar**. En una última etapa del proyecto se estudiará y comparará la capacidad fertilizante tanto de la pollinaza como del **digestato anaerobio y el biochar mediante pruebas de valorización agronómica en el campo**.

Tanto en el proceso de digestión anaerobia como en el de pirólisis se acometerá un **estudio de la viabilidad técnico-económica** de ambos procesos en la explotación avícola participante en el proyecto, analizando los consumos térmicos y eléctricos y el porcentaje de demanda que podría ser cubierta con la energía renovable generada.

Para llevar a cabo el estudio técnico-económico se han considerado todas las **entradas y salidas** del proceso. Ha de tenerse en cuenta que como inputs se encuentran el N2 y la electricidad necesaria para mantener el proceso. Habrá por tanto que tener en cuenta los costes de ambos para saber **los costes** asociados al proceso. Por otra parte, como ouptuts, se producen biochar, biooil y un syngas. El interés de este estudio es conocer:

1. Si con la energía producida se podría mantener el consumo actual de la granja de pollos.
2. Conocer el retorno de la inversión para la instalación de una planta de pirólisis en dicha granja teniendo en cuenta todas las ganancias asociadas (venta de biochar como fertilizante).

En el presente informe se incluyen los **resultados de la del estudio técnico-económico** llevado a cabo sobre el proceso de pirólisis de pollinaza. En primer lugar, se presentan los consumos energéticos de la granja A Pendurada, la cual se ha tomado como modelo. Una vez determinada la demanda energética de esta, se ha calculado el potencial de producción de syngas y biochar a partir de la pirólisis a 400ºC, 450ºC y 550ºC. Se presentan además los costes asociados a la producción de biochar a escala laboratorio, en concreto en el horno que se ha empleado en el presente proyecto de investigación. A continuación, se escalarán dichos costes a una planta de producción que pueda tratar la totalidad de los residuos generados por la explotación avícola.

3 Generación de residuos y consumo eléctrico de la granja objeto de estudio

3.1. Cantidad de residuo generado

Teniendo en la explotación ganadera objeto de estudio presente en el presente proyecto superficie agrícola y forestal suficiente para la valorización de los estiércoles, la ausencia de infraestructuras de acceso y la distribución y tamaño de las parcelas, hace poco viable la correcta mecanización de las operaciones necesarias. Es por ello que, después de la salida de los pollos, un **operador autorizado** para la gestión del estiércol procede a la retirada. La pollinaza permanece almacenada en la propia nave hasta la recogida. La recogida no supone ningún coste para la granja, ya que el gestor realiza acopios en estercoleros y posteriormente se reparte en parcelas. Existen regiones en las que se paga por la pollinaza, pero no es el caso del municipio en el que se ubica la granja presente en este proyecto (Baja Limia, Ourense).

En cada camada salen de media 45 m^3 de estiércol, con pesos variable según el grado de humedad, función de las condiciones climáticas. De este modo la producción anual es de aproximadamente de **247,5 m^3 de pollinaza,** con una densidad aproximada de 800kg/m^3. Como se detalla en informes previos, la humedad de los combustibles es sensible a las condiciones ambientales por lo que se tomará como humedad promedio el 30% de la muestra.

Tabla 1. Producción de pollinaza anual

Parámetros	Valor
Producción anual (kg $_{b.h.}$)	198.000
Humedad promedio (%)	30
Producción anual (kg $_{b.s.}$)	138.600
Poder Calorífico Inferior (MJ/kg $_{b.s.}$)	15,565

3.2. Consumo energético

Las granjas avícolas requieren de energía para proveer el máximo confort térmico, calidad del aire y luminosidad adecuada para las aves en las distintas etapas de su desarrollo, independientemente de las condiciones climáticas externas. Las condiciones ambientales apropiadas en el interior del galpón inciden favorablemente en la genética de las camadas, permitiendo obtener un mayor rendimiento en términos del factor de conversión de alimento que relaciona la cantidad de alimento suministrado en el animal con la ganancia de peso producto de esa ingesta.

En general, dentro de una granja avícola **el consumo energético se basa en energía eléctrica y térmica**, siendo la iluminación, la humedad relativa y la temperatura factores claves que han de mantenerse para la maximización del proceso productivo.

Las granjas de broilers o pollos de engorde como es el caso de la estudiada, consumen energía para calefacción (combustibles fósiles o biomasa), ventilación y motores y por último iluminación (en los dos últimos casos mediante energía eléctrica).

3.2.1. Energía térmica consumida.

En el caso que nos ocupa la calefacción se aporta mediante un turbo gas de 50 kW de potencia térmica en el que se combustiona directamente el propano.

Con datos proporcionados por la granja participante en el proyecto se establecerán los consumos térmicos de la granja en kWh/año así como los costes asociados a dicho consumo. En la siguiente tabla se muestra el consumo promedio anual calculado a partir de diciembre de 2020 hasta abril de 2024.

Tabla 2. Energía térmica

	Promedio años 2021-2024
Propano (kg/año)	6.603,60
Coste anual (€/año)	8.740,52
Energía consumida (kWh/año)	85.052,70

El coste de los combustibles fósiles ha sufrido un gran aumento en los últimos años y se prevé que esta tendencia continúe. Según el BOE, el precio estipulado para el propano en el mes de Julio de 2024 ha sido aproximadamente 1,103 €/kg. Teniendo en cuenta el coste asociado al transporte y a la reposición del depósito (con un coste promedio de un 20% sobre la factura del propano) el precio asciende hasta 1,32 €/kg, valor que coincide con el importe promedio pagado por la granja durante el último año. Esto asociado al consumo de la granja avícola se traduce en unos costes de 8.740,52 €.

3.2.2. Energía eléctrica consumida.

El consumo eléctrico de la granja de pollos de engorde se debe principalmente al uso de ventiladores, motores y a la iluminación. En los últimos años se ha optado por ventilación natural con el objetivo de reducir el consumo, lo que ha obtenido excelentes resultados.

Se ha analizado el consumo eléctrico de la granja durante el último año y se ha observado cierta variabilidad en función a la temperatura exterior y al número de camadas. En la siguiente ilustración se muestran los consumos mensuales a lo largo del último año

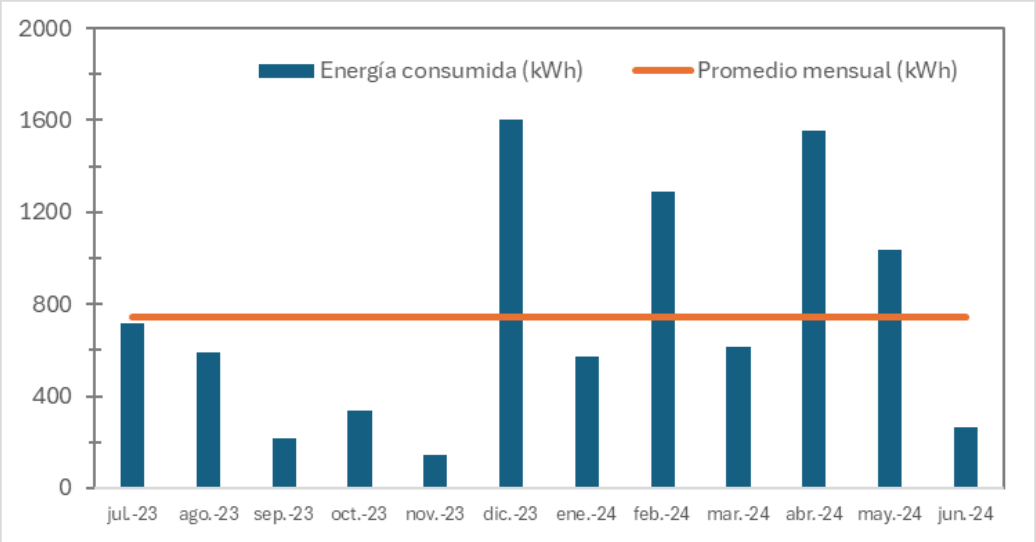


Figura 1. Consumo eléctrico desde julio del 2023 hasta junio del 2024

En la Figura 1, destaca la diferencia en el consumo entre unos meses y otros, habiendo una diferencia de más de 1.000 kWh. El consumo promedio mensual es de 745 kWh y el consumo total anual ha sido de 8.941 kWh. Según el ministerio de Turismo e Industria el coste promedio del kWh durante el año 2023 (incluyendo impuestos ha sido de 0,212 €/kWh, lo que se traducen un gasto anual de 1.895,49 €.

4 Energía renovable obtenida a partir del biocombustible de partida

4.1.1. Energía renovable obtenida a partir del biocombustible

A continuación, se presenta una estimación de la energía renovable que potencialmente podría ser obtenida con la pollinaza objeto de estudio. Ha de tenerse en cuenta que se ha determinado la energía bruta que se necesitaría obtener a partir de los consumos registrados por la granja para cumplir tanto la demanda térmica como eléctrica. Tal y como se muestra en la Figura 2, el consumo eléctrico compone el 9,51% de la demanda energética (**8.941 kWh/año**) mientras que la demanda térmica el 90,49% (**85.053 kWh/año**), suponiendo un total de aproximadamente de **94 MWh/año** de consumo energético.

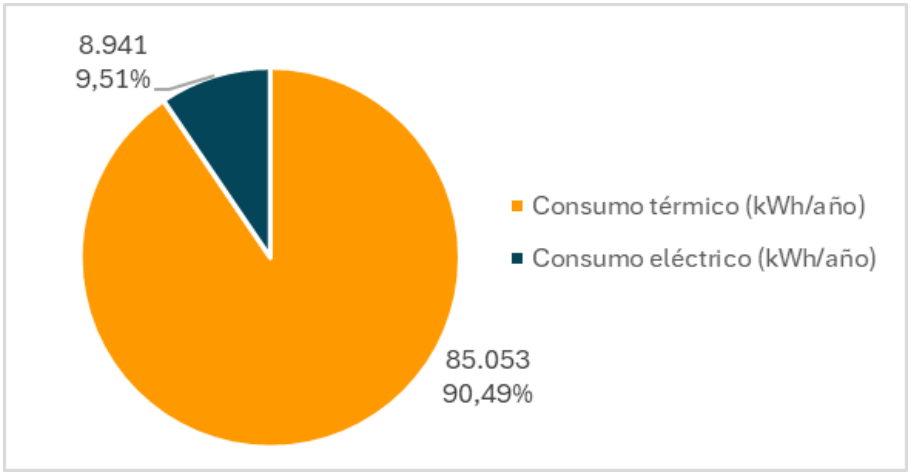


Figura 2. Consumo energético

Teniendo en cuenta una producción de 138,6 $t_{b.s.}$ de pollinaza se ha estudiado a partir de los diferentes ensayos de pirólisis la energía que se puede obtener de los diferentes procesos, así como su consumo y sus rendimientos. Se tomarán como referencia las condiciones de humedad de la biomasa durante los ensayos de pirólisis (7,87%) para una mayor representatividad de los resultados, partiendo así de 149,51 $t_{b.h}$ de combustible de entrada.

Tabla 3. Producción de syngas a partir de la pirólisis a 400ºC , 450ºC y 550ºC.

	400ºC	450ºC	550ºC
Combustible ($t_{b.h.}$)	149,71	149,71	149,71
PCI (kcal/Nm^3)	297,95	103,33	208,27
Porcentaje syngas (%)	35,91%	39,99%	40,59%
Volumen de gas (Nm^3)	42.921,68	47.802,93	50.143,19
Energía obtenida (kWh)	14.863,10	5.740,77	12.137,46

Tal y como se observa en la Tabla 3, se aprecia un diferente comportamiento para las configuraciones de pirólisis estudiadas. En primer lugar, el PCI registrado varía considerablemente, siendo el mayor registrado para la pirólisis realizada a 400ºC (297,95 kcal/Nm^3). Esta variación también es significativa en cuanto al porcentaje de syngas obtenido, resultando los ensayos realizados a 550ºC los que consiguen un mayor índice de producción (40,59%). A partir de estos resultados podemos obtener los potenciales de producción de esta tecnología. El potencial de producción de energía sigue el siguiente orden: 400ºC (14,86 MWh) >550ºC (12,14 MWh) > 450ºC (5,74 MWh).

No obstante, existen pérdidas durante la transformación (energía térmica o energía eléctrica), que variarán en función del equipo empleado. En el presente informe no se tendrán en cuenta estos rendimientos de producción ya que se tomará en cuenta sólo los consumos energéticos.

En informes precedentes se mostró el proceso de secado natural de la pollinaza en la propia granja. Se demostró que, empleando un procedimiento de secado natural exponiendo la pollinaza a las condiciones climáticas existentes el contenido en humedad podría alcanzar valores aceptables para el proceso de pirolisis (<20%)[1] en mayor o menor tiempo en función de las condiciones climáticas.

Si bien es cierto que las experiencias con aireación forzada reducen de forma significativa los tiempos de secado, lo cierto es que el ahorro del proceso por oreo natural permite minimizar los costes del granjero, obteniendo beneficios de la valorización termoquímica posterior de la pollinaza por lo que **no se considerarán costes de secado en el presente documento.**

Teniendo en cuenta la pollinaza y su poder calorífico en base seca (PCI= 15,33-15,80 MJ/kg según la cama de los animales empleada sea de viruta de madera o cáscara de arroz, respectivamente), determinado en el informe del presente proyecto de investigación con título “Informe de caracterización de la pollinaza” se han obtenido la energía térmica (equivalente a la energía bruta) y eléctrica que potencialmente podrían obtenerse. La densidad considerada de la pollinaza es de 800 kg/m^3 [2]. Si bien la humedad del residuo dependerá de la época del año, teniendo en cuenta las camas empleadas se considera para los cálculos un promedio de un 30%, basado en los datos recogidos en la graja estudio los cuales concuerdan con la bibliografía encontrada [3].

4.1.2. Porcentaje de energía cubierta frente a la demandada

Según los datos obtenidos de energía consumida en la granja y energía obtenida en forma de syngas tras la pirólisis de la pollinaza, el combustible gas generado no podría cubrir la totalidad del consumo de la granja, pero sí reducir su consumo energético notablemente. En la siguiente figura se observan los tres casos de pirólisis de gallinaza estudiados.

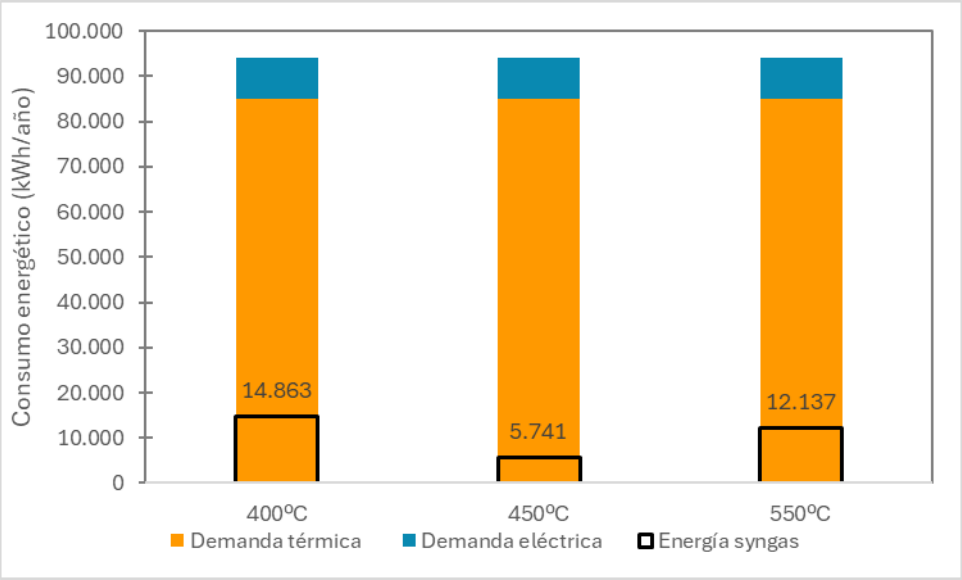


Figura 3. Consumo cubierto por el syngas

En la Figura 3 se observa como la pollinaza producida a menor temperatura es aquella con mejores resultados con una producción de syngas próxima a 14.863 kWh, siendo este valor el 15,81% de la energía total (térmica y eléctrica) consumida. La producción energética de los otros dos casos se mantiene en valores de 5.741 kWh (6,11%) para la pirólisis a 450ºC y 12.137 kWh (12,91%) para 550ºC. Cabe destacar que estos porcentajes no incluyen rendimientos de producción de los equipos por lo que este análisis sólo indicará la opción energéticamente más viable. Como se observa claramente en la Ilustración anterior y como ya se ha explicado con mayor profundidad en el informe de pirólisis, la opción más viable es la valoración de biochar a 400ºC por lo que se tomará como el único caso viable.

4.1.3. Biochar generado en la pirólisis.

El biochar es un tipo de carbón vegetal que se obtiene de restos vegetales y de residuos de biomasa. Este material en combinación con fertilizantes incrementa y estimula notablemente la actividad microbiana además de contribuir al secuestro de carbono en la atmósfera almacenándolo en el suelo durante mucho tiempo. Además, el biochar ayuda a regular el pH de los suelos muy ácidos y mejora sus propiedades físicas y químicas.



Bichar 550ºC Biochar 450ºC Biochar 400ºC

Figura 4. Muestras de biochar producidas a diferentes temperaturas

En el horno pirolítico, se ha estudiado la conversión de la pollinaza a biochar a diferentes temperaturas, se recogen las ilustraciones de las muestras en la Figura 4. Los resultados acerca de la cantidad de biochar generado han sido los siguientes:

Tabla 4. Producción de biochar.

	400ºC	450ºC	550ºC
Combustible (t $_{b.h.}$)	149,71	149,71	149,71
Porcentaje de biochar (%)	43,18%	39,17%	38,77%
Biochar generado (t)	64,55	58,56	57,96

Como se observa en la Tabla 4, las condiciones de ensayo en donde se obtiene una mayor cantidad de biochar ha sido en los ensayos realizados a 400ºC, en dónde su potencial de producción asciende hasta las 64,55 t. La siguiente muestra con una mayor producción han sido los ensayos realizados a 450ºC (58,56 t) y por último aquellos a 550ºC (57,96 t).

4.1.4. Indicadores económicos y parámetros de viabilidad

A continuación, se presenta la **tasa de retorno** o ganancia respecto a una inversión durante un período de tiempo para la **opción de valorización** empleada. Se calculará para el caso de pirólisis realizada a 400ºC ya que ha sido la que ha mostrado los mejores resultados

En base a los cálculos realizados a partir del consumo energético de la granja, se ha estimado que la mejor alternativa es el aprovechamiento térmico del syngas mediante su uso directo en un turbo gas de 50 kW alimentado por el syngas producido en la pirólisis. No se ha contemplado su transformación energética a electricidad debido a los altos costes de inversión en equipos, a su compleja operabilidad y a los bajos rendimientos energéticos en comparación con su transformación térmica.

Debido a que la cantidad de toneladas necesarias de pollinaza para cubrir la demanda térmica de 85 MWh/anuales sería de 876,66 $t_{b.s.}$, se ha presentado este sistema como algo complementario con el objetivo de reducir el consumo de propano. Se ha estimado el tratamiento del total del residuo generado (198 $t_{b.h.}$) durante un año en la granja.

4.1.4.1. COSTES

Los costes que conllevaría el valorizar la pollinaza mediante pirólisis, serían:

1. Coste del transporte y almacenamiento.
2. Pretratamiento (triturado y secado).
3. Coste del personal de retirar pollinaza.
4. Coste de los equipos.
5. Consumo de los equipos.

Una de las ventajas de esta tecnología es que sería la propia granja la que gestionaría su residuo, eliminando así el coste de gestión asociado a éste. No sólo esto, sino que estaría produciendo un biochar con un alto valor agronómico. En cuanto al almacenamiento no se ha tenido en cuenta debido al gran espacio y a las infraestructuras cubiertas con las que cuenta la granja.

Considerando el precio de una planta de pirólisis promedio con una capacidad de 4-6 toneladas por proceso se encuentra a partir de los 40.000€. El precio aproximado para un depósito de gases es de 4.500€ y para un quemador tipo turbo gas de 50kWh, no supera los 500€. Todo ello suma una inversión inicial en los equipos de aproximadamente 45.000€.

En cuanto a los consumos de la planta de pirólisis destacan el consumo eléctrico de los equipos y el gasto de las botellas de N_2 necesarias para inertizar la cámara de combustión. Dado que la potencia de estos equipos está en torno a los 20 kW, teniendo en cuenta el tiempo de residencia (1h), la velocidad de calentamiento (5ºC/min) y las capacidades promedio de los equipos, se traduce en un consumo aproximado de 1.120 kWh/año (237,44 €/año). Respecto a las botellas necesarias de N_2 se estima que sean necesarias, su alquiler junto al transporte a la planta estaría en torno a los 5.000 €/año.

Por otra parte, el coste del personal de retirar la pollinaza se considerará nulo ya que el trabajo pasaría de cargar este material para su transporte a ser cargado en el horno pirolítico. Se tendrá en cuenta los gastos de mantenimiento y reparaciones para este tipo de infraestructuras con un valor del 2% anual del coste de los equipos, suponiendo esto así unos 900 €/año.

Los costes de secado se considerarán dentro del pretratamiento y adecuación de la materia prima, considerando las horas de personal (1 semana) y el uso de una carretilla y un tractor (alquiler por hora una semana). El secado se llevará a cabo de un modo natural ya que, como se presentó en el anterior "Informe proceso de secado natural", se considera la opción idónea, permitiendo ahorrar los costes del secado forzado. En los costes de triturado se incluyen aquellos que conllevan el alquiler del molino con la capacidad de tratamiento necesaria para la cantidad objeto de estudio durante una semana. Finalmente, se han considerado alquileres y no compras porque con las pocas horas de uso de la maquinaria necesaria al año, incrementar el gasto asociado a equipos haría inviable el proceso de amortización.

4.1.4.2. INGRESOS

En cuanto a los ingresos se puede considerar que estos proceden de las siguientes fuentes:

- Venta o ahorro de fertilizante: Como se ha comentado, se produce un biochar de alto valor fertilizante y capaz de mejorar las características de los suelos cuando se aplica en los cultivos. Por lo tanto, se podría obtener un ingreso adicional por la venta de este subproducto. Cabe destacar que sería necesario desarrollar una red de mercado para él mismo, actualmente se estima que tiene un valor aproximado en el mercado europeo de 150 €/tonelada [4,5] lo que se traduciría en un valor de producción de 9.600 €/año. Esto sumado al menor coste asociado al transporte debido a la reducción del volumen de la pollinaza supone uno de los mayores aportes económicos al proceso.

- Ahorro de energía: En este caso, los ingresos son derivados del ahorro de la energía térmica autoconsumida proveniente de la utilización del syngas generado a partir del proceso de pirólisis. Esto permitiría ahorrar cerca de 15 MWh/año reduciendo la factura térmica en 1.572,42 €

Tabla 5. Indicadores económicos

Año	1
Gastos fijos (€)	6.137,44
Gastos amortización equipos (€)	4.500,00
A - Total gastos al año (€)	10.637,44
B – Ahorro de gas y venta de biochar (€)	11.211,04
Ahorro (B-A), (€)	**573,60**

4.2. Análisis técnico-económico con la planta piloto empleada en el proyecto

A fin de establecer el desempeño tecno-económico del proceso, se considera indispensable una adecuada descripción de todo el proceso implicado. En base a ello, se muestra a continuación en la Figura 5, el diagrama del proceso de producción de biochar a partir de gallinaza:

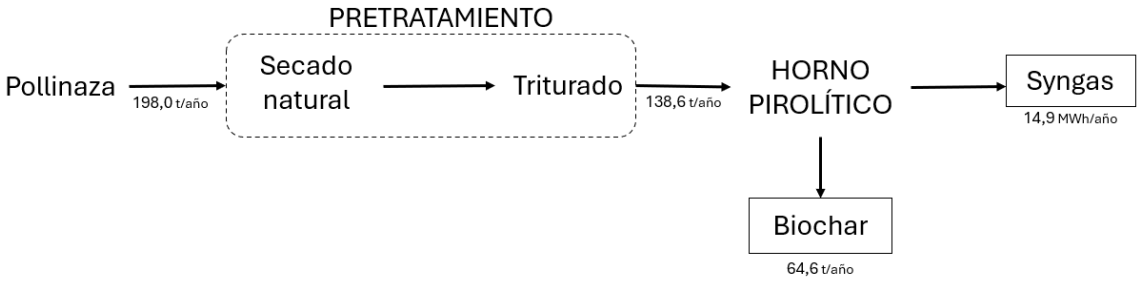


Figura 5. Diagrama del proceso

En base a los ensayos realizados en la planta piloto se ha estudiado el coste asociado a la producción de un kg de biochar a escala laboratorio con un fin comparativo y conocer así el proceso de producción de biochar con el menor coste asociado.

Tabla 6. Costes totales de la producción de 1 kg de biochar a 400 ºC.

FABRICACIÓN	COSTE BIOCHAR (€/Kg)
Materias primas	34
Consumo energético	5
Mano de obra	127
Total (€/Kg biochar)	167

Tabla 7. Costes totales de la producción de 1 kg de biochar a 450 ºC

FABRICACIÓN	COSTE BIOCHAR (€/Kg)
Materias primas	42
Consumo energético	8
Mano de obra	144
Total (€/Kg biochar)	193

Tabla 8. Costes totales de la producción de 1 kg de biochar a 550 ºC

FABRICACIÓN	COSTE BIOCHAR (€/Kg)
Materias primas	54
Consumo energético	10
Mano de obra	150
Total (€/Kg biochar)	214

Tabla 9. Costes totales de la producción de 1 kg de biochar a 550 ºC (45 min)

FABRICACIÓN	COSTE BIOCHAR (€/Kg)
Materias primas	54
Consumo energético	9
Mano de obra	150
Total (€/Kg biochar)	213

Para facilitar la comprensión de los resultados de una forma más visual, se han representado los valores de las tablas anteriores en cuatro gráficos. En dicha representación gráfica, se distingue con claridad que el coste de mayor incidencia recae en la partida de mano de obra. En este contexto, es importante destacar que la materia prima se considera un residuo, lo que implica un coste nulo asociado. Por lo tanto, el coste atribuido a las materias primas se deriva del consumo de N_2, mientras que el consumo energético del horno tubular se mantiene en niveles muy bajos, variando entre 3,9 y 6,3 kWh, dependiendo del proceso específico en cuestión.

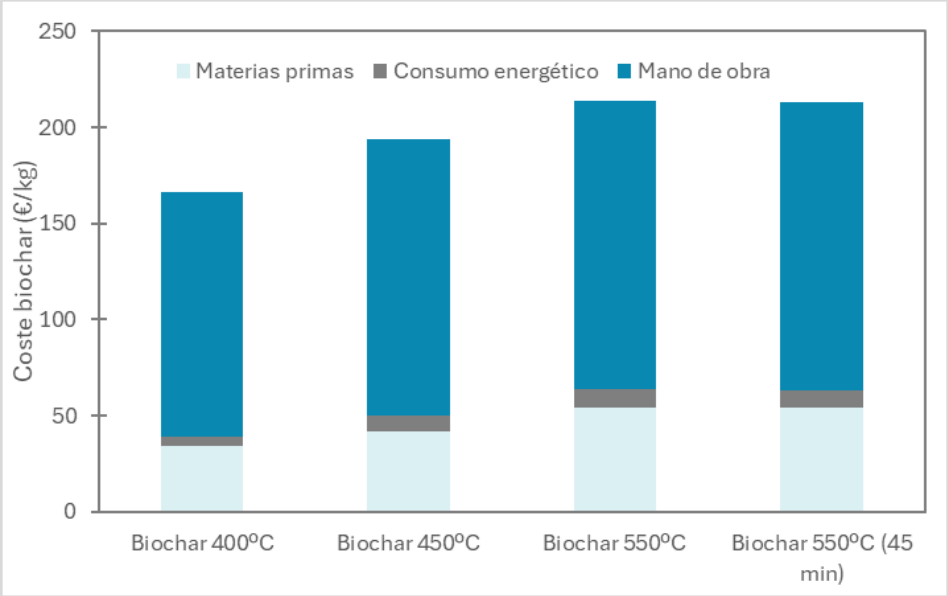


Figura 6. Costes totales de cada proceso de fabricación de 1 kg de biochar

Como se puede observar en la Figura 6, los costes de producción de 1 kg de biochar a escala laboratorio, aunque sus valores no son escalables para las condiciones de operación de la granja de A Pendurada, esto nos aporta información sobre el coste relativo de las diferentes condiciones operacionales. Bajo esta comparativa destaca la pirólisis realizada a 400ºC como aquella con el menor coste asociado.

5 Conclusiones

Con el objetivo de evaluar la viabilidad técnico-económica de la instalación de una planta pirolítica en la granja estudiada se han analizado los consumos eléctricos y térmicos de la granja, así como el residuo generado. Asimismo, se ha evaluado el potencial de generación de energía renovable y biochar a partir de la pirólisis de pollinaza estableciendo así el porcentaje de energía térmica cubierta con el proceso y la valorización de biochar como un eficaz fertilizante. Por último, se han establecido los principales indicadores económicos para la granja establecida como modelo y bajo las condiciones de operación consideradas como óptimas (pirólisis a 400ºC con un tiempo de residencia de 1h). De los resultados obtenidos se puede concluir que:

- La cantidad de residuo generado anualmente por la granja es de aproximadamente 198 t con una humedad promedio del 30%.
- Mediante un proceso de secado natural se consigue reducir su contenido en humedad hasta valores admisibles para su empleo como combustible en el proceso de pirólisis (<20%).
- Los consumos energéticos (tanto eléctricos como térmicos) registrados en ellos últimos años en la granja objeto de estudio han sido:
    - 85.052 kWh/año en consumo térmico en forma de propano.
    - 8.941 kWh/año en consumo eléctrico.

- Debido al notablemente superior consumo térmico y a las mayores eficiencias y sencillez de conversión a calor de la tecnología, se ha contemplado el reaprovechamiento del syngas para su conversión a energía térmica. Comparando las diferentes tecnologías de pirólisis, la que presenta los mejores resultados ha sido la realizada a 400ºC, consiguiendo reducir en un 17,5% (14.863 kWh/año) la demanda en energía térmica.
- En el caso de la producción de biochar a partir de la totalidad de residuos generados, la mayor producción se ha observado para la pirólisis a 400ºC estimando su producción anual en 64,4 t/año de este producto de gran valor.
- La pirólisis a 400ºC ha mostrado los mayores índices tanto en la producción de energía térmica como en la producción de biochar además de ser la tecnología con el menor coste asociado. Por ende, el estudio de viabilidad de la planta de pirólisis se ha realizado en base a estas condiciones operacionales.
- Los indicadores económicos muestran que la viabilidad económica de los procesos de valorización es limitada si se trabaja con instalaciones de pequeño tamaño, ya que se ven afectados por la economía de escala. Por ejemplo, los costes anuales (fijo + amortización) superan con creces el ahorro relacionado con la reducción en el consumo en energía térmica, dependiendo así de la venta del biochar. Esto se traduce en una dependencia de la rentabilidad de esta instalación de un mercado, aunque prometedor, actualmente en desarrollo. Bajo estas condiciones, sería preferible la **gestión centralizada de estos residuos**, lo que permitiría reducir el tiempo de amortización y crear una red de distribución del biochar, convirtiéndolo así en una alternativa real a los fertilizantes químicos empleados actualmente en la agricultura.

6 Anexo – Lista de referencias

6.1. Índice de tablas

Tabla 1. Producción de pollinaza anual 4
Tabla 2. Energía térmica 5
Tabla 3. Producción de syngas a partir de la pirólisis a 400ºC , 450ºC y 550ºC. 7
Tabla 4. Producción de biochar. 9
Tabla 5. Indicadores económicos 11
Tabla 6. Costes totales de la producción de 1 kg de biochar a 400 ºC. 12
Tabla 7. Costes totales de la producción de 1 kg de biochar a 450 ºC 12
Tabla 8. Costes totales de la producción de 1 kg de biochar a 550 ºC 13
Tabla 9. Costes totales de la producción de 1 kg de biochar a 550 ºC (45 min) 13

6.2. Índice de figuras

Figura 1. Consumo eléctrico desde julio del 2023 hasta junio del 2024 6
Figura 2. Consumo energético 7
Figura 3. Consumo cubierto por el syngas 8
Figura 4. Muestras de biochar producidas a diferentes temperaturas 9
Figura 5. Diagrama del proceso 12
Figura 6. Costes totales de cada proceso de fabricación de 1 kg de biochar 14

6.3. Índice de referencias

1 Li, Y., Yu, H., Liu, L., & Yu, H. (2021). Application of co-pyrolysis biochar for the adsorption and immobilization of heavy metals in contaminated environmental substrates. *Journal of Hazardous Materials*, 420, 126655. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.126655

2 Pareja, M. M. E. (2005). Manejo y procesamiento de la gallinaza. *Revista Lasallista de Investigación*, 2(1), 43-48.

3 Rico-Contreras, J.O. & Aguilar-Lasserre, A.A. & Méndez-Contreras, Juan & Cid-Chama, G. & Alor-Hernández, Giner. (2014). Predicción del contenido de humedad en la pollinaza para estimar la producción de bioenergía a través de una red neuronal artifici.al. Revista mexicana de ingeniería química. 13. 933-955.

4 Vochozka, M., Marouškova, A., Váchal, J. *et al.* Biochar pricing hampers biochar farming. *Clean Techn Environ Policy* 18, 1225–1231 (2016).

5 Aguado, R.; Vera, D.; López-García, D.A.; Torreglosa, J.P.; Jurado, F. (2021) Techno-Economic Assessment of a Gasification Plant for Distributed Cogeneration in the Agrifood Sector. *Appl. Sci.*, *11*, 660. https://doi.org/10.3390/app11020660



Área de Bioenergía

energylab@energylab.es

Edificio CITEXVI

Fonte das Abelleiras, s/n. 36310, Vigo.

T_986 12 04 50 F_986 12 04 51

energylab@energylab.es

www.energylab.es

centro tecnolóxico da carne

galicia

ENSAYO DE FERTILIZACION EN PATATA APROAVI 2023-2024

FUNDACIÓN CENTRO TECNOLÓXICO DA CARNE

Departamento: Investigación agronómica

CIF: G 32273427 Rexistro Único de Fundacións de Interese Galego Nº 2003/28

ENSAYO FERTILIZACION PATATA EN A LIMIA APROAVI-2023-2024

Índice de contenidos.

1. OBJETIVOS DEL ENSAYO. 4

1.1. ENSAYO PATATA: POLLINAZA vs DIGESTATO vs QUIMICA 2023 4

1.2. ENSAYO FERTILIZACION CON BIOCHAR OBTENIDO A DIFERENTES TEMPERATURAS DE PIROLISIS. 4

1.3. ENSAYO PATATA POLLINAZA vs. DIGESTATO vs. QUIMICA 2024 5

2. MATERIAL Y METODOS ENSAYO PATATA 2023. 5

2.1. LOCALIZACIÓN Y DISTRIBUCIÓN DE LOS ENSAYOS 2023. 5

2.2. EVALUACIÓN DE COSECHA 6
2.2.1. Producción bruta. 6
2.2.2. Producción comercial. 6
2.2.3. Materia seca. 6
2.2.4. Variedad Kennebec. 7

2.3. ENSAYO PATATA POLLINAZA-DIGESTATO-QUÍMICA 2023. 8

2.4. ENSAYO PATATA BIOCHAR 2023. 8

2.5. ENSAYO POLLINAZA VS. DIGESTATO VS. QUÍMICA 2024 9

3. RESULTADOS DEL ENSAYO DIGESTATO POLLINAZA QUIMICA 2023 9

3.1. CLIMATOLOGÍA DURANTE EL ENSAYO DIGESTATO-POLLINAZA-QUÍMICA 2023. 9

3.2. ANÁLISIS DE SUELO DEL LUGAR DE ENSAYO DIGESTATO-POLLINAZA-QUÍMICA 2023. 11

3.3. TESIS ENSAYO DIGESTATO-POLLINAZA-QUÍMICA 2023 11
3.3.1. Análisis del digestato y pollinaza utilizados ensayos 2023 11
3.3.2. Dosis de abonado según tesis ensayo digestato-pollinaza-química 2023. 12
3.3.3. Producción bruta, comercial, Ensayo Digestato-Pollinaza-Química 2023. 13
3.3.4. Tanto por ciento de materia seca. 14

3.4. CONCLUSIONES. ENSAYO DIGESTATO-POLLINAZA-QUIMICA 2023 14

4. RESULTADOS DEL ENSAYO BIOCHAR 2023 15

4.1. CLIMATOLOGÍA DURANTE EL ENSAYO BIOCHAR 2023. 15

4.2. ANÁLISIS DE SUELO DEL LUGAR DE ENSAYO BIOCHAR 2023. 16

4.3. TESIS ENSAYO BIOCHAR 2023 16
4.3.1. Análisis del Biochar 17
4.3.2. Dosis de abonado según tesis. 18

4.4. PRODUCCIÓN BRUTA, COMERCIAL, %DESTRÍO, ENSAYO BIOCHAR 2023. 19
4.4.1. Tanto por ciento de materia seca biochar. 20

4.5. CONCLUSIONES ENSAYO BIOCHAR 2023. 21

5. RESULTADOS ENSAYO POLLINAZA-DIGESTATO-QUIMICA 2024 22

5.1. CLIMATOLOGÍA DURANTE EL ENSAYO 2024 22

5.2. ANALISIS DEL LUGAR DE ENSAYOS 2024. 23

5.3. ANÁLISIS DE DIGESTATO Y POLLINAZA UTILIZADOS EN EL ENSAYO 2024 23

5.4. PRODUCCIÓN BRUTA Y COMERCIAL OBTENIDAS ENSAYO PATATA 2024. % DESTRÍO. 24

5.6. CONCLUSIONES ENSAYO PATATA 2024 25

6. ANEXO FOTOGRAFICO. 27

CIF: G 32273427 Rexistro Único de Fundacións de Interese Galego Nº 2003/28

Índice de gráficas

Gráfica 1: precipitación acumulada y temperatura media ensayo digestato-pollinaza-química 2023. 10
Gráfica 2: producción bruta estimada kg/ha Digestato-pollinaza química . 13
Gráfica 3: producción comercial estimada kg/ha Digestato-pollinaza química . 13
Gráfica 4: % de destrío estimado Digestato-pollinaza química. 14
Gráfica 5: % de materia seca Digestato-pollinaza química 14
Gráfica 6: precipitación acumulada y temperatura media ensayo biochar 2023. 16
Gráfica 7: producción bruta estimada kg/ha biochar . 19
Gráfica 8: producción comercial estimada kg/ha biochar . 20
Gráfica 9: % de destrío estimado biochar. 20
Gráfica 10: % de materia seca biochar 20
Gráfica 11: precipitación acumulada y temperatura media ensayo patata 2024. 22
Gráfica 12: producción bruta y comercial del ensayo patata 2024. 24
Gráfica 13: tanto por ciento de destrio ensayo patata 2024 25

Índice de Ilustraciones.

Ilustración 1: plano de situación de la parcela de ensayos. 6
Ilustración 2: análisis digestato utilizado ensayo patata 2024 23
Ilustración 3: ensayo patata 2023 en contenedores de fieltro 27
Ilustración 4: nascencia patata kennebec 2023 27
Ilustración 5: ensayo biochar patata 2023 28
Ilustración 6: estado ensayo digestato 2023 28
Ilustración 7: ensayo patata pollinaza-digestato-química 2024 aplicación de fertilizantes 29
Ilustración 8: siembra ensayo pollinaza-digestato-química 2024 29
Ilustración 9: estado del cultivo agosto 2024 30
Ilustración 10: toma de datos agosto 2024 ensayo pollinaza-digestato-química 2024 30

Índice de Tablas.

Tabla 1: Características variedad de patata Kennebec 8
Tabla 2: temperaturas durante el desarrollo del tubérculo ensayo digestato-pollinaza-química. 10
Tabla 3: análisis de suelo del lugar de ensayo. 11
Tabla 4: análisis pollinaza. 12
Tabla 5: dosis de fertilizado según tesis. 13
Tabla 6: temperaturas durante el desarrollo del tubérculo 2023 16
Tabla 7: análisis de suelo del lugar de ensayo. 16
Tabla 8: análisis del biochar B-400 17
Tabla 9: análisis del biochar B-450 18
Tabla 10: análisis del biochar B-500 18
Tabla 11: dosis de fertilización ensayo biochar 18
Tabla 12: temperaturas durante el desarrollo del tubérculo 2024 22
Tabla 13: análisis de suelo del lugar del ensayo patata 2024 23
Tabla 14: análisis de la pollinaza utilizada en el ensayo patata 2024 24

CIF: G 32273427 Rexistro Único de Fundacións de Interese Galego Nº 2003/28

1. OBJETIVOS DEL ENSAYO.

1.1. ENSAYO PATATA: POLLINAZA vs DIGESTATO vs QUIMICA 2023

Evaluar los efectos de diferentes fuentes de fertilización (pollinaza, digestato y fertilizantes químicos) en el rendimiento y la calidad del cultivo de patata Kennebec, una variedad ampliamente cultivada por su alto rendimiento y calidad culinaria.
El presente trabajo dentro del proyecto APROAVI tiene por objeto probar diferentes fertilizantes en cultivo de patata, que forman parte del aprovechamiento de residuos de ganadería, así el digestato proveniente de la extracción de energía (biogas) y el biochar residuo final tras el quemado de biomasa; se intentan reintroducir en la agricultura por su poder fertilizante y/o como enmienda. Así se planteó un ensayo que consistió en testar el poder fertilizante sobre cultivo de patata Kennebec. Se hicieron tomas de datos para alcanzar los objetivos siguientes:

- Cuaderno de campo con fechas, dosis, tratamientos fitosanitarios y riegos.
- Análisis de cosecha realizado sobre mediciones en los dos surcos de plantación en los que se tomarán datos de la producción total y reparto de calibres <40mm, de 40 a 80mm y >85mm. Además de la producción comercial y destrío, así como el peso medio por tubérculo y número de tubérculos por kilogramo.
- Análisis de calidad de que consta de :
    - Materia seca.
    - Incidencia de enfermedades y defectos en piel y carne (sarna, manchas de hierro, corazón hueco y negro, rhizoctonia, sarna plateada, deformes, podredumbres húmedas y secas, segundos crecimientos, agrietados) y el reparto de los mismos sobre el total del destrío.

1.2. ENSAYO FERTILIZACION CON BIOCHAR OBTENIDO A DIFERENTES TEMPERATURAS DE PIROLISIS.

Este ensayo tiene como objetivo comparar los efectos de diferentes tipos de biochar, producidos a partir de diversas temperaturas de incineración, en el cultivo de patata Kennebec, en comparación con un tratamiento testigo fertilizado con productos químicos convencionales. Se busca evaluar los efectos en la cantidad y calidad de los tubérculos producidos, manteniendo un aporte similar de nutrientes entre los tratamientos. El ensayo se llevará a cabo utilizando contenedores individuales, cada uno con una planta de patata Kennebec. Esto permite un control preciso de los factores experimentales, como la cantidad de nutrientes y el riego. Se compararán tres tipos de biochar y un fertilizante químico como testigo, aplicando las mismas dosis de nutrientes en cada tratamiento.

CIF: G 32273427 Rexistro Único de Fundacións de Interese Galego Nº 2003/28

1.3. ENSAYO PATATA POLLINAZA vs. DIGESTATO vs. QUIMICA 2024

Evaluar los efectos de diferentes fuentes de fertilización (pollinaza, digestato y fertilizantes químicos) en el rendimiento y la calidad del cultivo de patata Agria, una variedad ampliamente cultivada por su alto rendimiento y calidad culinaria.
Así se planteó un ensayo que consistió en testar el poder fertilizante sobre cultivo de patata Agria en parcelas ocho surcos de ancho y 10 metros de largo. Se hicieron tomas de datos para alcanzar los objetivos siguientes:

- Cuaderno de campo con fechas, dosis, tratamientos fitosanitarios y riegos.

- Análisis de cosecha realizado sobre mediciones en los dos surcos de plantación en los que se tomarán datos de la producción total y reparto de calibres <40mm, de 40 a 80mm y >85mm. Además de la producción comercial y destrío, así como el peso medio por tubérculo y número de tubérculos por kilogramo.

- Análisis de calidad de que consta de :
    - Materia seca.
    - Incidencia de enfermedades y defectos en piel y carne (sarna, manchas de hierro, corazón hueco y negro, rhizoctonia, sarna plateada, deformes, podredumbres húmedas y secas, segundos crecimientos, agrietados) y el reparto de los mismos sobre el total del destrío.

2. MATERIAL Y METODOS ENSAYO PATATA 2023.

2.1. LOCALIZACIÓN Y DISTRIBUCIÓN DE LOS ENSAYOS 2023.

Los ensayos se realizaron en la parcela 1568 del polígono 502 de Sandiás en Ourense en contenedores individuales de 25 a 30 litros de fieltro para ser rellenados con sustrato y semilla de cada tesis, el material permite aislar a cada planta del entorno sin que se impida aportes de agua y conserven las mismas condiciones que el resto de la parcela, en régimen de regadío y en la posición que indica la imagen al pie:

CIF: G 32273427 Rexistro Único de Fundacións de Interese Galego Nº 2003/28



Ilustración 1: plano de situación de la parcela de ensayos.

2.2. EVALUACIÓN DE COSECHA

Fueron recolectados los contenedores sembrados para proceder a analizar la calidad y producción de la cosecha.

2.2.1. Producción bruta.

Se pesó la patata recogida que datos se extrapolaron para obtener la producción bruta de patata por hectárea.

2.2.2. Producción comercial.

Para el cálculo de la producción comercial se restó a la producción bruta el peso del destrío. En este caso el destrío computó con aquellos defectos que invalidan el tubérculo para su venta posterior:

- Pequeños <40mm.
- Grandes >85 mm.
- Agrietados.
- Huecos.
- Deformes.
- Segundos crecimientos
- Podredumbre seca y húmeda

2.2.3. Materia seca.

La determinación de la materia seca en patata mediante un liofilizador es una técnica efectiva que permite eliminar la humedad de los tubérculos sin dañar sus componentes, obteniendo un valor preciso de la materia seca. Proporciona un

CIF: G 32273427 Rexistro Único de Fundacións de Interese Galego Nº 2003/28

análisis preciso del contenido de sólidos en la patata. Esta información es fundamental para evaluar la calidad del cultivo, especialmente en estudios comparativos donde se analizan diferentes tipos de fertilización o condiciones de crecimiento. El proceso de determinación de materia seca en patata mediante liofilización es el siguiente:

- Muestreo:

Se seleccionan tubérculos representativos de la cosecha para asegurar que el análisis refleje la situación general del lote. Las patatas se cortan en rodajas finas o cubos pequeños para facilitar el proceso de liofilización y asegurar una eliminación uniforme del agua.

- Congelación:

Los trozos de patata se congelan rápidamente a temperaturas muy bajas (generalmente entre -40 °C y -80 °C) para evitar la formación de cristales grandes que puedan alterar la estructura celular. Este paso es crucial para preservar las propiedades físicas y químicas del material.

- Liofilización:

Una vez congeladas, las muestras se colocan en el liofilizador, donde se someterán a un proceso de sublimación. La liofilización implica la eliminación de agua en su estado sólido (hielo) mediante la aplicación de un vacío elevado y un aumento gradual de la temperatura. Este proceso evita el paso por el estado líquido, lo que permite que el material conserve su estructura y composición originales.

- Peso seco:

Después del proceso de liofilización, las muestras se pesan para obtener su peso seco. Comparando este valor con el peso inicial de las muestras frescas, se puede calcular el porcentaje de materia seca.

- Cálculo de Materia Seca:

El porcentaje de materia seca (%MS) se determina mediante la la fórmula en la que se divide el peso seco después de liofilizar y el peso en fresco antes de liofilizar expresado en tanto por cien.

- Implicaciones de la Materia Seca en Patatas:

La materia seca es un parámetro crucial en la calidad de la patata, ya que está relacionada con su valor nutricional y características para procesado (por ejemplo, para la producción de patatas fritas o puré). Valores altos de materia seca (superiores al 20-22%) suelen ser deseables para productos como patatas fritas, ya que implican menor contenido de agua y, por lo tanto, menor absorción de aceite durante la fritura.

En este ensayo, la liofilización es una técnica ideal, ya que preserva la composición química de la muestra y permite una determinación precisa de la cantidad de sólidos presentes en el tubérculo, sin pérdida de nutrientes o alteración estructural significativa.

2.2.4. Variedad Kennebec.

Los ensayos se realizaron sobre variedad de patata Kennebec, muy implantada

CIF: G 32273427 Rexistro Único de Fundacións de Interese Galego Nº 2003/28

en a Limia y amparada por la Indicación Xeográfica Pataca de Galicia:

Destino	Mercado fresco
Uso:	Consumo cocida y fritura casera
Madurez:	Medio temprano a medio tarde
Follaje:	Alto y verde tenue
Forma del tubérculo:	Pocos tubérculos ovalados grandes y redondos a redondos.
Color de piel:	Amarillo
Color de carne:	Blanco
% materia seca:	Medio entre 18-20%
Periodo de latencia:	Mediano a largo, buena capacidad de almacenamiento.
Nematodos:	Susceptible
Sarna común:	Susceptible
Cultivo:	Planta fuerte con buena resistencia al calor y la sequía.

Tabla 1: Características variedad de patata Kennebec

CIF: G 32273427 Rexistro Único de Fundacións de Interese Galego Nº 2003/28

2.3. ENSAYO PATATA POLLINAZA-DIGESTATO-QUÍMICA 2023.

En este ensayo se compararon los efectos de la pollinaza y del digestato en cultivo de patata Kennebec en comparación con un testigo fertilizado con química. Para este ensayo se analizaron el digestato y la pollinaza recibidos para plantear una prueba en la que se hicieran aportes similares de nutrientes a las patatas y ver los efectos en cantidad y calidad sobre las patatas sembradas. El ensayo utilizando contenedores individuales para cultivar una planta por contenedor, aportando en cada tesis la cantidad de nutrientes similar, así se hizo el reparto de digestato, pollinaza y química en cuatro repeticiones por tesis

2.4. ENSAYO PATATA BIOCHAR 2023.

Este ensayo tuvo como objetivo comparar los efectos de diferentes tipos de biochar, producidos a partir de diversas temperaturas de incineración, en el cultivo de patata Kennebec, en comparación con un tratamiento testigo fertilizado con productos químicos convencionales. Se buscó evaluar los efectos en la cantidad y calidad de los tubérculos producidos, manteniendo un aporte similar de nutrientes entre los tratamientos. El ensayo se llevó a cabo utilizando contenedores individuales, cada uno con una planta de patata Kennebec. Esto permitió un control preciso de los factores experimentales, como la cantidad de nutrientes y el riego. Se compararon tres tipos de biochar y un fertilizante químico como testigo, aplicando las mismas dosis de nutrientes en cada tratamiento.

- T1: Biochar a 400°C
- T2: Biochar a 450°C
- T3: Biochar a 500°C
- T4: Fertilización química (Testigo)

Cantidad de nutrientes: Los diferentes biochar fueron analizados previamente para determinar su contenido de nutrientes, y así ajustar las dosis de aplicación para igualar los aportes de nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K) en todos los tratamientos.

Repeticiones: cada tratamiento fue replicado cuatro veces, con un total de cuatro repeticiones por tesis.

Parámetros evaluados:

- Rendimiento: Cantidad total de patatas producidas (kg por planta y extrapolado a kg/ha).
- Calidad de los tubérculos: Evaluación de la apariencia, textura y posibles defectos en la piel, como agrietamientos, manchas o deformidades.

2.5. ENSAYO POLLINAZA VS. DIGESTATO VS. QUÍMICA 2024

En el presente ensayo se llevó a cabo una comparación exhaustiva de los efectos de la pollinaza y del digestato en el cultivo de patata agria, en contraste con un testigo fertilizado con química y otro sin fertilización. El objetivo principal fue analizar de forma detallada el impacto de estos dos tipos de fertilizantes orgánicos en comparación con la fertilización química estándar y la ausencia de fertilización, específicamente en términos de cantidad y calidad de las patatas cosechadas. Para llevar a cabo este estudio, se procedió a analizar tanto el digestato como la pollinaza utilizados como fertilizantes orgánicos. Posteriormente, se planteó una prueba experimental en la que se realizó un aporte equitativo de nutrientes a las patatas sembradas, distribuidos en parcelas de 6x10 metros. Con el fin de obtener resultados precisos, se replicaron las condiciones de fertilización en cuatro repeticiones por tesis. El ensayo se llevó a cabo en Sandiás en parcelas experimentales de 6x10 metros.

- T1: Pollinaza (fertilización orgánica)
- T2: Digestato (subproducto de la digestión anaeróbica)
- T3: Fertilización química (testigo con fertilización química)
- T4: Testigo sin fertilización (blanco sin fertilización)

Análisis de los fertilizantes orgánicos: Tanto la pollinaza como el digestato fueron previamente analizados para determinar su contenido de nutrientes (principalmente nitrógeno, fósforo y potasio), y así ajustar las dosis para asegurar que cada tratamiento recibiera cantidades comparables de nutrientes.

Parámetros evaluados:

Rendimiento del cultivo: producción bruta y comercial (kg/ha), % de destrío.

Calidad de los tubérculos: se analizaron defectos en la piel, tamaño, uniformidad, y calidad comercial de las patatas, % materia seca.

3. RESULTADOS DEL ENSAYO DIGESTATO POLLINAZA QUIMICA 2023

3.1. CLIMATOLOGÍA DURANTE EL ENSAYO DIGESTATO-POLLINAZA-QUÍMICA 2023.

En esta tabla se detalla la climatología durante el desarrollo de las patatas durante 2023 sembradas el 26 de abril de 2023 y cosechadas el 20 de septiembre de 2023, período en el que destacaron las precipitaciones en mayo y abril lo que favoreció sin duda proliferación de mildiu y otras micosis.

Las temperaturas observadas a intervalos de 10 minutos y repartidas según los intervalos en la tabla indican la actividad esperada del cultivo, así por debajo de 5º C no

CIF: G 32273427 Rexistro Único de Fundacións de Interese Galego Nº 2003/28

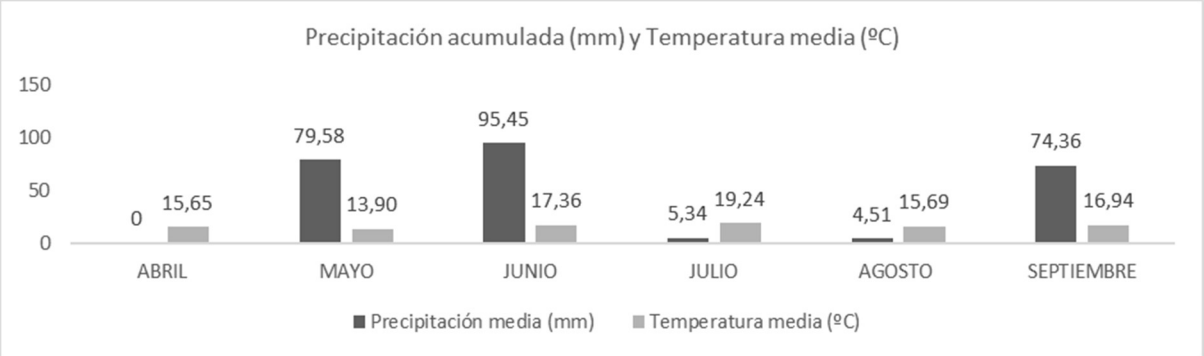
hay actividad al igual que por encima de 28º C y el rango óptimo de crecimiento del tubérculo está de 12º a 22º C. Si observamos los datos obtenidos en esta campaña hubo un período de crecimiento óptimo del 25% que siendo un dato mejor que en años de altas temperaturas se ve empañado por las lluvias excesivas de mayo y junio.

		En % del 21 de junio a 20 de septiembre de 2023
Actividad nula	Menos de 5º	3,25%
Actividad vegetativa mínima por bajas temperatura	De 5º a 12ª	12,05%
Crecimiento óptimo del tubérculo	De 12º a 25º	46,86%
Crecimiento de la parte aérea	De 25º a 28º	17,73%
Sin actividad por altas temperaturas	Más de 28º	20,12%

Tabla 2: temperaturas durante el desarrollo del tubérculo ensayo digestato-pollinaza-química.

Las precipitaciones y temperaturas durante el período de desarrollo de las patatas destacaron por las grandes precipitaciones en el final de mayo y junio que provocaron focos de mildiu no en la parcela ensayos si no en las parcelas colindantes, además de aumentar el riesgo de otras micosis por la conjunción de humedad constante y temperaturas cálidas.

Tal como se aprecia en la gráfica mayo y junio acumularon casi 190 litros por metro cuadrado, acompañado de una temperatura media que rondó los 17 grados en junio circunstancia que multiplicó las micosis.



Gráfica 1: precipitación acumulada y temperatura media ensayo digestato-pollinaza-química 2023.

CIF: G 32273427 Rexistro Único de Fundacións de Interese Galego Nº 2003/28

3.2. ANÁLISIS DE SUELO DEL LUGAR DE ENSAYO DIGESTATO-POLLINAZA-QUÍMICA 2023.

El análisis del lugar del ensayo es el que refleja la tabla siguiente:

PARCELA ENSAYOS	
pH en agua (1:2,5)	5,27
Materia orgánica (%)	12,24%
Fósforo asimilable ppm (Olsen)	83,02
K Potasio asimilable ppm	107,6
Ca Calcio ppm	315,23
Mg Magnesio ppm	42,13
Na Sodio ppm	192,32
Relación Ca\Mg	4,54
Relación K\Mg	0,79
Relación Ca:Mg:K	72:16:13

Tabla 3: análisis de suelo del lugar de ensayo.

3.3. TESIS ENSAYO DIGESTATO-POLLINAZA-QUÍMICA 2023

Se plantearon tres tesis de fertilización denominadas T1, T2 y T3, definidas de la siguiente forma:

- T1 Digestato: se fertilizaron cuatro contenedores de 25 litros de paredes de fieltro permeables que permiten la circulación de agua pero confinan sustrato suficiente al que se le agrega digestato para llevar a término el cultivo de patata Kennebec.
- T2 Pollinaza: se fertilizaron cuatro contenedores de 25 litros de paredes de fieltro permeables que permiten la circulación de agua pero confinan sustrato suficiente al que se le agrega pollinaza para llevar a término el cultivo de patata Kennebec.
- T3 Química: se fertilizaron cuatro contenedores de 25 litros de paredes de fieltro permeables que permiten la circulación de agua pero confinan sustrato suficiente al que se le agrega fertilizante químico para tener una referencia de fertilización en el ensayo para llevar a término el cultivo de patata Kennebec.

3.3.1. Análisis del digestato y pollinaza utilizados ensayos 2023

El digestato recibido fue analizado para estimar los contenidos en nutrientes, pH, tanto por ciento materia orgánica y así conformar una dosis para el cultivo de patata.

Parámetros analizados	Digestato
pH	8,78
%humedad	52,70
Densidad kg/m3	637,9
Nitrógeno total %	1,58
P%	1,84%
Ca %	2,55%
K %	1,27%
Mg %	0,31%
Al %	<1
Na %	0,66%

Tabla 4: análisis digestato.

CIF: G 32273427 Rexistro Único de Fundacións de Interese Galego Nº 2003/28

Este análisis indica que el digestato es un fertilizante orgánico rico en nutrientes clave como nitrógeno, fósforo, calcio y potasio, lo que lo convierte en una buena opción para cultivos como la patata. Sin embargo, debido a su pH alcalino (8,78), se debe tener precaución en suelos ya básicos, ya que podría inducir problemas de sarna en patata y afectar la calidad de los tubérculos. Se recomienda realizar un ajuste del pH del suelo si es necesario y monitorizar los efectos a largo plazo sobre la estructura del suelo.

Del mismo modo la pollinaza fue analizada para elaborar la dosis adecuada al cultivo de patata. La pollinaza parece ser rica en nitrógeno y fósforo, lo que la hace adecuada como fertilizante para promover el crecimiento y la salud de las plantas. Sin embargo, el pH alcalino podría necesitar ajustes dependiendo del tipo de plantas que estás cultivando. También sería beneficioso considerar la adición de magnesio si es necesario para las necesidades específicas de tus cultivos. La baja densidad y humedad también son aspectos positivos para el manejo y almacenamiento.

Parámetros analizados	Pollinaza
pH	8,53
%humedad	11,78
% Materia Orgánica	51,3
Densidad kg/m^3	293,20
Nitrógeno total %	3,61
Ca mg/L	610,0
K mg/L	203,5
Mg mg/L	83,2
Na mg/L	108,3

Tabla 4: análisis pollinaza.

3.3.2. Dosis de abonado según tesis ensayo digestato-pollinaza-química 2023.

En función de los análisis del sustrato de siembra y de los productos a testar se elaboraron tres tesis de abonado según la tabla siguiente:

T1 DIGESTATO

Este tratamiento se basa únicamente en el digestato como fuente de nutrientes orgánicos y un fertilizante completo 13-10-20 para proporcionar nitrógeno, fósforo y potasio. Los nutrientes orgánicos disponibles en el digestato se mejoran con la corrección de las deficiencias con el fertilizante mineral.

T2 POLLINAZA

Este tratamiento utiliza pollinaza como fuente principal de nutrientes orgánicos, combinada con el fertilizante completo 13-10-20 y potasa. La pollinaza aporta una cantidad significativa de nitrógeno, fósforo y potasio, reduciendo la necesidad de fertilizantes adicionales. La combinación debería proporcionar un equilibrio adecuado de nutrientes, aunque la falta de fertilizante adicional de nitrógeno podría ser compensada por el contenido de nitrógeno de la pollinaza.

CIF: G 32273427 Rexistro Único de Fundacións de Interese Galego Nº 2003/28

T3 QUIMICA

Este tratamiento se basa completamente en fertilizantes químicos. La dosis de 1300 kg/ha del fertilizante 13-10-20 proporciona un aporte equilibrado de nitrógeno, fósforo y potasio. La adición de 300 kg/ha de N27 asegura un aporte adicional de nitrógeno, lo cual es importante para el crecimiento inicial y el desarrollo de las patatas.

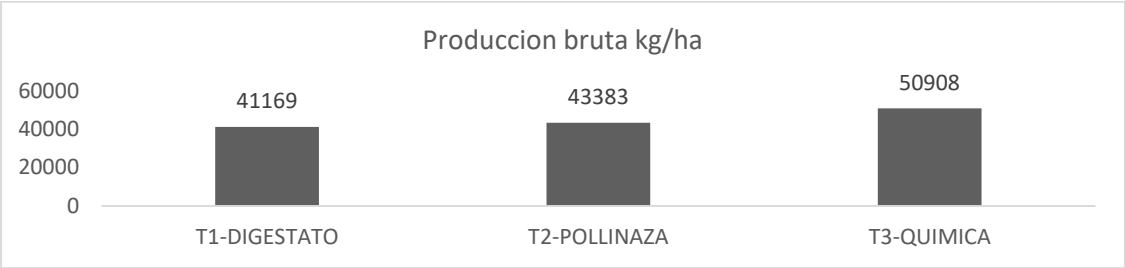
Tesis	Digestato kg/ha	Pollinaza kg/ha	13-10-20 kg/ha	Potasa kg/ha	N27 kg/ha
T1 DIGESTATO	3250	0	1000	300	0
T2 POLLINAZA	0	3250	1000	300	0
T3 QUIMICA	0	0	1300	250	300

Tabla 5: dosis de fertilizado según tesis.

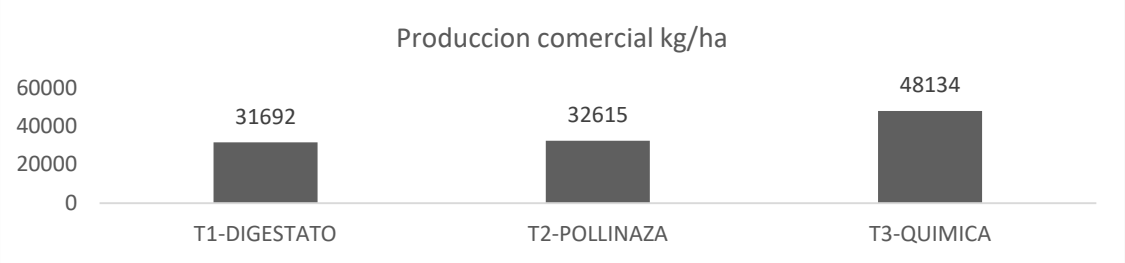
T1 DIGESTATO y T2 POLLINAZA proporcionan nutrientes orgánicos y minerales, lo que puede ser beneficioso para mejorar la estructura del suelo y la retención de nutrientes. La elección entre ellos puede depender de la disponibilidad y coste de los materiales orgánicos, así como de las necesidades específicas del suelo y del cultivo.

T3 QUIMICA ofrece un control más preciso de los nutrientes con fertilizantes químicos, lo cual puede ser ventajoso para ajustes rápidos y específicos en función de las necesidades del cultivo.

3.3.3. Producción bruta, comercial, Ensayo Digestato-Pollinaza-Química 2023.

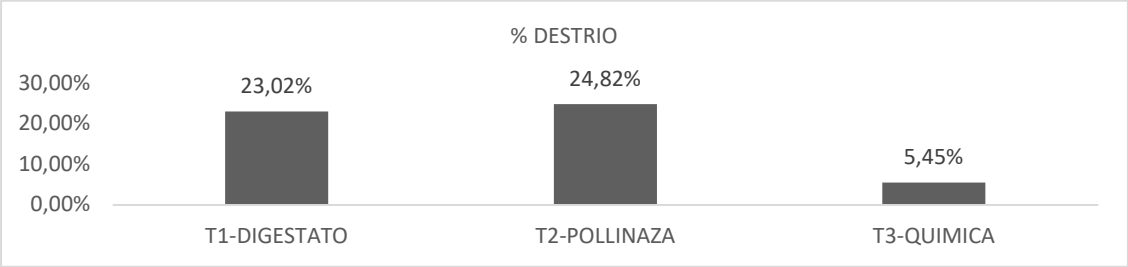


Gráfica 2: producción bruta estimada kg/ha Digestato-pollinaza química .



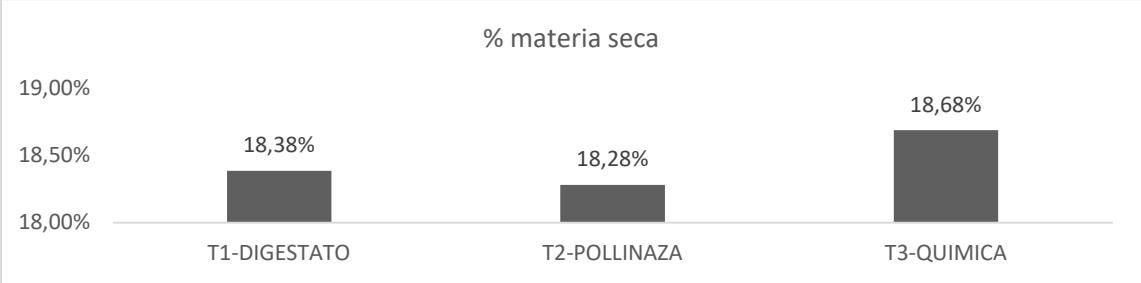
Gráfica 3: producción comercial estimada kg/ha Digestato-pollinaza química .

CIF: G 32273427 Rexistro Único de Fundacións de Interese Galego Nº 2003/28



Gráfica 4: % de destrío estimado Digestato-pollinaza química.

3.3.4. Tanto por ciento de materia seca.



Gráfica 5: % de materia seca Digestato-pollinaza química

3.4. CONCLUSIONES. ENSAYO DIGESTATO-POLLINAZA-QUIMICA 2023

- El tratamiento con fertilización química mostró el mayor rendimiento, con 50,908 kg/ha, superando en un 16.9% a la pollinaza y en un 23.7% al digestato. Este resultado indica que la aplicación de fertilizantes químicos garantiza una rápida y directa disponibilidad de nutrientes, en particular de nitrógeno, fósforo y potasio, lo que resulta en un crecimiento rápido y eficiente de las plantas.
- La pollinaza mostró un rendimiento de 43,383 kg/ha, siendo el segundo tratamiento más efectivo, solo un 15.3% inferior a la fertilización química. La producción es menor pues es evidente que la dosis de pollinaza es pequeña y debe ser aumentada. La pollinaza no solo aporta nutrientes esenciales, sino que también mejora la materia orgánica y la microbiota del suelo, promoviendo la sostenibilidad a largo plazo. La pollinaza contribuye significativamente al contenido de materia orgánica y a la mejora de la estructura del suelo, lo que a largo plazo puede mejorar la retención de agua y la capacidad de almacenamiento de nutrientes. Aunque los nutrientes no se liberan tan rápido como en los fertilizantes químicos, la liberación progresiva asegura una nutrición continua del cultivo a lo largo de su ciclo. Pero presenta desventajas por la variabilidad en la composición de la pollinaza, que puede llevar a un suministro desequilibrado de nutrientes si no se aplica de manera adecuada. Un exceso de nitrógeno, por ejemplo, podría estimular un crecimiento excesivo de la planta a expensas del desarrollo de los tubérculos. Uno de los principales problemas en la piel de las patatas asociadas al uso de pollinaza es la sarna común, una enfermedad causada por el patógeno Streptomyces scabies. Esta enfermedad es más común cuando el pH del suelo aumenta debido al uso de fertilizantes

CIF: G 32273427 Rexistro Único de Fundacións de Interese Galego Nº 2003/28

orgánicos ricos en nitrógeno y otros minerales.

- El digestato produjo 41,169 kg/ha, ligeramente inferior al rendimiento con pollinaza (5.1% menos) y un 23.7% menor que el fertilizante químico. Al igual que con la pollinaza, la dosis fue insuficiente y debe ser aumentada. Sin embargo, su rendimiento es competitivo, especialmente cuando se tiene en cuenta que el digestato es un subproducto de la digestión anaeróbica que puede contribuir a la economía circular en la agricultura.
  Ventajas: El digestato proviene del tratamiento de residuos orgánicos, como la pollinaza, lo que convierte este residuo en un insumo valioso para la fertilización de cultivos, reduciendo la necesidad de fertilizantes sintéticos. Aporte de nutrientes esenciales y mejora la estructura del suelo, aunque en menor medida. Su uso promueve la sostenibilidad agrícola al reciclar residuos orgánicos.

- No está exento de desventajas por su menor cantidad de materia orgánica en comparación con la pollinaza, el digestato aporta menos materia orgánica, lo que podría limitar su capacidad para mejorar la estructura del suelo a largo plazo. Aunque aporta nutrientes, la variabilidad en la liberación de estos puede ser mayor, lo que podría requerir un monitoreo más cercano para evitar deficiencias durante el ciclo del cultivo.

Conclusión General ensayo Pollinaza vs. Digestato vs. Química 2023

La fertilización química ofrece el mayor rendimiento a corto plazo, pero a costa de la salud a largo plazo del suelo. Pollinaza y digestato pueden proporcionar rendimientos competitivos siempre que se aumente la dosis de abonado, con la ventaja adicional de mejorar la textura y estructura del suelo, además de ser opciones más sostenibles y respetuosas con el medio ambiente. Uso combinado de fertilización orgánica y química se podría recomendar como una estrategia combinada, usando fertilización química en fases críticas del cultivo para maximizar la producción, y la pollinaza o el digestato para mejorar la sostenibilidad y fertilidad del suelo a largo plazo. Aunque los fertilizantes químicos ofrecen el mayor rendimiento a corto plazo, el uso de pollinaza y digestato debería ser promovido como parte de una estrategia de manejo sostenible del suelo, especialmente en sistemas agrícolas que busquen reducir el impacto ambiental y mejorar la calidad del suelo a largo plazo.

4. RESULTADOS DEL ENSAYO BIOCHAR 2023

4.1. CLIMATOLOGÍA DURANTE EL ENSAYO BIOCHAR 2023.

En esta tabla se detalla la climatología durante el desarrollo de las patatas durante 2023 sembradas el 21 de junio de 2023 y cosechadas el 20 de septiembre de 2023.

Las temperaturas observadas a intervalos de 10 minutos y repartidas según los intervalos en la tabla indican la actividad esperada del cultivo, así por debajo de 5º C no

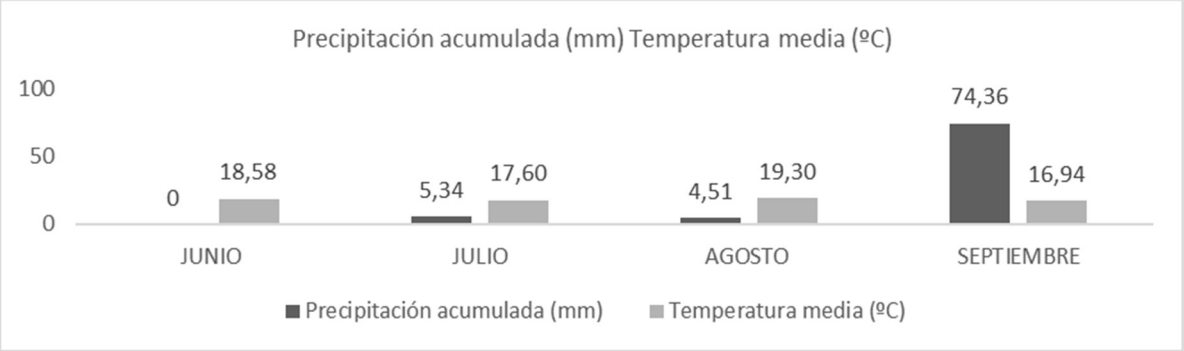
CIF: G 32273427 Rexistro Único de Fundacións de Interese Galego Nº 2003/28

hay actividad al igual que por encima de 28º C y el rango óptimo de crecimiento del tubérculo está de 12º a 22º C. Si observamos los datos obtenidos en esta campaña hubo un período de crecimiento óptimo del 25% que siendo un dato mejor que en años de altas temperaturas se ve empañado por las lluvias excesivas de mayo y junio.

		En % del 21 de junio a 20 de septiembre de 2023
Actividad nula	Menos de 5º	3,25%
Actividad vegetativa mínima por bajas temperatura	De 5º a 12ª	12,05%
Crecimiento óptimo del tubérculo	De 12º a 25º	46,86%
Crecimiento de la parte aérea	De 25º a 28º	17,73%
Sin actividad por altas temperaturas	Más de 28º	20,12%

Tabla 6: temperaturas durante el desarrollo del tubérculo 2023

Si observamos precipitaciones acumuladas y temperaturas medias la gráfica siguiente



Gráfica 6: precipitación acumulada y temperatura media ensayo biochar 2023.

4.2. ANÁLISIS DE SUELO DEL LUGAR DE ENSAYO BIOCHAR 2023.

El análisis del lugar del ensayo es el que refleja la tabla siguiente:

PARCELA ENSAYOS	
pH en agua (1:2,5)	5,27
Materia orgánica (%)	12,24%
Fósforo asimilable ppm (Olsen)	83,02
K Potasio asimilable ppm	107,6
Ca Calcio ppm	315,23
Mg Magnesio ppm	42,13
Na Sodio ppm	192,32
Relación Ca\Mg	4,54
Relación K\Mg	0,79
Relación Ca:Mg:K	72:16:13

Tabla 7: análisis de suelo del lugar de ensayo.

4.3. TESIS ENSAYO BIOCHAR 2023

CIF: G 32273427 Rexistro Único de Fundacións de Interese Galego Nº 2003/28

Se plantearon cuatro tesis de fertilización tres con biochar y otra con química como blanco, definidas de la siguiente forma:

- B 400: se fertilizaron cuatro contenedores de 25 litros de paredes de fieltro permeables que permiten la circulación de agua pero confinan sustrato suficiente al que se le agrega una cantidad de biochar B400 procedente de incineración a 400ºC para llevar a término el cultivo de patata Kennebec.
- B-450 se fertilizaron cuatro contenedores de 25 litros de paredes de fieltro permeables que permiten la circulación de agua pero confinan sustrato suficiente al que se le agrega una cantidad de biochar B450 procedente de incineración a 450ºC para llevar a término el cultivo de patata Kennebec.
- B-500: se fertilizaron cuatro contenedores de 25 litros de paredes de fieltro permeables que permiten la circulación de agua pero confinan sustrato suficiente al que se le agrega una cantidad de biochar B500 procedente de incineración a 500ºC para llevar a término el cultivo de patata Kennebec.
- Blanco: se fertilizaron cuatro contenedores de 25 litros de paredes de fieltro permeables que permiten la circulación de agua pero confinan sustrato suficiente al que se le agrega una cantidad fertilizante químico como blanco del ensayo para llevar a término el cultivo de patata Kennebec.

CIF: G 32273427 Rexistro Único de Fundacións de Interese Galego Nº 2003/28

4.3.1. Análisis del Biochar

El biochar recibido fue analizado para estimar los contenidos en nutrientes, pH, tanto por ciento materia orgánica y así conformar una dosis para el cultivo de patata.

Parámetros	Biochar B-400
pH	11,68
Densidad kg/m³	315
%MO	65,1
N total	2,16
Ca %	1,14
Mg %	1,41
Na %	1,48
K %	8,96

Tabla 8: análisis del biochar B-400

Del mismo modo el biochar procedente de la incineración a 450ºC fue analizado para elaborar la dosis adecuada al cultivo de patata.

Parámetros	Biochar B-450

pH	11,56
Densidad kg/m³	347
%MO	64,43
N total	2,179
Ca %	10,06
Mg %	1,91
Na %	2,87
K %	7,83

Tabla 9: análisis del biochar B-450

Y el biochar procedente de la incineración a 500º también fue analizado con el resultado siguiente:

Parámetros	Biochar B-500
pH	10,52
Densidad kg/m³	329
%MO	61,17
N total	1,576
Ca %	5,41
Mg %	1,23
Na %	1,67
K %	7,55

Tabla 10: análisis del biochar B-500

4.3.2. Dosis de abonado según tesis.

Este ensayo tiene como objetivo evaluar el impacto de diferentes tipos de biochar (B-400, B-450 y B-500) en la fertilización de patata y su comparación con un tratamiento testigo sin biochar (blanco). A continuación, se describen las tesis involucradas en el ensayo y su respectiva dosificación de nutrientes:

Tesis	Biochar B-400 kg/ha	Biochar B-400 kg/ha	Biochar B-500 kg/ha	13-10-20 kg/ha	Potasa kg/ha
T1 B-400	400	0	0	1000	400
T2 B-450	0	400	0	1000	400
T3 B-500			400	1000	400
T4 BLANCO	0	0	0	1000	400

Tabla 11: dosis de fertilización ensayo biochar

Este ensayo permitirá evaluar el impacto del biochar en la agricultura sostenible y determinar si su uso es una opción viable para mejorar la producción de patatas, especialmente bajo condiciones de fertilización convencional. El uso de biochar puede mejorar la retención de nutrientes en el suelo y aumentar la productividad del cultivo de patata.
Las diferencias en la temperatura de pirólisis del biochar (400°C, 450°C y 500°C) pueden influir en su capacidad de mejorar la calidad del suelo y la respuesta del cultivo.

CIF: G 32273427 Rexistro Único de Fundacións de Interese Galego Nº 2003/28

El tratamiento con biochar a 500°C (T3) podría ser el más efectivo debido a su mayor estabilidad y capacidad de adsorción de nutrientes.

- T1 (B-400):

Biochar aplicado: 400 kg/ha de Biochar B-400.
Fertilizantes adicionales: Aplicación estándar de 1000 kg/ha de 13-10-20 (NPK) y 400 kg/ha de potasa.
Objetivo: Evaluar el efecto de la temperatura de pirólisis de 400°C en el rendimiento y calidad de las patatas.

- T2 (B-450):

Biochar aplicado: 400 kg/ha de Biochar B-450.
Fertilizantes adicionales: Aplicación de 1000 kg/ha de 13-10-20 (NPK) y 400 kg/ha de potasa.
Objetivo: Comparar los efectos del biochar producido a 450°C con el biochar de 400°C y 500°C.

- T3 (B-500):

Biochar aplicado: 400 kg/ha de Biochar B-500.
Fertilizantes adicionales: Aplicación de 1000 kg/ha de 13-10-20 (NPK) y 400 kg/ha de potasa.
Objetivo: Analizar el efecto del biochar a 500°C, la temperatura más alta, en la producción y propiedades de las patatas.

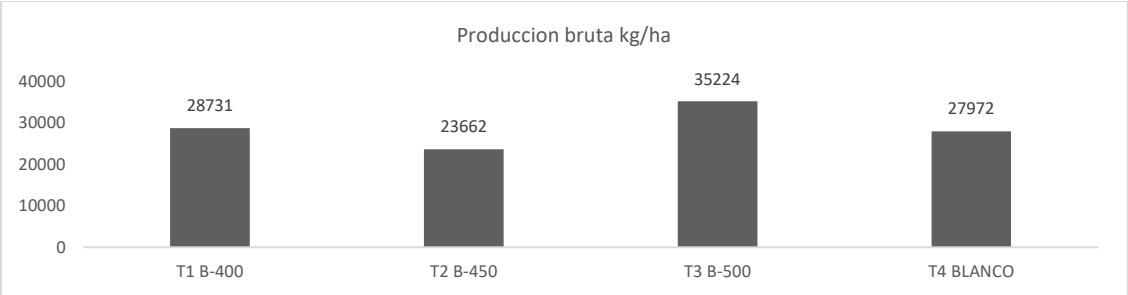
- T4 (Blanco):

Biochar aplicado: 0.
Fertilizantes adicionales: 1000 kg/ha de 13-10-20 (NPK) y 400 kg/ha de potasa.
Objetivo: Servir como tratamiento testigo para evaluar los beneficios del biochar en comparación con una fertilización convencional sin biochar.

CIF: G 32273427 Rexistro Único de Fundacións de Interese Galego Nº 2003/28

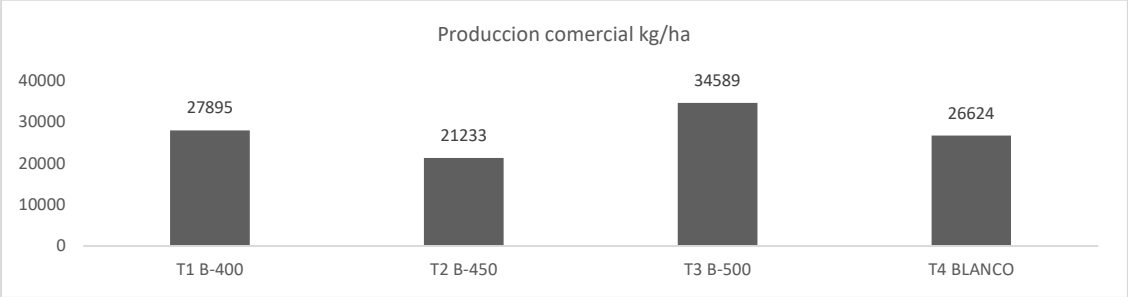
4.4. PRODUCCIÓN BRUTA, COMERCIAL, %DESTRÍO, ENSAYO BIOCHAR 2023.

La producción bruta se refiere a la cantidad total de patatas producidas en el campo, sin ningún tipo de selección o clasificación posterior a la cosecha. Esta cifra incluye tanto las patatas que serán comercializadas como las que no cumplen con los estándares de calidad requeridos para su venta (como patatas dañadas, deforme o afectadas por enfermedades).



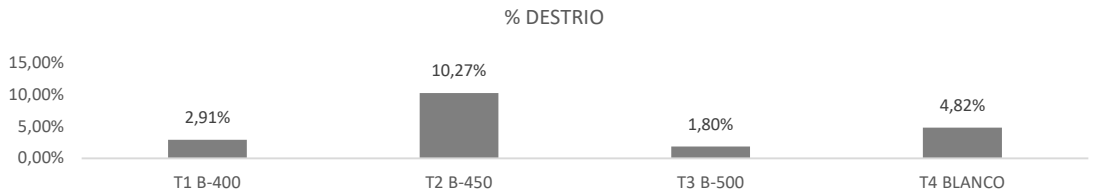
Gráfica 7: producción bruta estimada kg/ha biochar .

La producción comercial se refiere a la cantidad de patatas aptas para su venta, es decir, aquellas que cumplen con los requisitos de calidad para llegar al mercado. Después de la cosecha, las patatas pasan por un proceso de clasificación y selección, donde se descartan las que no cumplen con las normas (ya sea por tamaño, forma o condición sanitaria).



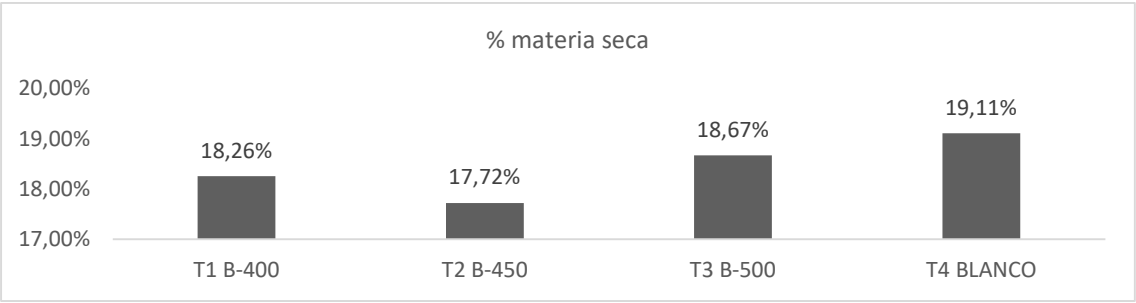
Gráfica 8: producción comercial estimada kg/ha biochar .

El % de destrío en el cultivo de patata se refiere al porcentaje de tubérculos descartados durante la cosecha debido a problemas de calidad. Estos pueden incluir un alto porcentaje de destrío puede deberse a factores como un mal manejo de la fertilización (por ejemplo, exceso de nitrógeno, pH desequilibrado, o deficiencias en nutrientes), condiciones climáticas adversas, o problemas con el manejo de la cosecha.



Gráfica 9: % de destrío estimado biochar.

4.4.1. Tanto por ciento de materia seca biochar.



Gráfica 10: % de materia seca biochar

CIF: G 32273427 Rexistro Único de Fundacións de Interese Galego Nº 2003/28

4.5. CONCLUSIONES ENSAYO BIOCHAR 2023.

- El ensayo de fertilización con biochar en patata Kennebec muestra que la temperatura de producción del biochar es un factor crítico en su efectividad como enmienda agrícola. El biochar producido a 500 °C ofrece las mayores producciones, con un incremento significativo en el rendimiento de tubérculos de patata Kennebec, mientras que el biochar a 450 °C mostraron menores rendimientos del cultivo.
- La mayor producción de patata se observó con el tratamiento de biochar a 500 °C, alcanzando 35,224 kg/ha de producción bruta. Este tratamiento superó significativamente a los demás. El biochar a 500 °C produjo un 25.9% más de tubérculos que el tratamiento sin biochar.
- Biochar a 400 °C con rendimiento cercano al control: El tratamiento con biochar a 400 °C produjo 28,731 kg/ha, un rendimiento similar al del tratamiento sin biochar (27,972 kg/ha). Aunque este tratamiento no mostró una ventaja significativa sobre el control, se observa una ligera mejora (+2.7%).
- Biochar a 450 °C con el menor rendimiento: El tratamiento con biochar a 450 °C mostró el rendimiento más bajo, con 23,662 kg/ha, lo que representa una reducción del 15.4% en comparación con el control.
- El biochar tiene un efecto alcalinizante en el suelo, especialmente si se produce a altas temperaturas. Esto puede elevar el pH del suelo, lo que influye en la disponibilidad de nutrientes y en la salud del cultivo de patata Kennebec.
- La piel de la patata Kennebec es un factor clave en la calidad del tubérculo, tanto desde el punto de vista comercial como culinario. La aplicación de biochar puede influir en la apariencia, textura y sanidad de la piel de los tubérculos.

- Posibles efectos del biochar en la piel de los tubérculos:

Sarna común (Streptomyces scabies): un aumento excesivo del pH del suelo debido al biochar puede favorecer la aparición de sarna común en los tubérculos. Esta enfermedad causa manchas ásperas y corchosas en la piel, afectando la calidad estética y comercial de las patatas.

Precauciones:

- Evitar el aumento excesivo del pH: la sarna común prospera en suelos con pH alto (por encima de 5.5-6.0), se debe evitar que el biochar eleve demasiado el pH. En caso de aplicaciones excesivas se debe actuar rebajando el pH, que se puede lograr aplicando enmiendas ácidas, como sulfato de amonio

Uso de biochar obtenido a 500 °C parece ser el más efectivo para mejorar la producción sin causar daños significativos en la producción de patata. Aplicar el biochar en cantidades fraccionadas y realizar monitoreos periódicos de pH y otros parámetros del suelo permite evitar problemas a largo plazo en la calidad y cantidad de cosecha. En suelos muy ácidos, el biochar puede ser una solución efectiva para neutralizar la acidez y mejorar la estructura del suelo.

En conclusión, el uso de biochar en la producción de patata Kennebec tiene un gran

CIF: G 32273427 Rexistro Único de Fundacións de Interese Galego Nº 2003/28

potencial, pero debe aplicarse con precaución, especialmente en lo que respecta al poder encalante y sus efectos sobre el pH del suelo, así como en la piel de los tubérculos. Un manejo adecuado del biochar puede optimizar la producción, mejorar la calidad del suelo y minimizar problemas de calidad en los tubérculos.

5. RESULTADOS ENSAYO POLLINAZA-DIGESTATO-QUIMICA 2024

5.1. CLIMATOLOGÍA DURANTE EL ENSAYO 2024

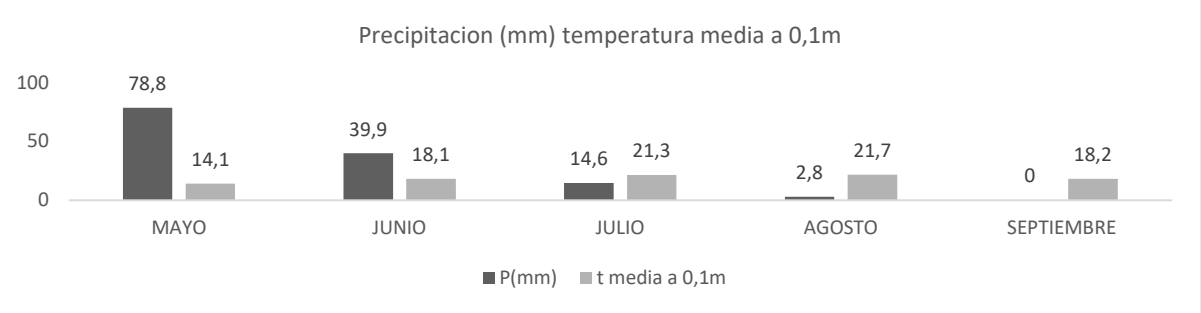
En esta tabla se detalla la climatología durante el desarrollo de las patatas durante 2024 sembradas en de mayo de 2024 y cosechadas en septiembre de 2024.

Las temperaturas observadas a intervalos de 10 minutos y repartidas según los intervalos en la tabla indican la actividad esperada del cultivo, así por debajo de 5º C no hay actividad al igual que por encima de 28º C y el rango óptimo de crecimiento del tubérculo está de 12º a 22º C. Si observamos los datos obtenidos en esta campaña hubo un período de crecimiento óptimo del 25% que siendo un dato mejor que en años de altas temperaturas se ve empañado por las lluvias excesivas de mayo y junio.

		En % de mayo a septiembre de 2024
Actividad nula	Menos de 5º	1,94%
Actividad vegetativa mínima por bajas temperatura	De 5º a 12ª	18,89%
Crecimiento óptimo del tubérculo	De 12º a 25º	61,64%
Crecimiento de la parte aérea	De 25º a 28º	7,52%
Sin actividad por altas temperaturas	Más de 28º	10,01%

Tabla 12: temperaturas durante el desarrollo del tubérculo 2024

Si observamos precipitaciones acumuladas en 2024 y temperaturas medias la gráfica siguiente



Gráfica 11: precipitación acumulada y temperatura media ensayo patata 2024.

CIF: G 32273427 Rexistro Único de Fundacións de Interese Galego Nº 2003/28

5.2. ANALISIS DEL LUGAR DE ENSAYOS 2024.

El análisis del lugar del ensayo es el que refleja la tabla siguiente:

PARCELA ENSAYOS	
pH en agua (1:2,5)	5,42
Materia orgánica (%)	11,13%
Fósforo asimilable ppm (Olsen)	86,02
K Potasio asimilable ppm	112,5
Ca Calcio ppm	305,03
Mg Magnesio ppm	40,15
Na Sodio ppm	181,77
Relación Ca\Mg	4,46
Relación K\Mg	0,75
Relación Ca:Mg:K	71:17:12

Tabla 13: análisis de suelo del lugar del ensayo patata 2024

5.3. ANÁLISIS DE DIGESTATO Y POLLINAZA UTILIZADOS EN EL ENSAYO 2024

Parámetros analizados	Digestato
pH	7,98
%humedad	92,25
Densidad kg/m³	1,023
Nitrógeno total %	2,63
%Materia seca	3,70%

Ilustración 2: análisis digestato utilizado ensayo patata 2024

Este análisis indica que el digestato es un fertilizante orgánico rico en nutrientes clave como nitrógeno, fósforo, calcio y potasio, lo que lo convierte en una buena opción para cultivos como la patata. Sin embargo, debido a su pH alcalino (7,98), se debe tener precaución en suelos ya básicos, ya que podría inducir problemas de sarna en patata y afectar la calidad de los tubérculos. Se recomienda realizar un ajuste del pH del suelo si es necesario y monitorizar los efectos a largo plazo sobre la estructura del suelo.

Del mismo modo la pollinaza fue analizada para elaborar la dosis adecuada al cultivo de patata. La pollinaza parece ser rica en nitrógeno y fósforo, lo que la hace adecuada como fertilizante para promover el crecimiento y la salud de las plantas. Sin embargo, el pH alcalino podría necesitar ajustes dependiendo del tipo de plantas que estás cultivando. También sería beneficioso considerar la adición de magnesio si es necesario para las necesidades específicas de tus cultivos. La baja densidad y humedad también son aspectos positivos para el manejo y almacenamiento.

CIF: G 32273427 Rexistro Único de Fundacións de Interese Galego Nº 2003/28

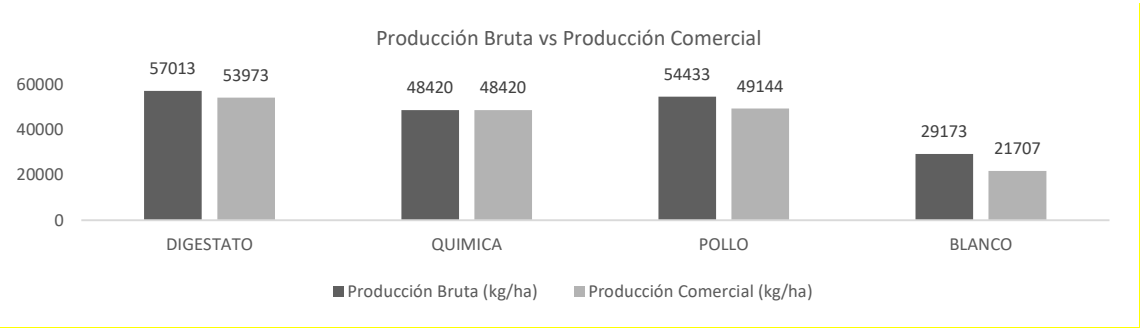
Parámetros analizados	Pollinaza
pH	8,53
%humedad	11,78
% Materia Orgánica	51,3
Densidad kg/m^3	293,20
Nitrógeno total %	3,61
Ca mg/L	610,0
K mg/L	203,5
Mg mg/L	83,2
Na mg/L	108,3

Tabla 14: análisis de la pollinaza utilizada en el ensayo patata 2024

5.4. PRODUCCIÓN BRUTA Y COMERCIAL OBTENIDAS ENSAYO PATATA 2024. % DESTRÍO.

La producción bruta se refiere a la cantidad total de patatas producidas en el campo, sin ningún tipo de selección o clasificación posterior a la cosecha. Esta cifra incluye tanto las patatas que serán comercializadas como las que no cumplen con los estándares de calidad requeridos para su venta (como patatas dañadas, deforme o afectadas por enfermedades).

La producción comercial se refiere a la cantidad de patatas aptas para su venta, es decir, aquellas que cumplen con los requisitos de calidad para llegar al mercado. Después de la cosecha, las patatas pasan por un proceso de clasificación y selección, donde se descartan las que no cumplen con las normas (ya sea por tamaño, forma o condición sanitaria).

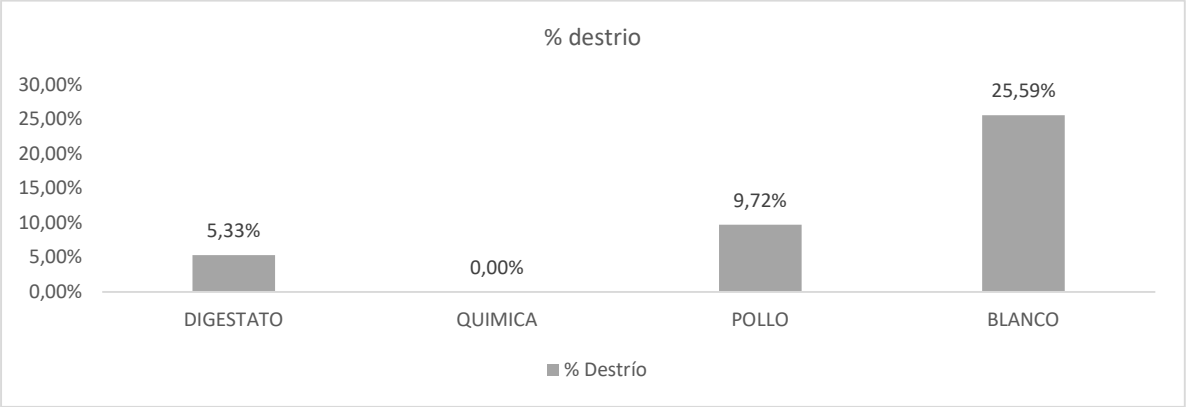


Gráfica 12: producción bruta y comercial del ensayo patata 2024.

El % de destrío en el cultivo de patata se refiere al porcentaje de tubérculos descartados durante la cosecha debido a problemas de calidad. Un alto porcentaje de destrío puede deberse a factores como un mal manejo de la fertilización (por ejemplo, exceso de nitrógeno, pH desequilibrado, o deficiencias en nutrientes), condiciones climáticas adversas, o problemas con el manejo de la cosecha.

CIF: G 32273427 Rexistro Único de Fundacións de Interese Galego Nº 2003/28

En un análisis de fertilización con diferentes tratamientos (pollinaza, digestato, química), el destrío podría ser más alto en parcelas donde los nutrientes o las condiciones del suelo no se manejaron adecuadamente, afectando la calidad comercial de la patata.



Gráfica 13: tanto por ciento de destrio ensayo patata 2024

5.6. CONCLUSIONES ENSAYO PATATA 2024

Respecto a la Producción Bruta (kg/ha) el digestato presentó la mayor producción bruta con 57.013 kg/ha, seguido por pollinaza con 54.433 kg/ha, y el fertilizante químico con 48.420 kg/ha. El tratamiento blanco (sin fertilización) mostró la menor producción con 29.173 kg/ha. El digestato demostró ser el tratamiento con mayor rendimiento en cuanto a cantidad bruta de producción, seguido de cerca por la pollinaza. El fertilizante químico produjo menos cantidad bruta, pero el blanco (sin fertilización) fue considerablemente inferior en rendimiento, indicando la importancia de la fertilización en la productividad del cultivo.

En lo que respecta a la Producción Comercial (kg/ha), el fertilizante químico fue el más eficiente, con 48.420 kg/ha sin pérdida por destrío (0%). El tratamiento con digestato produjo 53.973 kg/ha de producción comercial, lo que representa un porcentaje de destrío de 5,33%. La pollinaza presentó una mayor pérdida, con 49.144 kg/ha de producción comercial y un 9,72% de destrío. El testigo (blanco) tuvo el porcentaje más alto de destrío (25,59%), con solo 21.707 kg/ha de producción comercial. La pollinaza, aunque eficiente en términos de cantidad, presenta el mayor porcentaje de tubérculos descartados, lo que afecta su rendimiento comercial. El testigo sin fertilización es el menos competitivo en términos de producción tanto bruta como comercial.

Conclusión General:

- El fertilizante químico no es el más productivo en cantidad bruta, ofrece una producción comercial 100% eficiente sin pérdidas por destrío, lo que lo hace atractivo desde una perspectiva de calidad. Lo esperado con este tipo de fertilización ya que entrega el alimento a las plantas en el momento y cantidad

CIF: G 32273427 Rexistro Único de Fundacións de Interese Galego Nº 2003/28

adecuados pero su alto coste puede lastrar su uso, además de problemas en la gestión del suelo a largo plazo.

- Digestato: es el tratamiento con mayor producción tanto total como comercial a pesar de tener un 5,33% de destrío. Es una buena alternativa orgánica, con menor impacto en la pérdida de calidad.
- Pollinaza: presenta buenos resultados en cuanto a producción bruta, pero su alto porcentaje de destrío (9,72%) puede ser un inconveniente para la comercialización.
- Testigo sin fertilización: claramente demuestra la importancia de la fertilización en el cultivo de patata, ya que sin aportes de nutrientes, tanto la cantidad como la calidad se ven fuertemente afectadas.

Este ensayo resalta la importancia de equilibrar la cantidad de producción con la calidad comercial y la influencia de diferentes tipos de fertilización en ambos aspectos.

CIF: G 32273427 Rexistro Único de Fundacións de Interese Galego Nº 2003/28

6. ANEXO FOTOGRAFICO.



Ilustración 3: ensayo patata 2023 en contenedores de fieltro



Ilustración 4: nascencia patata kennebec 2023

CIF: G 32273427 Rexistro Único de Fundacións de Interese Galego Nº 2003/28



Ilustración 5: ensayo biochar patata 2023



Ilustración 6: estado ensayo digestato 2023

CIF: G 32273427 Rexistro Único de Fundacións de Interese Galego Nº 2003/28



Ilustración 7: ensayo patata pollinaza-digestato-química 2024 aplicación de fertilizantes

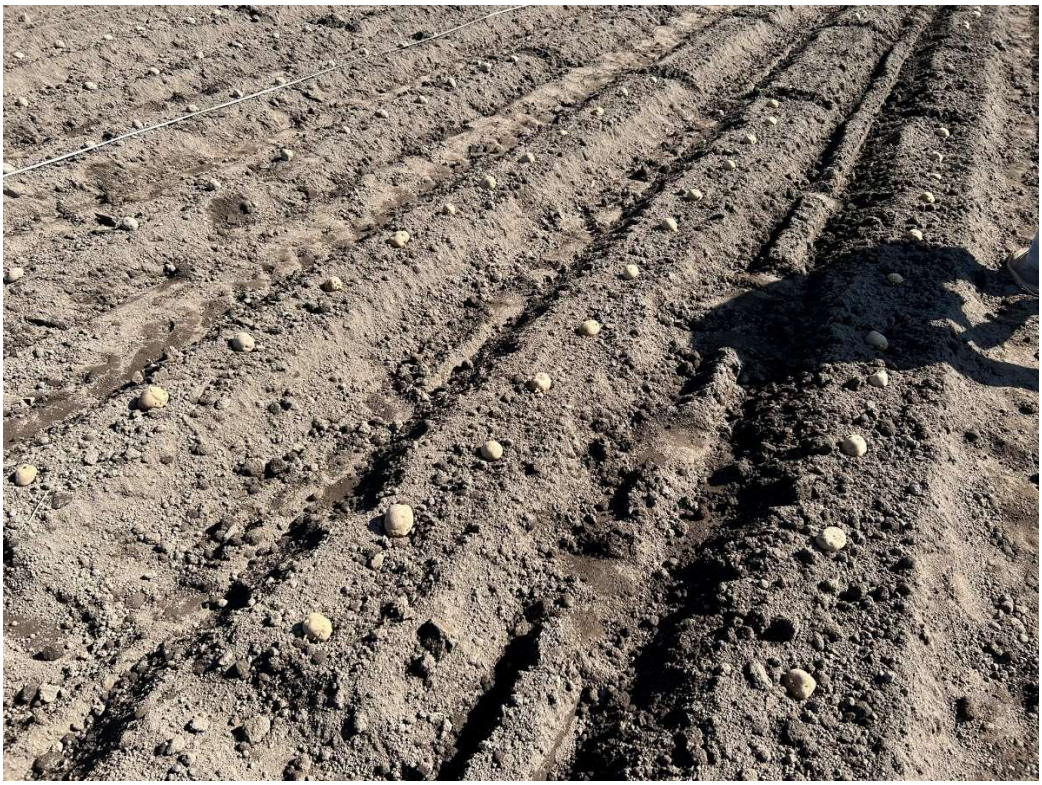


Ilustración 8: siembra ensayo pollinaza-digestato-química 2024

CIF: G 32273427 Rexistro Único de Fundacións de Interese Galego Nº 2003/28



Ilustración 9: estado del cultivo agosto 2024



Ilustración 10: toma de datos agosto 2024 ensayo pollinaza-digestato-química 2024

CIF: G 32273427 Rexistro Único de Fundacións de Interese Galego Nº 2003/28

ENSAYO TRIGO DE INVIERNO 2023-2024

BIOCHAR-CAL-CONTROL

APROAVI: APROVECHAMIENTO INTEGRAL DE LA POLLINAZA PARA LA MEJORA DE LA SOSTENIBILIDAD Y COMPETITIVIDAD DEL SECTOR AGRÍCOLA

Nº DE EXPEDIENTE: FEADER 2022/010B

1. Introducción. 2

1.1. Efectos del encalado en el trigo: 2

1.2. Objetivos del ensayo. 2
1.2.1. Cal Magnesiana: 2
1.2.2. Biochar como encalante 3
1.2.3. Aporte de nutrientes 3

2. Material y métodos: ensayo trigo invierno 2023-2024. 3

2.1. Lugar del ensayo trigo invierno 2023-2024. 3

2.2. Análisis del suelo del lugar del ensayo 4

2.3. Meteorología observada durante el ensayo trigo invierno 2023-2024 5
2.3.1. Precipitación (P) 5
2.3.2. Temperatura Media 5
2.3.3. Impacto Meteorológico en el Ensayo 6

2.4. Análisis del biochar utilizado en el ensayo. 6

2.5. Tesis propuestas ensayo trigo invierno 2023-2024. 7
2.5.1. Fertilización aplicada por tesis: 7

2.6. Cosecha ensayo trigo invierno 2023-2024. 8
2.6.1. Rendimiento ensayo trigo invierno 2023-2024. 8
2.6.2. Humedad (%humedad): 9
2.6.3. Peso de mil granos (g) 9
2.6.4. Peso específico (kg/hL): 9
2.6.5. Impurezas (%): 10

3. Conclusiones ensayo trigo invierno 2023-2024 10

4. Anexo fotográfico. 11

Gráfica 1: precipitación y temperatura durante el ensayo trigo de invierno 2023-2024 5
Gráfica 2: cosecha de trigo de invierno 2023-2024 8
Gráfica 3: tanto por ciento de humedad obtenido ensayo trigo invierno 2023-2024 9
Gráfica 4: peso de mil granos ensayo trigo de invierno 2023-2024 9
Gráfica 5: peso específico kilogramos por hectólitro ensayo trigo invierno 2023-2024 9
Gráfica 6: tanto por ciento de impurezas ensayo trigo de invierno 2023-2024 10

Tabla 1: análisis de suelo del lugar del ensayo trigo invierno 2023-2024 4
Tabla 2: análisis del biochar ensayo trigo de invierno 2023-2024 7
Tabla 3: fertilización aplicada por tesis ensayo trigo de invierno 2023-2024 7

Ilustración 1: lugar ensayo trigo invierno 2023-2024 4
Ilustración 2: trigo invierno durante desarrollo. 11
Ilustración 3: maduración trigo de invierno 2023-2024 11
Ilustración 4: toma de muestras trigo invierno 2023-2024 12
Ilustración 5: campo muestreado 12
Ilustración 6: pruebas de calidad de grano 13

Trigo invierno 2023-2024: ensayo capacidad encalante con biochar.

1. Introducción.

La producción de trigo está altamente influenciada por las características del suelo, especialmente el pH, que afecta la disponibilidad de nutrientes y la salud general del cultivo. Uno de los métodos clave para mejorar la productividad del trigo es el uso de enmiendas encalantes, que ayudan a corregir la acidez del suelo y mejorar la fertilidad.

El encalado es una técnica esencial para mantener un pH adecuado en suelos ácidos, que son comunes en muchas regiones agrícolas. Un pH bajo puede limitar la disponibilidad de nutrientes críticos como el fósforo, el calcio y el magnesio, lo que afecta negativamente el crecimiento del trigo. A través del encalado, se busca elevar el pH del suelo a niveles óptimos, mejorando las condiciones para la absorción de nutrientes y la actividad biológica en el suelo.

1.1. Efectos del encalado en el trigo:

- Disponibilidad de nutrientes: El encalado incrementa la disponibilidad de nutrientes esenciales como el calcio (Ca) y el magnesio (Mg), a la vez que reduce la toxicidad del aluminio y del manganeso, que tienden a ser problemáticos en suelos ácidos.
- Estructura del suelo: Mejora la estructura del suelo, facilitando la aireación y el drenaje, condiciones óptimas para el desarrollo radicular del trigo.
- Actividad microbiana: Un pH equilibrado favorece la actividad de los microorganismos del suelo, que juegan un papel fundamental en la mineralización de la materia orgánica y la liberación de nutrientes para las plantas. Tipos de Encalantes Utilizados en Trigo

1.2. Objetivos del ensayo.

El ensayo realizado con la variedad Montecarlo, que compara los efectos del encalante utilizando biochar, cal y un control sin encalante, parece enfocarse en evaluar las diferencias en producción y posibles mejoras en el suelo.

Para proporcionar un análisis claro, los siguientes puntos serían clave a considerar en este tipo de ensayo:

- Producción de trigo (kg/ha): Compara las producciones obtenidas bajo los tres tratamientos (biochar, cal y control).
- Peso específico y peso de mil granos: Estos parámetros son importantes para la calidad del grano producido, lo que afecta el valor comercial del trigo.
- Efecto en el pH del suelo: ambos encalantes (biochar y cal) deberían tener efectos diferentes en la neutralización de la acidez del suelo, lo que puede influir en la disponibilidad de nutrientes.

Los dos de los encalantes son la cal magnesiana y el biochar, cada uno con características y beneficios particulares.

1.2.1. Cal Magnesiana:

La cal magnesiana es una enmienda tradicionalmente utilizada para neutralizar la acidez del suelo. Este tipo de cal aporta tanto calcio como magnesio, que son nutrientes esenciales para el

trigo. Su rápida reacción en el suelo lo convierte en una opción eficaz para corregir pH en suelos ácidos y para aportar estos nutrientes. La aplicación de cal magnesiana se traduce en:

- Elevación rápida del pH del suelo.
- Aporte significativo de calcio y magnesio que mejora la nutrición de las plantas.
- Mejora de la estructura del suelo y la disponibilidad de nutrientes.

1.2.2. Biochar como encalante:

El biochar es una forma de carbón obtenido a través de la pirólisis de residuos orgánicos y tiene propiedades únicas que lo hacen interesante como enmienda para el suelo. Aunque no es tradicionalmente un encalante rápido como la cal, el biochar tiene un poder encalante gradual y persistente. Además, mejora la retención de nutrientes y humedad en el suelo, lo que puede beneficiar la producción a largo plazo. Su aporte puede traducirse en:

- Mejora la retención de agua y nutrientes en suelos arenosos o de baja fertilidad.
- Actúa como una esponja, liberando nutrientes lentamente y mejorando la capacidad de intercambio catiónico del suelo.
- Puede ayudar a mejorar el pH del suelo a largo plazo.
- Aumenta la actividad microbiana y la fertilidad en general.

1.2.3. Comparación entre Cal Magnesiana y Biochar

La cal magnesiana suele ser más rápida en neutralizar la acidez del suelo, ofreciendo resultados inmediatos en cuanto al aumento del pH. El biochar tiene una acción más lenta y sostenida. No eleva el pH tan rápido como la cal, pero sus efectos perduran por más tiempo en el suelo.

1.2.4. Aporte de nutrientes:

La cal magnesiana aporta calcio y magnesio en cantidades significativas, mejorando la nutrición mineral del cultivo. El biochar no aporta grandes cantidades de nutrientes, pero mejora la retención y disponibilidad de los nutrientes ya presentes en el suelo o añadidos por fertilizantes.

Ambas enmiendas mejoran la estructura del suelo, aunque el biochar tiene la ventaja adicional de mejorar la retención de agua y aumentar la actividad microbiana, especialmente en suelos pobres en materia orgánica.

La cal magnesiana tiene efectos rápidos pero puede requerir repetir aplicación frecuente, especialmente en suelos con alta acidez.

El biochar, por su naturaleza más estable, tiene efectos que pueden durar décadas, proporcionando beneficios sostenibles a largo plazo

2. Material y métodos: ensayo trigo invierno 2023-2024.

2.1. Lugar del ensayo trigo invierno 2023-2024.

Los ensayos se realizaron en la parcela 1568 del polígono 502 de Sandiás en Ourense en y en la posición que indica la imagen al pie:



Ilustración 1: lugar ensayo trigo invierno 2023-2024

2.2. Análisis del suelo del lugar del ensayo

El análisis del suelo antes del ensayo de biochar, cal y control proporciona información valiosa sobre las características químicas del terreno y su capacidad para sostener el crecimiento del trigo. A continuación, se comentan los principales parámetros del análisis:

PARCELA ENSAYOS	
pH en agua (1:2,5)	5,27
Materia orgánica (%)	12,24%
Fósforo asimilable ppm (Olsen)	83,02
K Potasio asimilable ppm	107,6
Ca Calcio ppm	315,23
Mg Magnesio ppm	42,13
Na Sodio ppm	192,32
Relación Ca\Mg	4,54
Relación K\Mg	0,79
Relación Ca:Mg:K	72:16:13

Tabla 1: análisis de suelo del lugar del ensayo trigo invierno 2023-2024

Acidez del suelo (pH bajo): podría reducir la disponibilidad de ciertos nutrientes importantes, como el fósforo y los micronutrientes. La aplicación de cal (como se tiene planificado en uno de los tratamientos) es clave para corregir esta acidez y mejorar las condiciones generales del suelo para el cultivo de trigo.

Niveles de Materia Orgánica: la alta cantidad de materia orgánica es beneficiosa para el suelo, ya que mejora la estructura y la retención de agua. Esto podría apoyar el desarrollo del trigo durante las fases críticas de crecimiento. La aplicación de biochar puede aumentar aún más la capacidad del suelo para retener agua y nutrientes.

Niveles de Sodio (Na): es bastante alto, lo cual podría tener un impacto negativo en la estructura del suelo y la absorción de nutrientes. El tratamiento con biochar podría ayudar a mitigar estos efectos negativos, al mejorar la estructura del suelo y reducir la compactación.

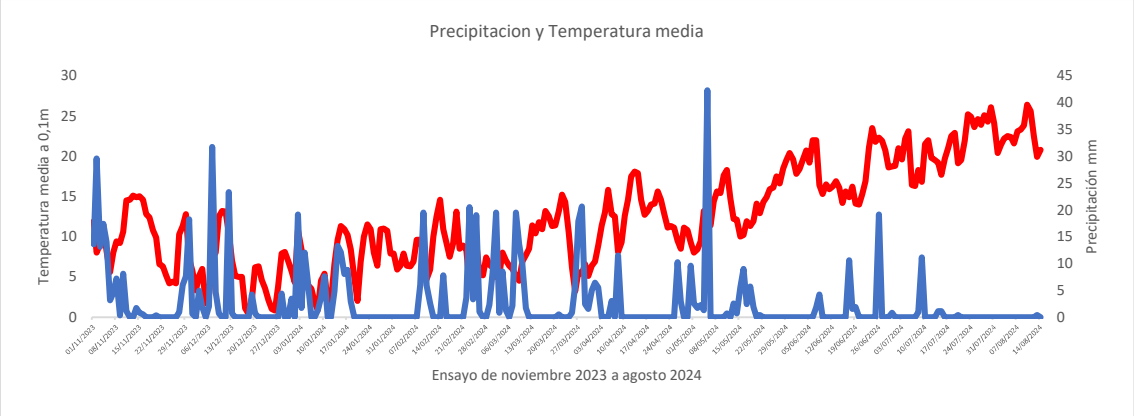
Balance de Nutrientes (Ca, Mg, K): aunque el balance entre calcio y magnesio es aceptable, la relación K/Mg sugiere que una fertilización adecuada con potasio (a través del fertilizante 20-8-10) será esencial para evitar deficiencias y asegurar un buen desarrollo del trigo.

El análisis previo al ensayo muestra un suelo con algunas limitaciones que podrían son las ideales para un ensayo de encalado, principalmente la acidez y los niveles elevados de sodio. Sin embargo, con las correcciones adecuadas (especialmente la aplicación de cal y fertilizantes), las

condiciones deberían ser suficientemente favorables para obtener un buen rendimiento del trigo. Se espera que la adición de biochar y cal mejore significativamente las características físicas y químicas del suelo, contribuyendo a un mejor desarrollo del cultivo.

2.3. Meteorología observada durante el ensayo trigo invierno 2023-2024

El análisis de las condiciones meteorológicas durante el ensayo de trigo de invierno se enfoca principalmente en las variables de precipitación (P) y temperatura media a 0,1 m del suelo. Ambas juegan un papel crucial en el desarrollo del cultivo. A continuación, se detalla un análisis de estas variables durante el periodo comprendido entre el principios de noviembre de 2023 y el 14 de agosto de 2024 fecha de cosecha.



Gráfica 1: precipitación y temperatura durante el ensayo trigo de invierno 2023-2024

El clima proporcionó un buen inicio para el trigo de invierno, con precipitaciones adecuadas en los meses clave de noviembre a marzo, lo que permitió un crecimiento saludable. La disminución de las precipitaciones a partir de junio y las altas temperaturas en julio y agosto podrían haber impactado en la maduración y llenado de granos, lo que podría haber afectado el rendimiento final si no se utilizaron sistemas de riego.

2.3.1. Precipitación (P)

Total de precipitación acumulada durante el ensayo fue de 766 mm, las precipitaciones fueron esporádicas, con algunos eventos significativos:

- ✓ Diciembre de 2023: destaca con eventos de alta precipitación, especialmente el 7 de diciembre (31,7 mm) y el 12 de diciembre (23,3 mm). Febrero de 2024: Los días 23 y 25 de febrero presentaron 20,5 mm y 19 mm respectivamente.
- ✓ Marzo de 2024: Eventos de lluvia el 8 de marzo (19,5 mm) y el 17 de marzo (13,6 mm).
- ✓ Mayo de 2024: Se registraron lluvias fuertes, particularmente el 5 de mayo con 42,3 mm.

Periodo seco: A partir de junio de 2024, hasta agosto, hubo muy pocos eventos de precipitación. Los meses de verano presentan condiciones mayormente secas.

2.3.2. Temperatura Media

Temperatura promedio: la temperatura aumentó gradualmente desde noviembre de 2023 hasta los meses más cálidos del verano de 2024.

- ✓ Meses más fríos: Diciembre y enero presentaron temperaturas bajas, con mínimos registrados el 17 y 18 de diciembre (1,1°C y 0,4°C respectivamente).
- ✓ Meses más cálidos: Junio y julio de 2024 presentaron las temperaturas más elevadas, alcanzando hasta 26,4°C el 10 de agosto.

Durante los meses de invierno (junio-agosto), las temperaturas fueron cálidas en comparación con el invierno, oscilando entre 15°C y 22°C, lo que puede favoreció el desarrollo del trigo en esta fase.

2.3.3. Impacto Meteorológico en el Ensayo

Desarrollo inicial del trigo (noviembre-febrero)

Durante la fase inicial del ensayo (noviembre 2023 a febrero 2024), las lluvias fueron abundantes, proporcionando una buena cantidad de humedad al suelo, lo cual es beneficioso para el desarrollo inicial del cultivo de trigo. Sin embargo, algunos eventos de alta precipitación en diciembre y febrero pudieron haber causado saturación temporal del suelo, afectando la respiración radicular del trigo.

Desarrollo durante la primavera (marzo-mayo)

La primavera 2024 tuvo eventos regulares de lluvia, especialmente en marzo y mayo, lo que permitió mantener una adecuada humedad en el suelo. El evento de 42,3 mm el 5 de mayo pudo haber asegurado una reserva de agua para la planta antes de entrar en las fases de floración.

Las temperaturas fueron moderadas, con un aumento gradual, proporcionando condiciones adecuadas para el crecimiento del trigo.

Fase final y maduración (junio-agosto)

Periodo seco y cálido: A partir de junio, las lluvias disminuyeron notablemente. Este periodo seco, combinado con el aumento de las temperaturas (hasta 26,4°C en agosto), puede haber acelerado la maduración del trigo, reduciendo la calidad del grano si no se gestionó bien el riego o la reserva hídrica del suelo.

Las temperaturas cálidas y la falta de lluvias podrían haber sido un desafío en cuanto a la disponibilidad de agua para el trigo en su fase final, lo que puede afectar el llenado de los granos y el rendimiento final.

2.4. Análisis del biochar utilizado en el ensayo.

El biochar aplicado como enmienda encalante en cultivos de trigo puede tener múltiples beneficios, especialmente si se considera su alta alcalinidad (pH 11,56) y su composición rica en nutrientes. Aquí algunos puntos clave:

El potencial de corrección de la acidez del suelo es elevado, actúa como un corrector de suelos ácidos, ayudando a neutralizar la acidez, lo que puede mejorar la disponibilidad de nutrientes esenciales para el trigo. Esto es beneficioso en suelos con problemas de acidez, donde el crecimiento de las plantas puede estar limitado. Mejora de la estructura del suelo: La baja densidad del biochar y su alta porosidad mejoran la aireación y la retención de agua en el suelo. Esto puede favorecer un mejor desarrollo radicular en el trigo y mejorar la capacidad del suelo

Nitrógeno (2,179%): aunque el nitrógeno en el biochar es moderado, su capacidad para retener nutrientes en el suelo puede ayudar a reducir la lixiviación de nitratos y permitir una liberación más gradual, beneficiando al trigo a lo largo de su ciclo de crecimiento.

Potasio (7,83%): este es un macronutriente esencial para el trigo, necesario para la fotosíntesis, el transporte de azúcares y el control de la apertura estomática. Mejora el rendimiento y la calidad del grano.

Calcio (10,06%) y Magnesio (1,91%): ambos elementos son importantes para la salud de las plantas. El calcio fortalece las paredes celulares y mejora la absorción de otros nutrientes, mientras que el magnesio es crucial para la fotosíntesis al formar parte de la clorofila.

Efecto a largo plazo: El biochar es estable en el suelo y puede tener efectos prolongados, no solo corrigiendo la acidez y mejorando la fertilidad a corto plazo, sino también contribuyendo a la acumulación de materia orgánica a largo plazo, lo que puede mejorar la productividad del suelo de forma sostenida

Parámetros	Biochar
pH	11,56
Densidad kg/m^3	347
%MO	64,43
N total	2,179
Ca %	10,06
Mg %	1,91
Na %	2,87
K %	7,83

Tabla 2: análisis del biochar ensayo trigo de invierno 2023-2024

En resumen, el biochar aportado puede ser una opción para la fertilización y encalado en cultivos de trigo, ya que corrige la acidez, mejora la estructura del suelo y aporta nutrientes esenciales. Esto puede resultar en un mayor rendimiento y calidad del trigo, especialmente en suelos ácidos o pobres en materia orgánica.

2.5. Tesis propuestas ensayo trigo invierno 2023-2024.

Evaluar el impacto de diferentes tratamientos de fertilización, utilizando biochar, cal y control, sobre el rendimiento y calidad de trigo variedad Montecarlo. Se evaluaron diferentes tasas de aplicación de biochar y cal en comparación con un tratamiento de control, aplicando las mismas cantidades de fertilizantes comerciales en todos los tratamientos.

2.5.1. Fertilización aplicada por tesis:

TESIS	kg/ha	20-8-10 kg/ha	Cobertera N27 kg/ha
BIOCHAR	1000	400	200
CAL	2000	400	200
CONTROL	0	400	200

Tabla 3: fertilización aplicada por tesis ensayo trigo de invierno 2023-2024

Biochar: Se aplicó en una dosis de 1000 kg/ha. El biochar es un material carbonoso derivado de la biomasa que se utiliza como enmienda del suelo para mejorar su estructura, aumentar la retención de agua y nutrientes, y mejorar la actividad microbiana.

Cal magnesiana: se aplicó en una dosis de 2000 kg/ha. La cal es una enmienda alcalina que corrige la acidez del suelo, mejorando la disponibilidad de nutrientes y la estructura del suelo.

Fertilizante 20-8-10: Se aplicó una dosis uniforme de 400 kg/ha en todos los tratamientos. Este fertilizante tiene una proporción de 20% nitrógeno (N), 8% fósforo (P) y 10% potasio (K), lo que proporciona los nutrientes esenciales para el desarrollo del trigo.

Cobertera de N27: Se aplicó una dosis uniforme de 200 kg/ha en todos los tratamientos. Este fertilizante contiene 27% de nitrógeno, aplicado en cobertera para asegurar un suministro continuo de nitrógeno durante las etapas críticas de crecimiento del trigo, especialmente en el desarrollo de espigas y granos.

2.5.2. Hipótesis del Ensayo:

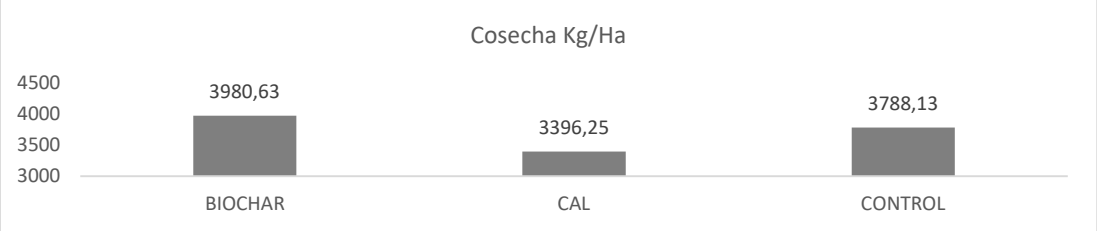
Biochar: se espera que la aplicación de 1000 kg/ha de biochar, en combinación con fertilización convencional, mejore las propiedades del suelo (retención de agua, materia orgánica y capacidad de intercambio catiónico) y, por lo tanto, incremente el rendimiento y calidad del cultivo de trigo.

Cal: la aplicación de 2000 kg/ha de cal se anticipa que mejorará las condiciones del suelo al reducir su acidez, aumentando la disponibilidad de nutrientes como calcio y magnesio, lo cual debería impactar positivamente en la calidad y tamaño del grano, así como en el rendimiento total.

Control: sin la adición de biochar o cal, el tratamiento control muestre un rendimiento inferior en comparación con los otros tratamientos, dado que no cuenta con enmiendas que mejoren las propiedades del suelo, aunque la aplicación de fertilizantes debe garantizar un crecimiento razonable del trigo.

2.6. Cosecha ensayo trigo invierno 2023-2024.

2.6.1. Rendimiento ensayo trigo invierno 2023-2024.



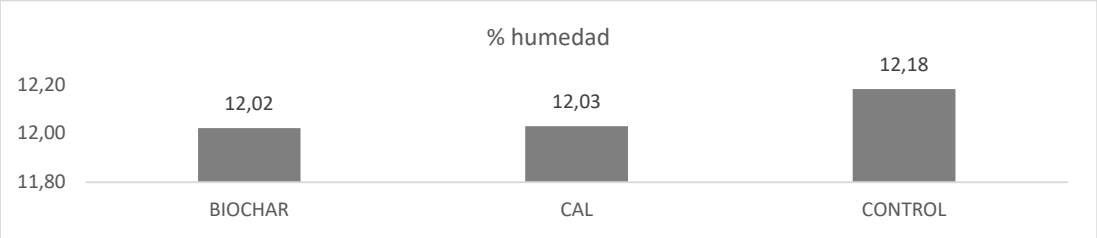
Gráfica 2: cosecha de trigo de invierno 2023-2024

El tratamiento con biochar presentó el mayor rendimiento con 3980,63 kg/ha, superior tanto al tratamiento con Cal (3396,25 kg/ha) como al Control (3788,13 kg/ha). Esto sugiere que el biochar podría tener un efecto positivo en la productividad del trigo, posiblemente mejorando la retención de agua y nutrientes en el suelo.

Cal: aunque la aplicación de cal es conocida por su capacidad para corregir la acidez del suelo, el rendimiento fue el más bajo entre los tratamientos. Esto podría indicar que el impacto de la cal fue menos significativo en comparación con el biochar, al menos en las condiciones específicas del ensayo.

Control: rendimiento del tratamiento control fue intermedio, lo que sugiere que el suelo base, sin enmiendas, ya tenía una fertilidad moderada. El hecho de que el biochar mejoró el rendimiento sugiere que la enmiendas a base de biochar afectan positivamente el cultivo.

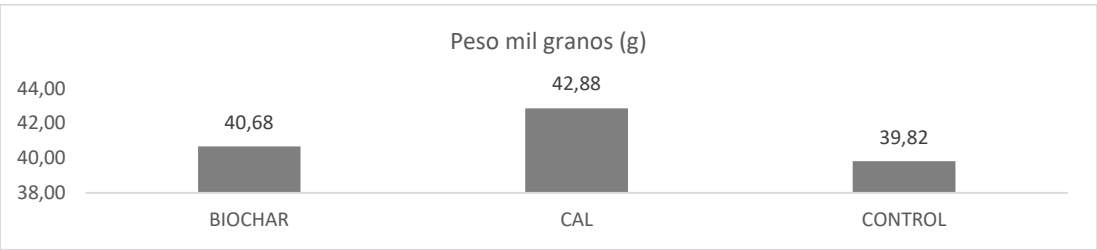
2.6.2. Humedad (%humedad):



Gráfica 3: tanto por ciento de humedad obtenido ensayo trigo invierno 2023-2024

Los tres tratamientos muestran niveles de humedad muy similares (12,02% para biochar, 12,03% para cal y 12,18% para el control), lo que indica que la humedad en los granos cosechados no fue significativamente afectada por los tratamientos.

2.6.3. Peso de mil granos (g)



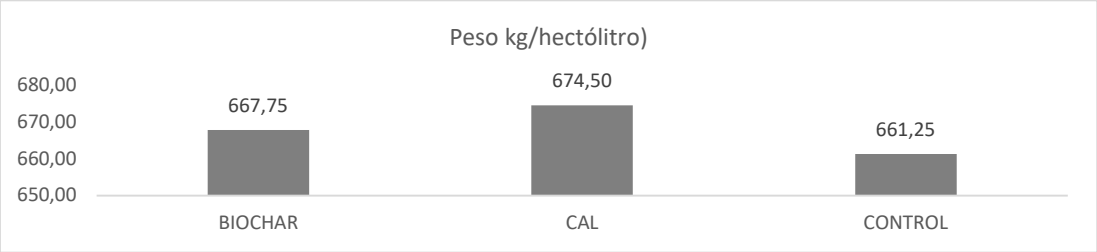
Gráfica 4: peso de mil granos ensayo trigo de invierno 2023-2024

Cal: logró el mayor peso con 42,88 g, lo que indica una mejor calidad del grano, posiblemente debido a la mejora de la disponibilidad de ciertos nutrientes como el calcio y otros cationes que afectan la formación de los granos.

Biochar: tuvo un peso de 40,68 g, menor que el de cal pero mayor que el del control. Esto podría estar relacionado con la capacidad del biochar para mejorar las propiedades físicas del suelo, sin necesariamente tener un efecto tan fuerte en el tamaño de los granos como la cal.

Control: obtuvo el menor peso, con 39,82 g, lo que indica que sin tratamiento, la formación de los granos fue la más deficiente en comparación con los otros tratamientos.

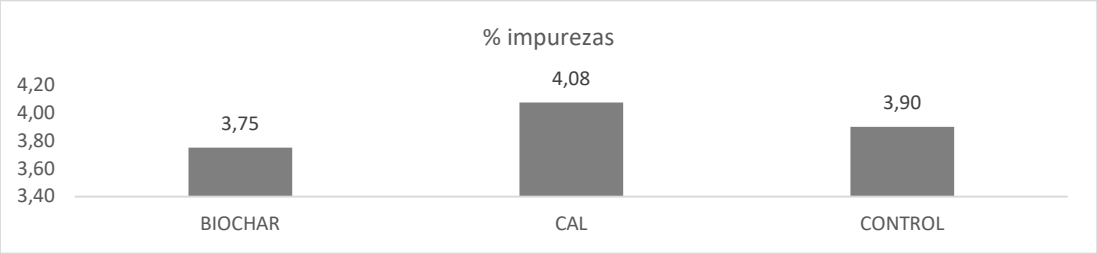
2.6.4. Peso específico (kg/hL):



Gráfica 5: peso específico kilogramos por hectólitro ensayo trigo invierno 2023-2024

Aunque la diferencia no es muy significativa, el tratamiento con cal tiene el mayor peso específico, lo que puede reflejar una mejor calidad del grano en términos de densidad. El biochar también supera al control en este aspecto.

2.6.5. Impurezas (%):



Gráfica 6: tanto por ciento de impurezas ensayo trigo de invierno 2023-2024

El biochar muestra el porcentaje más bajo de impurezas, lo que sugiere una mejor calidad del grano cosechado en comparación con los otros tratamientos.

3. Conclusiones ensayo trigo invierno 2023-2024

El biochar destaca por tener el mayor rendimiento (3980,63 kg/ha), un peso de mil granos intermedio y el menor porcentaje de impurezas. La cal mejora el peso de mil granos y el peso específico, aunque presenta un rendimiento inferior al del biochar. El control muestra resultados intermedios en rendimiento y calidad, aunque sufre en cuanto al peso de mil granos y el peso específico.

El uso de biochar parece ser una opción prometedora para mejorar tanto el rendimiento como la calidad del trigo en este ensayo, con mejores resultados que la cal en la mayoría de las variables analizadas. El biochar mostró el mayor impacto positivo en el rendimiento del cultivo de trigo, lo que sugiere que es una enmienda eficiente para mejorar la productividad, posiblemente debido a su capacidad de mejorar la estructura del suelo y retener más humedad y nutrientes.

Respecto a la calidad del grano el tratamiento con cal tuvo un efecto más pronunciado en el peso de mil granos y en el peso específico, lo que sugiere que es más efectivo en mejorar la calidad del grano en cuanto a densidad y tamaño. El biochar no logró el mejor rendimiento en todas las variables, pero mostró una combinación equilibrada de mejoras en rendimiento, peso de grano y menor cantidad de impurezas, lo que lo convierte en una opción efectiva para aumentar la productividad y la calidad.

4. Anexo fotográfico.



Ilustración 2: trigo invierno durante desarrollo.



Ilustración 3: maduración trigo de invierno 2023-2024



Ilustración 4: toma de muestras trigo invierno 2023-2024



Ilustración 5: campo muestreado



Ilustración 6: pruebas de calidad de grano

ENSAYO TRIGO PRIMAVERA 2024

POLLINAZA DIGESTATO QUIMICA

APROAVI: APROVECHAMIENTO INTEGRAL DE LA POLLINAZA PARA LA MEJORA DE LA SOSTENIBILIDAD Y COMPETITIVIDAD DEL SECTOR AVÍCOLA

Nº DE EXPEDIENTE: FEADER 2022/010B

1. Introducción. 2

1.1. Efectos de fertilización con pollinaza, digestato y química en trigo de primavera: 2

1.2. Objetivos del ensayo. 2
1.2.1. Los fertilizantes testados: pollinaza y digestato 2
1.2.2. Pollinaza. 2
1.2.3. El digestato. 3

2. Material y métodos: ensayo trigo de primavera 2024. 4

2.1. Lugar del ensayo trigo de primavera 2024. 4

2.2. Análisis del suelo del lugar del ensayo 4

2.3. Meteorología observada durante el ensayo trigo de primavera 2024 6
2.3.1. Precipitación (P) 7
2.3.2. Temperatura Media 7
2.3.3. Impacto Meteorológico en el Ensayo 8

2.4. Trigo Sensas. 8

2.5. Análisis de la pollinaza utilizada. 9

2.6. Análisis del digestato añadido. 11

2.7. Tesis propuestas ensayo trigo de primavera 2024. 12
2.7.1. Fertilización aplicada por tesis. 12

2.8. Cosecha ensayo trigo de primavera 2024. 13
2.8.1. Rendimiento ensayo trigo de primavera 2024. 13
2.8.2. Humedad (%humedad): 14
2.8.3. Peso de mil granos (g) 14
2.8.4. Peso específico (kg/hL): 14
2.8.5. Impurezas (%): 15

3. Conclusiones ensayo trigo de primavera 2024 15

4. Anexo fotográfico. 17

Gráfica 1: precipitación y temperatura durante el ensayo trigo de invierno 2023-2024 6
Gráfica 2: cosecha de trigo de primavera 2024 13
Gráfica 3: tanto por ciento de humedad obtenido ensayo trigo de primavera 2024 14
Gráfica 4: peso de mil granos ensayo trigo de primavera 2024 14
Gráfica 5: peso específico kilogramos por hectólitro ensayo trigo de primavera 2024 14
Gráfica 6: tanto por ciento de impurezas ensayo trigo de primavera 2024 15

Tabla 1: análisis de suelo del lugar del ensayo trigo de primavera 2024 5
Tabla 2: análisis de la pollinaza ensayo trigo primavera 2024 10
Tabla 3: composición del digestato añadido ensayo trigo primavera 2024 11
Tabla 4: fertilización aplicada por tesis ensayo trigo de primavera 2024 12

Ilustración 1: lugar ensayo trigo de primavera 2024 4
Ilustración 2: aplicación de las diferentes tesis de fertilización abril 2024 17
Ilustración 3: aplicación de fertilización antes de siembra 17
Ilustración 4: trigo recién nacido mayo 2024 18
Ilustración 5: estado del ensayo de trigo agosto 2024 18
Ilustración 6: determinaciones de calidad de grano septiembre 2024 19

Trigo primavera 2023-2024: ensayo capacidad encalante con biochar.

1. Introducción.

El ensayo busca evaluar el efecto de diferentes fuentes de fertilización orgánica (pollinaza y digestato) y química en el rendimiento, calidad del grano y salud del suelo en la variedad de trigo Sensas, durante el ciclo agrícola de 2024. Sensas es una variedad conocida por su alto potencial de rendimiento y adaptabilidad, lo que la convierte en una candidata ideal para ensayos de este tipo. La producción de trigo está altamente influenciada por las características del suelo, especialmente el pH, que afecta la disponibilidad de nutrientes y la salud general del cultivo. Uno de los métodos clave para mejorar la productividad del trigo es el uso de enmiendas encalantes como la pollinaza y el digestato que ayudan a corregir la acidez del suelo y mejorar la fertilidad.

1.1. Efectos de fertilización con pollinaza, digestato y química en trigo de primavera:

- Disponibilidad de nutrientes: El encalado incrementa la disponibilidad de nutrientes esenciales como el calcio (Ca) y el magnesio (Mg), a la vez que reduce la toxicidad del aluminio y del manganeso, que tienden a ser problemáticos en suelos ácidos.
- Estructura del suelo: Mejora la estructura del suelo, facilitando la aireación y el drenaje, condiciones óptimas para el desarrollo radicular del trigo.
- Actividad microbiana: Un pH equilibrado favorece la actividad de los microorganismos del suelo, que juegan un papel fundamental en la mineralización de la materia orgánica y la liberación de nutrientes para las plantas. Tipos de Encalantes Utilizados en Trigo

1.2. Objetivos del ensayo.

Determinar el impacto de la aplicación de pollinaza, digestato y fertilización química tradicional en los siguientes parámetros:

- Rendimiento del trigo (kg/ha)
- Peso específico (kg/hl)
- Peso de mil granos (g)

1.2.1. Los fertilizantes testados: pollinaza y digestato

El digestato es un subproducto del proceso de digestión anaeróbica, que ocurre cuando se descomponen materiales orgánicos (como estiércol, residuos agrícolas o cultivos energéticos) en ausencia de oxígeno en un biodigestor. El proceso genera biogás (energía renovable) y deja como residuo el digestato. El digestato es ideal para una fertilización rápida, proporcionando nutrientes rápidamente disponibles, especialmente nitrógeno. Es una opción eficiente para quien busque mejorar rápidamente el rendimiento del cultivo sin depender de fertilizantes químicos sintéticos. La pollinaza, por otro lado, es más adecuada para aquellos que buscan una fertilización sostenida en el tiempo, con un beneficio prolongado tanto para el cultivo como para la estructura del suelo.

1.2.2. Pollinaza.

La pollinaza es el estiércol o excremento seco de aves de corral (pollos, pavos, gallinas), a menudo mezclado con material de cama (viruta, paja, etc.). Se utiliza ampliamente como fertilizante orgánico en la agricultura por su alto contenido en nutrientes.

- ✓ Composición Nutricional: la pollinaza tiene una composición variable, dependiendo de la dieta de las aves, pero en general es rica en nitrógeno, fósforo y potasio.
- ✓ Nitrógeno (N): Entre 2-6%, parte de este nitrógeno es orgánico, lo que implica una liberación más lenta y gradual.
- ✓ Fósforo (P): Generalmente alrededor de 2-4%.
- ✓ Potasio (K): Entre 1-3%.
- ✓ Materia orgánica: La pollinaza tiene un alto contenido en materia orgánica, lo que ayuda a mejorar la estructura del suelo, retener agua y aumentar la actividad microbiana.
- ✓ Otros nutrientes y micronutrientes: Aporta además elementos como calcio, magnesio, azufre, hierro, cobre, manganeso, y otros micronutrientes esenciales.

Propiedades de la pollinaza

- ✓ Forma sólida: Se presenta en forma seca o semiseca y debe incorporarse al suelo o ser distribuida uniformemente para evitar pérdidas de nitrógeno por volatilización.
- ✓ Liberación gradual de nutrientes: La liberación de nitrógeno y otros nutrientes es más lenta y prolongada en el tiempo en comparación con los fertilizantes sintéticos, proporcionando un suministro continuo a las plantas.
- ✓ Aumento de la materia orgánica en el suelo: Al ser rica en materia orgánica, mejora la retención de agua y la aireación del suelo, fomentando la biodiversidad microbiana.
- ✓ Mejora de la capacidad de intercambio catiónico (CIC): Mejora la capacidad del suelo para retener nutrientes y liberarlos lentamente.

Beneficios:

- ✓ Aporte de materia orgánica: Mejora significativamente la calidad del suelo a largo plazo, favoreciendo su estructura y la capacidad de retener nutrientes.
- ✓ Sostenibilidad: Al ser un subproducto de la producción avícola, se trata de un fertilizante orgánico que valoriza residuos y reduce la dependencia de productos químicos.
- ✓ Efecto prolongado: La liberación lenta de nutrientes asegura una fertilización duradera.
- ✓ Promueve la vida microbiana: Fomenta una mayor actividad biológica en el suelo, lo que es beneficioso para la salud del suelo a largo plazo.

1.2.3. El digestato.

El digestato es un subproducto del proceso de digestión anaeróbica, que ocurre cuando se descomponen materiales orgánicos (como estiércol, residuos agrícolas o cultivos energéticos) en ausencia de oxígeno en un biodigestor. El proceso genera biogás (energía renovable) y deja como residuo el digestato. El digestato suele contener niveles variables de nitrógeno, fósforo y potasio (NPK), aunque estos valores dependen de la materia prima utilizada en el biodigestor.

- ✓ Nitrógeno (N): Entre 2-6% del contenido total, en su mayoría como nitrógeno mineral (disponible para la planta), lo que permite una absorción más rápida.
- ✓ Fósforo (P): Generalmente alrededor de 0,3-0,6%.
- ✓ Potasio (K): Entre 1-2%.
- ✓ Materia orgánica: Aunque menor que en otros abonos orgánicos como el compost o la pollinaza, el digestato aún aporta una buena cantidad de carbono orgánico, mejorando la estructura del suelo.
- ✓ Otros micronutrientes: Aporta también otros minerales y elementos traza como calcio, magnesio, azufre, y algunos metales esenciales para el crecimiento de las plantas.

Propiedades:

- ✓ Liberación rápida de nutrientes: Al contener una alta proporción de nitrógeno mineral, los nutrientes son rápidamente disponibles para las plantas.
- ✓ Enriquecimiento del suelo: Aunque la cantidad de materia orgánica es menor, mejora la actividad microbiana del suelo y puede tener un impacto positivo a largo plazo.
- ✓ Bajo riesgo de patógenos: El proceso de digestión anaeróbica a menudo destruye patógenos, haciéndolo seguro para su aplicación.

Beneficios:

- ✓ Fertilización rápida: Provee nitrógeno en forma fácilmente asimilable, similar a los fertilizantes sintéticos, pero con el beneficio adicional de mejorar la estructura del suelo.
- ✓ Reducción de gases de efecto invernadero: Al usar digestato, se evita el uso de fertilizantes químicos y se da valor a los residuos orgánicos.
- ✓ Sostenibilidad: El digestato es una opción renovable, producto de la valorización de residuos.

2. Material y métodos: ensayo trigo de primavera 2024.

2.1. Lugar del ensayo trigo de primavera 2024.

Los ensayos se realizaron en la parcela 1568 del polígono 502 de Sandiás en Ourense en y en la posición que indica la imagen al pie:

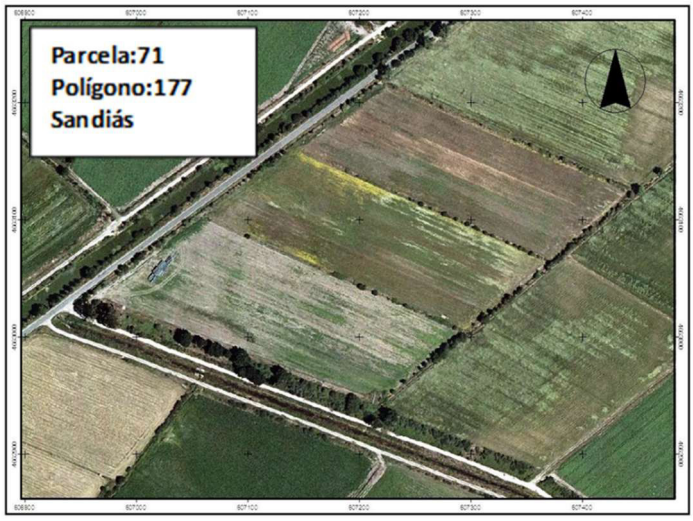


Ilustración 1: lugar ensayo trigo de primavera 2024

2.2. Análisis del suelo del lugar del ensayo

A continuación, se presenta un análisis detallado de los resultados del suelo de la parcela donde se llevará a cabo el ensayo de trigo primavera con tratamientos de fertilización a base de pollinaza, digestato y fertilización química. Estos datos permiten evaluar la calidad del suelo y planificar adecuadamente el manejo del cultivo durante la campaña.

PARCELA ENSAYOS CTC

pH en agua (1:2,5)	5.10
Materia orgánica (%)	12.98%
Fósforo asimilable ppm (Olsen)	63.32
K Potasio asimilable ppm	149.84
Ca Calcio ppm	407.58
Mg Magnesio ppm	49.31
Na Sodio ppm	168.08

Tabla 1: análisis de suelo del lugar del ensayo trigo de primavera 2024

El suelo de esta parcela tiene una buena fertilidad general, con altos niveles de materia orgánica, fósforo y potasio. El uso de pollinaza, digestato y fertilización química en el ensayo podría complementar los niveles de nutrientes, pero es necesario prestar atención al pH ácido y al nivel de sodio, para evitar posibles bloqueos en la absorción de nutrientes o problemas de salinidad. Un manejo adecuado de estos factores clave garantizará un buen desarrollo del cultivo de trigo primavera.

2.2.1. pH del Suelo (5.10 en Agua)

El pH ligeramente ácido (5.10) indica que el suelo está en la franja donde ciertos nutrientes pueden tener una disponibilidad limitada, en especial el fósforo, calcio y magnesio. Un pH por debajo de 5.5 también puede afectar la disponibilidad de micronutrientes como el manganeso y aluminio, lo cual puede ser tóxico en concentraciones elevadas. Para el ensayo, sería recomendable monitorear los niveles de pH y, si es necesario, realizar enmiendas con cal (si no está ya en los planes del ensayo) para mejorar la disponibilidad de nutrientes clave.

2.2.2. Materia Orgánica (12.98%)

El contenido de materia orgánica es muy alto, lo cual es un punto positivo para el ensayo. Un nivel elevado de materia orgánica proporciona varios beneficios:

- ✓ Mejora la capacidad de retención de agua del suelo.
- ✓ Incrementa la actividad microbiana que favorece la mineralización de nutrientes.
- ✓ Proporciona una lenta pero continua fuente de nutrientes a lo largo del ciclo del cultivo.

Este alto contenido de materia orgánica será un complemento positivo para los tratamientos con pollinaza y digestato, ya que ambos productos orgánicos podrían potenciar la actividad microbiana y aumentar aún más la disponibilidad de nutrientes.

2.2.3. Fósforo Asimilable (63.32 ppm, Olsen)

El nivel de fósforo disponible es elevado, lo cual es favorable para el desarrollo del sistema radicular del trigo, especialmente en las etapas iniciales de crecimiento. No obstante, dado que el fósforo tiende a fijarse en suelos ácidos como este, es importante tener en cuenta que parte de este fósforo puede estar menos disponible para las plantas. Los tratamientos con digestato o pollinaza, que a menudo contienen fósforo, podrían complementar este nutriente.

2.2.4. Potasio Asimilable (149.84 ppm)

El nivel de potasio es moderadamente alto, lo cual es positivo para el ensayo. El potasio es fundamental para el desarrollo de los cultivos, ya que ayuda a regular la apertura de los estomas, mejora la tolerancia al estrés hídrico y es crucial para la calidad del grano y su llenado. El aporte

adicional de digestato y pollinaza puede mejorar aún más la disponibilidad de potasio, dependiendo de su contenido en estos materiales.

2.2.5. Calcio (407.58 ppm)

El calcio es un nutriente esencial para el desarrollo celular y la estructura de la planta. Este nivel de calcio es moderado, lo que debería ser suficiente para mantener el desarrollo adecuado del cultivo, aunque en suelos ácidos el calcio puede estar menos disponible. El calcio aportado por las enmiendas orgánicas o químicas podría complementar estos niveles, mejorando la estructura del suelo y aumentando la disponibilidad de otros nutrientes como el potasio y magnesio.

2.2.6. Magnesio (49.31 ppm)

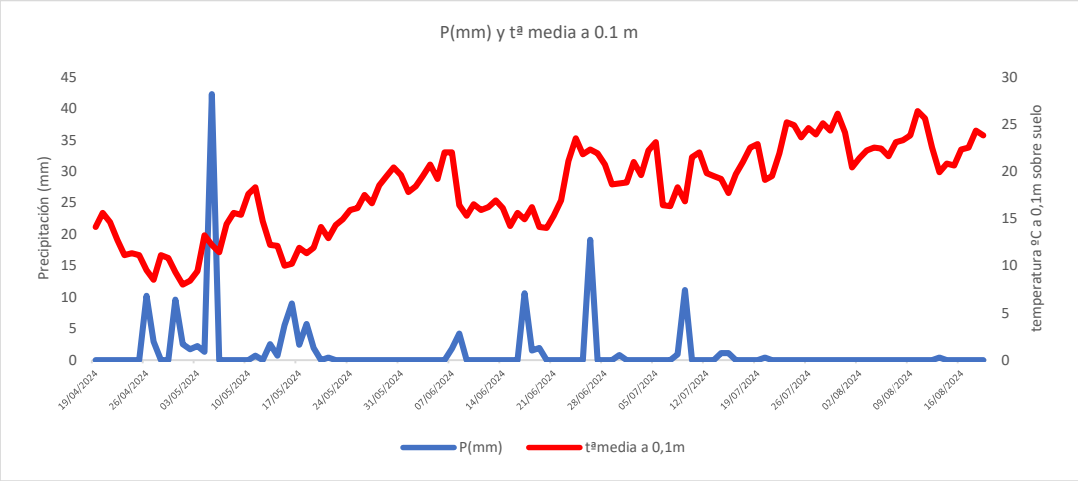
El magnesio es moderado y debería ser adecuado para el cultivo, ya que es un componente fundamental de la clorofila y está involucrado en la fotosíntesis. En suelos ácidos como este, se debe tener cuidado de que el magnesio no esté bloqueado por el exceso de potasio o calcio. Aún así, los tratamientos con pollinaza o digestato podrían aportar cantidades adicionales de magnesio si fuera necesario.

2.2.7. Sodio (168.08 ppm)

El nivel de sodio es algo elevado, lo cual podría ser una preocupación si el contenido aumenta, ya que un exceso de sodio puede causar problemas de salinidad y afectar la capacidad de las plantas para absorber agua y nutrientes. Este nivel de sodio debe monitorearse, especialmente si se planea agregar digestato, que en algunos casos puede contener sodio. Si los niveles de sodio son altos, podrían comprometer el desarrollo del cultivo, afectando negativamente la estructura del suelo y su capacidad para retener agua.

2.3. Meteorología observada durante el ensayo trigo de primavera 2024

Este análisis meteorológico cubre la evolución de la precipitación y las temperaturas promedio del suelo a 0,1 metros durante el ensayo del cultivo de trigo desde el 19 de abril hasta el 19 de agosto de 2024. Estos parámetros son fundamentales para entender el impacto de las condiciones climáticas en el desarrollo del cultivo.



Gráfica 1: precipitación y temperatura durante el ensayo trigo de invierno 2023-2024

El clima proporcionó un buen inicio para el trigo de primavera, con precipitaciones adecuadas en los meses clave de abril y principios de mayo, lo que permitió un crecimiento saludable. La disminución de las precipitaciones a partir de junio y las altas temperaturas en julio y agosto podrían haber impactado en la maduración y llenado de granos, lo que podría haber afectado el rendimiento final. El ensayo de trigo estuvo marcado por una distribución irregular de las lluvias y un aumento constante de las temperaturas. Las lluvias escasas y las temperaturas más cálidas en los meses críticos de llenado de grano (junio y julio) probablemente impactaron negativamente el rendimiento del cultivo, especialmente en cuanto al peso del grano. Sin embargo, las condiciones frescas y las lluvias intermitentes al inicio de la campaña proporcionaron un buen ambiente para el establecimiento y desarrollo vegetativo del trigo.

2.3.1. Precipitación (P)

La precipitación es un factor clave para el crecimiento del trigo, influenciando la disponibilidad de agua para la planta. Durante el período del ensayo, la distribución de las lluvias muestra ciertos patrones clave:

- ✓ **Abril-Mayo:**

Las lluvias fueron escasas en general, con cero precipitación en la mayor parte del mes de abril. La primera lluvia significativa ocurrió el 26 de abril (10,2 mm), seguida de lluvias intermitentes hasta el 05 de mayo, donde se registró la mayor cantidad con 42,3 mm. Esto marca el final de un período seco y el comienzo de una mayor humedad en el suelo. En mayo, las lluvias fueron moderadas, con un total aproximado de 32,9 mm distribuidos en días como el 15 de mayo (5,5 mm) y el 18 de mayo (5,7 mm). El resto del mes mantuvo precipitaciones menores.

- ✓ **Junio:**

Un mes mayormente seco, con eventos puntuales de lluvias como el 17 de junio (10,6 mm) y el 26 de junio (19,1 mm). El resto del mes tuvo lluvias mínimas, con un total menor a 40 mm, lo que podría haber generado cierta limitación hídrica para el cultivo durante este período crítico de crecimiento.

- ✓ **Julio-Agosto:**

Julio fue seco, con poca precipitación acumulada, destacando solo lluvias leves el 9 de julio (11,1 mm) y 15 de julio (1,1 mm). Agosto siguió la misma tendencia, con un evento de lluvias leve el 13 de agosto (0,4 mm), lo que indica condiciones secas en la última parte del ensayo.

2.3.2. Temperatura Media

Las temperaturas del suelo a una profundidad de 0,1 metros sobre el cultivo también tuvieron una gran variación a lo largo del ensayo. Estas influyen directamente en la germinación, el desarrollo radicular y la absorción de nutrientes por parte del trigo.

- ✓ **Abril-Mayo:**

Las temperaturas del suelo en abril variaron entre 9,5°C y 15,6°C, siendo más frescas durante los últimos días del mes tras la llegada de lluvias. Durante mayo, la temperatura media fue más moderada, oscilando entre 8°C y 18,3°C, lo que probablemente favoreció el desarrollo inicial de las plantas. Sin embargo, las noches frescas de mayo pudieron ralentizar el crecimiento en algunos días.

- ✓ **Junio:**

Las temperaturas aumentaron progresivamente, con valores que variaron entre 14°C y 22,3°C. El suelo empezó a calentarse, favoreciendo el crecimiento de las plantas en esta fase vegetativa del trigo. Las lluvias ocasionales en junio, junto con el aumento gradual de las temperaturas, ofrecieron condiciones propicias para el crecimiento de las plantas.

- ✓ **Julio-Agosto:**

Durante julio, las temperaturas oscilaron entre 16,3°C y 26,4°C, con máximos a partir del 20 de julio en adelante, lo que representa un período de calor significativo. Esto podría haber influido en el estrés hídrico del cultivo, dado que las lluvias fueron mínimas. En agosto, las temperaturas continuaron siendo altas, alcanzando un máximo de 26,4°C el 10 de agosto y manteniéndose alrededor de 22°C-24°C durante gran parte del mes. Estas temperaturas son ideales para el desarrollo final del cultivo, aunque la ausencia de lluvias podría haber afectado el llenado del grano.

2.3.3. Impacto Meteorológico en el Ensayo

Inicio de Temporada (Abril-Mayo):

Las temperaturas frescas y las lluvias dispersas en mayo proporcionaron condiciones favorables para la germinación y el establecimiento del cultivo. Sin embargo, el retraso de las lluvias importantes hasta finales de abril pudo haber afectado el vigor inicial.

Crecimiento Vegetativo (Junio):

Las temperaturas más cálidas y las lluvias moderadas en junio habrían favorecido el crecimiento vegetativo del trigo, pero la falta de lluvias más frecuentes pudo haber limitado el crecimiento en algunas áreas, especialmente en suelos menos profundos.

Llenado de Grano y Maduración (Julio-Agosto):

Las altas temperaturas y la falta de lluvias en julio y agosto probablemente generaron cierto estrés hídrico, lo que puede haber reducido el tamaño y peso del grano. Las precipitaciones puntuales a finales de julio y principios de agosto fueron insuficientes para compensar el déficit hídrico acumulado.

2.4. Trigo Sensas.

Sensas es una variedad versátil, con un excelente equilibrio entre rendimiento y calidad, lo que la convierte en una opción popular para los agricultores que buscan trigo blando de alto valor para la producción de harina panadera. Esta variedad responde muy bien a una buena gestión de fertilización con nitrógeno, fósforo y potasio. Además, puede beneficiarse de fertilizantes orgánicos como pollinaza y digestato, como se está evaluando en el ensayo. Aunque es resistente a condiciones de sequía, se recomienda asegurar un riego adecuado durante la fase de llenado de grano. Mantener un buen programa de protección contra enfermedades fúngicas es esencial para maximizar el potencial de rendimiento.

Trigo blando de invierno o primavera, dependiendo de las zonas y prácticas agronómicas. Se utiliza principalmente para la producción de harina panadera de buena calidad. Ciclo medio, con un buen equilibrio entre el crecimiento inicial y el llenado de grano. Adecuado para siembras

tanto tempranas como tardías. Alto potencial de rendimiento en diversas condiciones climáticas y de manejo agronómico. Es una variedad que responde bien a la fertilización y buenas prácticas agronómicas, lo que la hace apta para cultivos intensivos. Peso específico alto, garantizando granos de buena densidad. Peso de mil granos (PMG): Elevado, lo que indica granos grandes y con buen contenido de almidón. Calidad panadera: Buena calidad para la molienda y la producción de harinas, con un buen balance de proteínas y gluten, ideal para productos panificados. Resistencia a enfermedades: buen nivel de resistencia a enfermedades comunes del trigo, como la roya (amarilla y parda), el oídio y las manchas foliares. Moderada resistencia a fusariosis en la espiga, lo que reduce los riesgos en zonas húmedas.

Sensas es conocida por su adaptabilidad a diferentes tipos de suelos y condiciones climáticas. Responde bien en suelos fértiles, pero también se adapta a suelos de fertilidad moderada con un buen manejo de fertilización. Buena tolerancia a la sequía moderada, pero como con la mayoría de las variedades de trigo, prefiere condiciones de riego o lluvia suficientes. Tolerante a heladas en etapas iniciales, lo que lo hace adecuado para regiones con inviernos fríos. Planta de altura media, lo que reduce el riesgo de acame (tumbado) bajo condiciones de alta fertilización nitrogenada. Se recomienda una densidad de siembra moderada-alta, ajustada según la fertilidad del suelo y las condiciones climáticas de la región.

2.5. Análisis de la pollinaza utilizada.

El análisis de la pollinaza destinada al ensayo de trigo de primavera proporciona información valiosa sobre su composición y cómo contribuirá a la fertilidad del suelo y al desarrollo del cultivo. A continuación, se comentan los parámetros clave y su impacto en el ensayo:

- ✓ pH (8,15)

La pollinaza tiene un pH alcalino, lo que puede ser beneficioso para neutralizar la acidez del suelo (pH 5.10) de la parcela de ensayo. Este pH más alto contribuirá a incrementar el pH del suelo, mejorando la disponibilidad de nutrientes como el fósforo, calcio y magnesio, que tienden a ser menos accesibles en suelos ácidos. No obstante, hay que evitar un aumento excesivo del pH para no causar deficiencias de micronutrientes como hierro, manganeso y zinc.

- ✓ Humedad (11,78%)

El porcentaje de humedad es relativamente bajo (11,78%), lo que significa que la pollinaza es un producto concentrado con una mayor proporción de materia seca. Esto es positivo, ya que permite una mayor densidad de nutrientes por unidad de peso aplicado, aumentando la eficiencia de la fertilización y facilitando su manejo y transporte.

- ✓ Densidad (358,5 kg/m^3)

La densidad de la pollinaza es moderada, lo que facilita su aplicación en campo. Este valor influye en la cantidad de producto que se debe aplicar por hectárea, dado que a mayor densidad, menor volumen es necesario para cubrir la misma área de terreno.

- ✓ Nitrógeno Total (3,61%)

El contenido de nitrógeno es elevado (3,61%), lo que convierte a la pollinaza en una excelente fuente de nitrógeno para el trigo. El nitrógeno es fundamental para el desarrollo vegetativo del trigo, mejorando el crecimiento de la planta y el rendimiento en grano. Este valor indica que la

pollinaza podrá suplir una parte significativa de los requerimientos de nitrógeno del cultivo, reduciendo la necesidad de fertilizantes químicos nitrogenados adicionales.

- ✓ Fósforo (P) (2,28%)

El fósforo es moderadamente alto (2,28%), lo cual es beneficioso para mejorar el desarrollo radicular del trigo, especialmente en las primeras etapas de crecimiento. Dado que el suelo de ensayo ya cuenta con altos niveles de fósforo (63,32 ppm), la adición de pollinaza contribuirá a mantener estos niveles y asegurar una adecuada disponibilidad durante todo el ciclo del cultivo.

- ✓ Calcio (Ca) (1,94%)

El calcio es esencial para la formación de las paredes celulares y la estructura de la planta. El 1,94% de calcio presente en la pollinaza es un aporte valioso, sobre todo en suelos ácidos como el de la parcela (pH 5.10), donde el calcio suele estar en menor disponibilidad. Este aporte ayudará a mejorar la fertilidad del suelo y el crecimiento del trigo, complementando el calcio disponible en el suelo (407,58 ppm).

- ✓ Potasio (K) (1,51%)

El potasio es importante para la regulación hídrica y el metabolismo de los carbohidratos en las plantas. Un contenido de 1,51% de potasio en la pollinaza es un aporte adecuado para las necesidades del cultivo. Esto será un complemento útil, ya que el suelo de ensayo tiene niveles moderados de potasio (149,84 ppm), y el potasio adicional favorecerá el llenado de grano y la calidad final de la cosecha.

- ✓ Magnesio (Mg) (0,23%)

El magnesio presente en la pollinaza es bajo (0,23%), pero es suficiente para complementar los niveles de magnesio en el suelo (49,31 ppm). Este nutriente es fundamental para la fotosíntesis y la formación de clorofila, por lo que cualquier aporte adicional será beneficioso para el crecimiento del trigo.

- ✓ Sodio (Na) (0,57%)

El contenido de sodio es relativamente elevado (0,57%) para un fertilizante orgánico. Dado que el suelo de la parcela ya tiene un nivel de sodio alto (168,08 ppm), es necesario monitorear el impacto de este aporte adicional de sodio.

	POLLINAZA
pH	8,15
%humedad	11,78
Densidad kg/m^3	358,5
Nitrógeno total %	3,61
P%	2,28%
Ca %	1,94%
K %	1,51%
Mg %	0,23%
Na %	0,57%

Tabla 2: análisis de la pollinaza ensayo trigo primavera 2024

2.6. Análisis del digestato añadido.

El digestato, un subproducto de la digestión anaeróbica, tiene un importante potencial como fertilizante orgánico en el ensayo de trigo de primavera debido a su aporte de nutrientes esenciales. Es un fertilizante líquido con una alta proporción de agua y un buen contenido de nitrógeno. Su uso es ideal en sistemas agrícolas que puedan manejar aplicaciones líquidas, como los cultivos bajo riego o en suelos que se benefician de una mayor adición de materia orgánica y agua. Debido a su pH cercano a 8, este digestato es adecuado para suelos ácidos, donde puede ayudar a neutralizar la acidez, aunque de forma moderada. El aporte de nitrógeno es significativo, lo que lo hace competitivo en términos de suministro de nutrientes en comparación con otros fertilizantes orgánicos.

Para cultivos como el trigo, este digestato puede mejorar el rendimiento y la calidad del grano, aportando nutrientes de manera constante a lo largo del ciclo de cultivo.

Parámetros analizados	Digestato
pH	7,98
%humedad	92,25
Densidad kg/m³	1,023
Nitrógeno total %	2,63
%Materia seca	3,70%

Tabla 3: composición del digestato añadido ensayo trigo primavera 2024

A continuación, se comentan los principales parámetros y su posible impacto en el cultivo de trigo:

- ✓ pH (7,98):

Un pH cercano a 8 indica que el digestato es ligeramente alcalino. Esto es típico de los digestatos provenientes de la digestión anaeróbica y significa que podría influir ligeramente en aumentar el pH del suelo, especialmente en suelos ácidos. Sin embargo, el impacto no suele ser muy significativo en la mayoría de los casos.

- ✓ Humedad (92,25%):

Un contenido de humedad tan alto significa que el digestato es mayoritariamente agua. Esto facilita su aplicación como fertilizante líquido, especialmente a través de sistemas de riego o aspersores. Sin embargo, el alto contenido de agua significa que la concentración de nutrientes por unidad de volumen es baja, por lo que necesitarás aplicar grandes cantidades para conseguir la dosis adecuada de nutrientes.

- ✓ Densidad (1,023 kg/m³):

La densidad del digestato es ligeramente superior a la del agua, lo cual es normal para un líquido con un alto contenido de materia orgánica. Esto implica que el digestato será fácil de manejar y aplicar utilizando equipos estándar para la aplicación de fertilizantes líquidos.

- ✓ Nitrógeno Total (2,63%):

Este es un valor relativamente elevado para un fertilizante orgánico líquido. El nitrógeno es esencial para el crecimiento de las plantas, particularmente para promover el desarrollo vegetativo. El nitrógeno del digestato está en forma tanto orgánica como inorgánica, lo que permite una liberación más lenta y sostenida en comparación con fertilizantes químicos. Esto contribuye a un suministro de nitrógeno a lo largo del ciclo de crecimiento del cultivo.

- ✓ Materia Seca (3,70%):

La materia seca del digestato es relativamente baja debido a su alta humedad. Esta fracción sólida contiene la mayor parte de los nutrientes, por lo que una mayor concentración de materia seca significaría más nutrientes por volumen. Sin embargo, dado que el contenido de materia seca es bajo, una mayor cantidad de digestato deberá aplicarse para alcanzar las concentraciones de nutrientes requeridas.

2.7. Tesis propuestas ensayo trigo de primavera 2024.

Evaluar el impacto de diferentes tratamientos de fertilización, utilizando biochar, cal y control, sobre el rendimiento y calidad de trigo variedad Sensas. Se evaluaron diferentes tasas de aplicación de pollinaza y digestato en comparación con un tratamiento de control, aplicando las mismas cantidades de fertilizantes comerciales en todos los tratamientos.

2.7.1. Fertilización aplicada por tesis.

Evaluar el impacto de diferentes fuentes de fertilización (química, digestato y pollinaza) en el rendimiento y calidad del cultivo de trigo de primavera, variedad Sensas, en un ensayo en parcelas de 10x6 metros. Se compararán cuatro tratamientos de fertilización para observar el efecto en el crecimiento, desarrollo y rendimiento del trigo.

tesis	Pollinaza m^3/ha	Digestato m^3/ha	20-10-10 kg/ha
BLANCO	0	0	0
QUIMICA	0	0	400
DIGESTATO	0	20	0
POLLO	20	0	0

Tabla 4: fertilización aplicada por tesis ensayo trigo de primavera 2024

BLANCO (Control)

Este tratamiento no recibirá ningún tipo de fertilización, sirviendo como control para comparar los efectos de los tratamientos fertilizados. Se observará el crecimiento natural del cultivo sin la adición de nutrientes externos.

QUÍMICA

En este tratamiento se aplicará un fertilizante químico con una fórmula de 20% nitrógeno (N), 10% fósforo (P_2O_5) y 10% potasio (K_2O). El objetivo es observar cómo la fertilización química impacta el rendimiento y calidad del trigo, proporcionando los tres principales macronutrientes de manera rápida y directa.

DIGESTATO

Este tratamiento recibirá 20 m^3/ha de digestato, que es un fertilizante orgánico líquido rico en nitrógeno, fósforo, calcio y otros nutrientes esenciales. Se evaluará la eficacia del digestato como fuente de nutrientes comparado con la fertilización química y la pollinaza.

POLLO (Pollinaza)

En este tratamiento se aplicarán 20 m^3/ha de pollinaza, una fuente rica en nitrógeno, fósforo, potasio y otros nutrientes provenientes de los desechos avícolas. El objetivo es observar cómo la fertilización orgánica con pollinaza impacta el crecimiento y el rendimiento del trigo en comparación con las otras fuentes de fertilización.

2.7.2. Hipótesis del Ensayo:

Se espera que la fertilización química (20-10-10) aumente significativamente el rendimiento del trigo debido a la rápida disponibilidad de nutrientes y a la precisión de entrega de los mismos sobre el cultivo.

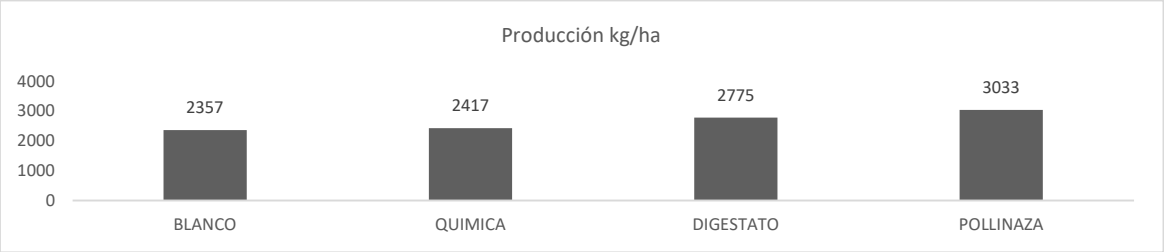
El digestato y la pollinaza, al ser fertilizantes orgánicos, proporcionarán un crecimiento más sostenido, con beneficios potenciales para la salud del suelo y la estructura del cultivo a largo plazo.

El tratamiento con digestato podría ofrecer un balance favorable de nutrientes, particularmente en suelos con baja disponibilidad de calcio y fósforo.

El tratamiento con pollinaza podría mejorar la fertilidad del suelo, al aumentar la materia orgánica y proporcionar una liberación gradual de nutrientes esenciales como nitrógeno, fósforo y potasio.

2.8. Cosecha ensayo trigo de primavera 2024.

2.8.1. Rendimiento ensayo trigo de primavera 2024.



Gráfica 2: cosecha de trigo de primavera 2024

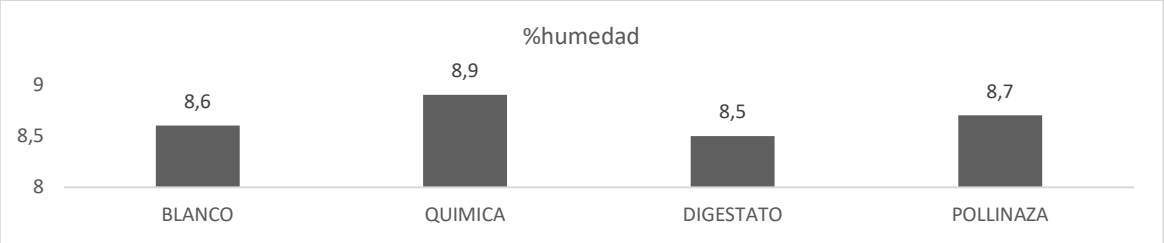
Pollinaza (3033 kg/ha): El tratamiento con pollinaza resultó en la mayor producción de trigo, superando a los demás tratamientos en términos de rendimiento total. Esto sugiere que el aporte de nutrientes orgánicos de la pollinaza fue beneficioso para el cultivo, permitiendo un buen crecimiento y desarrollo de las plantas.

Digestato (2775 kg/ha): El digestato también proporcionó un buen rendimiento, situándose como el segundo más productivo. Aunque el digestato es más diluido que la pollinaza, su contenido de nutrientes permitió un desarrollo adecuado del cultivo

Química (2417 kg/ha): La fertilización química produjo un rendimiento intermedio, superior al blanco pero inferior a los tratamientos orgánicos. Esto sugiere que la fertilización química, aunque efectiva, no fue tan completa como las enmiendas orgánicas en este ensayo.

Blanco (2357 kg/ha): El tratamiento sin fertilización resultó en la menor producción, lo que era de esperar, ya que no se añadieron nutrientes adicionales al suelo.

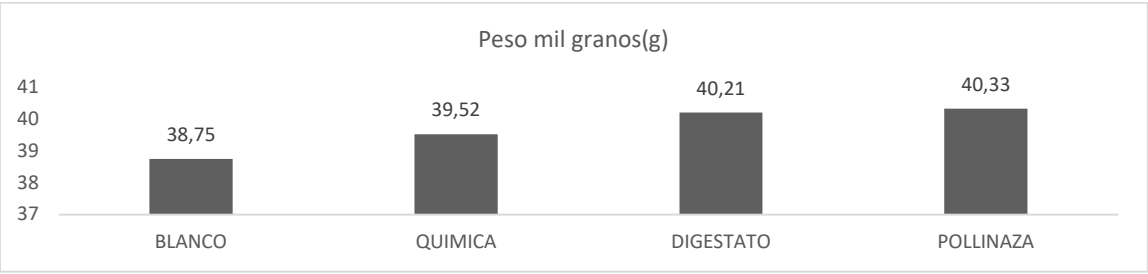
2.8.2. Humedad (%humedad):



Gráfica 3: tanto por ciento de humedad obtenido ensayo trigo de primavera 2024

Los valores de humedad fueron bastante similares en todos los tratamientos, oscilando entre 8,5% y 8,9%, lo que indica que las condiciones de cosecha y almacenamiento fueron consistentes en todas las parcelas. La ligera diferencia en la humedad no parece haber influido significativamente en el resultado final.

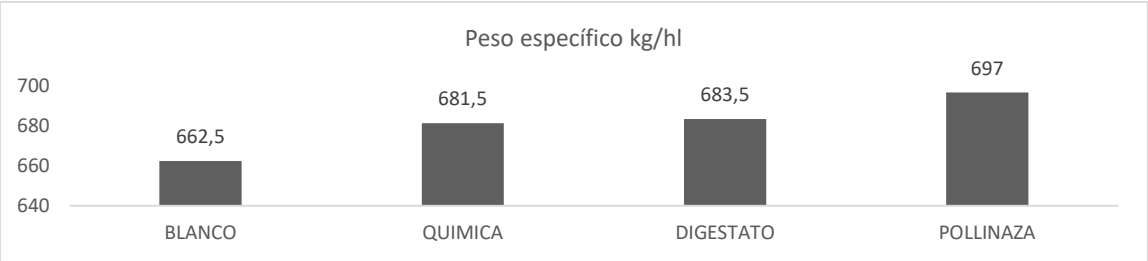
2.8.3. Peso de mil granos (g)



Gráfica 4: peso de mil granos ensayo trigo de primavera 2024

Pollinaza (40,33 g) y Digestato (40,21 g): Ambos tratamientos orgánicos generaron los granos más grandes y pesados, lo que sugiere que estos tratamientos promovieron un buen llenado de grano y una nutrición equilibrada.
Química (39,52 g): La fertilización química también produjo granos relativamente pesados, aunque no tan grandes como los tratamientos orgánicos.
Blanco (38,75 g): El tratamiento sin fertilización produjo los granos más pequeños y ligeros, lo que indica una menor nutrición durante la fase de desarrollo y llenado de grano.

2.8.4. Peso específico (kg/hL):



Gráfica 5: peso específico kilogramos por hectólitro ensayo trigo de primavera 2024

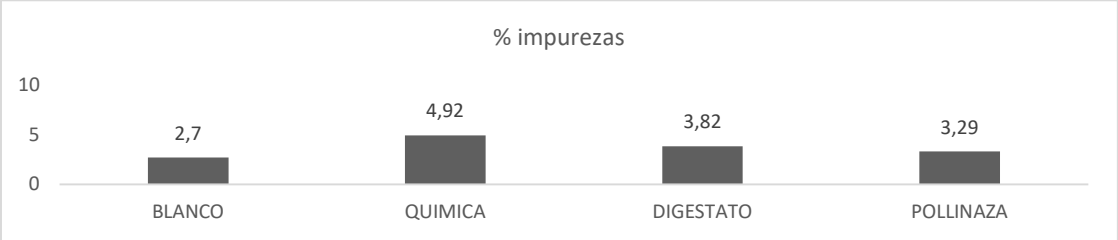
Pollinaza (697 kg/hl): Este tratamiento mostró el mayor peso específico, lo que indica granos más densos y de mejor calidad. Esto podría estar relacionado con una mejor nutrición durante el llenado de grano.

Digestato (683,5 kg/hl): Similarmente, el digestato también produjo granos con un peso específico alto, lo que sugiere que los nutrientes aportados contribuyeron a una buena calidad del grano.

Química (681,5 kg/hl): Aunque la fertilización química también mostró un peso específico alto, fue ligeramente inferior a los tratamientos orgánicos, lo que indica una calidad del grano ligeramente menor.

Blanco (662,5 kg/hl): El tratamiento sin fertilización produjo el grano con menor peso específico, lo que era esperable, dado el menor rendimiento y la menor nutrición.

2.8.5. Impurezas (%):



Gráfica 6: tanto por ciento de impurezas ensayo trigo de primavera 2024

El tratamiento con fertilización química mostró el mayor porcentaje de impurezas, lo que podría ser indicativo de una mayor presencia de restos vegetales o residuos en la cosecha y de semillas de malas hierbas.

Digestato (3,82%) y Pollinaza (3,29%) mostraron niveles más bajos de impurezas en comparación con la fertilización química. La pollinaza fue la que produjo menos impurezas, lo que sugiere una cosecha más limpia o menos presencia de restos no deseados.

Blanco (2,7%) curiosamente, el tratamiento sin fertilización tuvo el menor porcentaje de impurezas, aunque esto podría deberse a un menor crecimiento vegetativo, lo que a su vez genera menos material no deseado.

3. Conclusiones ensayo trigo de primavera 2024

Los tratamientos orgánicos, especialmente la pollinaza, demostraron ser los más efectivos en términos de rendimiento total (kg/ha), peso específico y peso de mil granos. Estos resultados sugieren que los fertilizantes orgánicos proporcionaron una nutrición más equilibrada y sostenida a lo largo del ciclo del cultivo, lo que favoreció un mejor desarrollo y calidad del grano.

El digestato también mostró buenos resultados, siendo una alternativa viable a la pollinaza, aunque con un rendimiento algo menor. Este fertilizante ofrece una buena opción para mejorar el rendimiento en sistemas de cultivo donde se quiera reducir la dependencia de fertilizantes químicos.

La fertilización química, aunque efectiva, quedó rezagada frente a los tratamientos orgánicos en términos de rendimiento y calidad del grano, lo que sugiere que en este ensayo los fertilizantes orgánicos fueron superiores.

El tratamiento blanco sin fertilización mostró el peor rendimiento y calidad de grano, lo que subraya la importancia de una adecuada fertilización para maximizar el potencial del trigo Sensas.

En resumen, el uso de fertilizantes orgánicos como pollinaza y digestato mejora tanto el rendimiento como la calidad del grano en comparación con la fertilización química, haciéndolos opciones más sostenibles y productivas en este ensayo de trigo Sensas.

4. Anexo fotográfico.



Ilustración 2: aplicación de las diferentes tesis de fertilización abril 2024



Ilustración 3: aplicación de fertilización antes de siembra

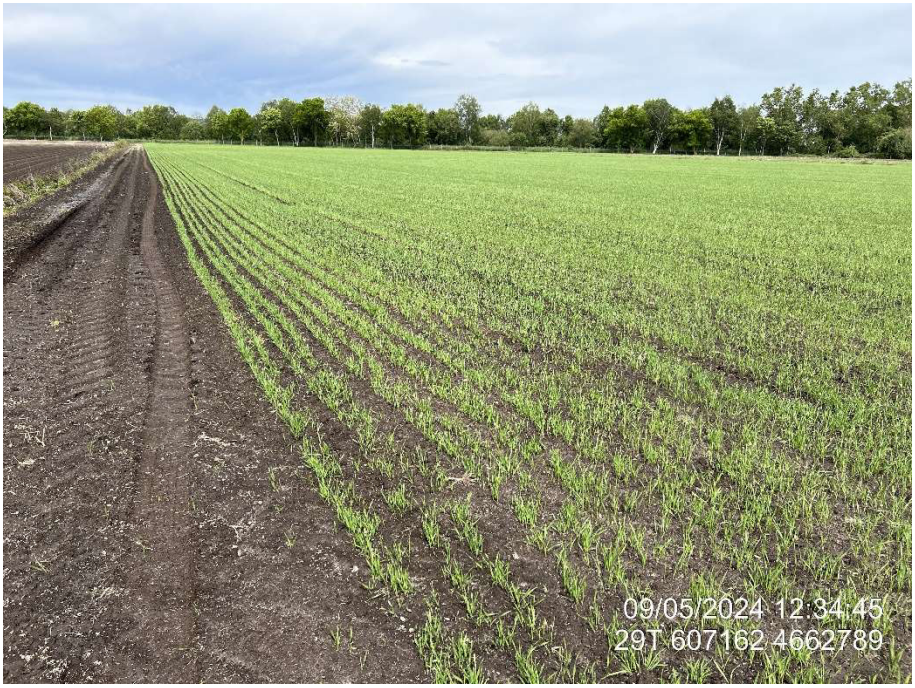


Ilustración 4: trigo recién nacido mayo 2024



Ilustración 5: estado del ensayo de trigo agosto 2024



Ilustración 6: determinaciones de calidad de grano septiembre 2024