

Aprovechamiento de residuos vegetales de invernadero para calefacción y enriquecimiento carbónico



Universidad de Almería

Memoria presentada para aspirar al grado de Doctor por la
Universidad de Almería.

José Vicente Reinoso Moreno
Almería, marzo 2023



Aprovechamiento de residuos vegetales de
invernadero para calefacción y enriquecimiento
carbónico.

Use of greenhouse vegetable waste for heating and
carbon enrichment.

Programa de doctorado:

8903- Biotecnología y Bioprocesos Industriales Aplicados a la Agroalimentación y
Medioambiente

La tesis doctoral ha sido dirigida Prof. Dr. D Francisco Gabriel Acién Fernández,
Catedrático del Departamento de Ingeniería Química de la Universidad de Almería, y
codirigida por María Guadalupe Pinna Hernández y Juan Carlos López Hernández.

AGRADECIMIENTOS

Podría dividir el tiempo en el que estuve desarrollando esta tesis en dos etapas. En la primera, estuve más centrado en experimentación. En la segunda estuve más involucrado en tratamiento de datos y llevar a cabo la publicación de los artículos y congresos relacionados con esta tesis. Esta segunda etapa, quizás debiera haber llevado menos tiempo por mi parte. A su vez esta etapa, la podría dividir en otras dos. En la primera, estuve involucrado en un trabajo que no tenía ver con esta tesis. En el segundo tramo de esta segunda etapa, pude tener la opción de estar más centrado en esta tesis. Quizás me confié demasiado y dejé que me llevara más tiempo de lo que hubiese debido llevarme. Sea como fuera, en estas fases (de esta segunda etapa) me he dado cuenta dejé bifurcar demasiado mi tiempo. Al menos, estoy satisfecho por haber llegado a tener opción de aspirar a publicarla en firme.

Hay bastante gente que conocí durante el tiempo en que he estado haciendo esta tesis. Algunos dieron apoyo emocional, otros económico, otros me dieron ayuda a la hora de hacer las distintas tareas a acometer, otros ofrecieron sus conocimientos para que pudiera aprender lo que necesitaba y otros, simplemente trabajar a su lado, me sirvió de ejemplo, no solo en experiencia profesional, sino también como desarrollo en mi ámbito personal. No puedo a mencionar a todos (por extensión excesiva de esta sección), pero algunos si quisiera mencionar. Las personas correspondientes a esta segunda etapa que comento, quizás ha sido más en el aspecto emocional, pero me parece justo mencionarles también. Si he llegado a este punto de tener opción a llegar a presentar esta tesis, la ayuda de estas personas ha sido una parte importante.

De la segunda etapa: Alejandro, Javi, Gregorio, Cintia González, Lorenzo, Angélica, Joana, Juan, Mari Carmen, Francisco García, Emilio y tantos otros.

De la primera: Alicia, Loli Fernández, Francisco Rodríguez, José María, José Bretones, José Manuel, Jorge, Ahlem, Thaisa, Esther, Ismael, Rafa, Cintia, María del Mar, y tantos otros.

Una mención a José García (amigo personal mío, aunque casi que se podría considerar como conocido en la primera etapa).

Mi familia que también me apoyado (y bastante) en este camino.

Mis directores de tesis por su apoyo tanto en lo emocional, como a nivel de poner a mi servicio sus conocimientos, experiencia y trabajo para ayudarme a que esta tesis se llevara a cabo. También me gustaría hacer un reconocimiento adicional a Gabi, que fue el que me dio una oportunidad de empezar este camino. A parte de esto, es una de estas personas que comento que simplemente trabajar al lado suyo, me ha servido de aprendizaje.

ÍNDICE

1.	INTRODUCCIÓN.....	1
1.1.	Residuos vegetales de invernadero	1
1.2.	Tratamiento de los residuos vegetales de invernadero.	2
1.3.	Residuos vegetales de invernadero como combustible en calefacción.....	3
1.4.	Optimización de la combustión en la caldera	8
1.5.	Integración de la calefacción y aporte de CO ₂	9
1.6.	Alternativas para el control de temperatura y concentración de CO ₂	12
1.7.	Captura de CO ₂ mediante carbón activado	13
2.	JUSTIFICACIÓN Y OBJETIVOS	15
2.1.	Justificación	15
2.2.	Objetivo	15
2.2.1.	Caracterización de los RVI.	15
2.2.2.	Optimización de la combustión de biomasa.	15
2.2.3.	Ensayo del sistema a escala piloto para calefacción y aporte de CO ₂	16
3.	MATERIALES Y MÉTODOS	17
3.1.	Caracterización de los RVI y alternativas para su mejora	17
3.1.1.	Experimentos de secado	17
3.1.2.	Estrategias de recogida del RVI	17
3.1.3.	Mezcla de la biomasa con mejores propiedades como combustible sólido.....	18
3.1.4.	Caracterización de biomasa	18
3.1.5.	Métodos empleados para la caracterización	19
3.2.	Estudio de la eficiencia de combustión y optimización.	20
3.2.1.	Biomasa	20
3.2.2.	Caldera.....	20
3.2.3.	Ensayos de optimización de la combustión.....	22
3.2.4.	Temperatura de los gases de combustión y concentración de CO ₂	23
3.2.5.	Eficiencia térmica de la caldera y del proceso global de calefacción.	23
3.2.6.	Concentraciones de CO, NO _x y SO ₂	25
3.2.7.	Análisis estadístico	26
3.2.8.	Emisión de partículas	27
3.3.	Ensayo del sistema a escala piloto para calefacción y aporte de CO ₂	27
3.3.1.	Plantas estudiadas y condiciones de cultivo.....	27
3.3.2.	Sistema empleado para la calefacción y la captura y posterior aporte de CO ₂ ...	29
3.4.	Calefacción.....	31
3.5.	Captura de CO ₂ y enriquecimiento	34
3.6.	Estrategia de control.....	35
3.7.	Ensayos de calefacción y enriquecimiento con CO ₂	36
4.	RESULTADOS	40
4.1.	Caracterización de los RVI y alternativas para su mejora.	40

4.1.1.	Secado del RVI.....	40
4.1.2.	Limitación del contacto con el sustrato del invernadero	42
4.1.3.	Mezcla con biomasa con propiedades de combustión más apropiadas.....	42
4.1.4.	Caracterización de biomasa	45
4.2.	Ensayos de optimización de la caldera	48
4.2.1.	Temperatura de gases de combustión y contenido en CO ₂	49
4.2.2.	Eficiencia térmica y global de calefacción	50
4.2.3.	Otros gases presentes en los gases de combustión.....	51
4.2.4.	Reducción posterior de CO, NO _x , SO ₂ y emisión de partículas.....	56
4.2.5.	Análisis Estadístico.....	56
4.3.	Ensayo del sistema a escala piloto para calefacción y captura/ aporte de CO ₂ en invernaderos.....	57
4.3.1.	Variables relacionadas con la temperatura.....	57
4.3.2.	Funcionamiento del sistema de calefacción, captura y aporte de CO ₂	58
4.3.3.	Captura e inyección de CO ₂	59
4.3.4.	Análisis adicional horario de las distintas operaciones llevadas a cabo.....	61
4.4.	Efecto de la aplicación de calefacción y enriquecimiento carbónico sobre la productividad de las plantas.....	70
5.	CONCLUSIONES	74
6.	PROSPECTIVAS.....	78
7.	PUBLICACIONES DESARROLLADAS EN LA TESIS	80
8.	BIBLIOGRAFÍA.....	84

RESUMEN

La actividad agrícola genera diferentes tipos de residuos como los residuos vegetales derivados de la parte vegetativa de las plantas, frutos de desecho, infiltraciones de abono no aprovechado desde el sustrato de cultivo, residuos plaguicidas, envases de distintos productos utilizados, y residuos plásticos provenientes de la cubierta, segundos techos y/ o mantas térmicas. La presente tesis se centra en los residuos vegetales de invernadero derivados de la parte vegetativa. Estos se generan principalmente de dos formas y dos momentos del cultivo: (i) la poda de las plantas mientras se lleva a cabo el cultivo (de forma sostenida) y (ii) las propias plantas una vez ha finalizado la cosecha. Este trabajo se ha centrado en los residuos provenientes de la parte vegetativa de las plantas al final del ciclo de cultivo por ser los que mayor volumen representan y los que poseen un mayor potencial como fuente de energía.

Actualmente existen algunas alternativas para el tratamiento de estos residuos que permiten minimizar el impacto ambiental derivado de su vertido incontrolado en el entorno donde estos cultivos se llevan a cabo. Estas alternativas son principalmente (i) la producción de compost mediante digestión parcial en pilas de compostaje, y (ii) la incorporación de estos residuos en la alimentación de ganado. El compost obtenido no presenta un valor comercial destacable mientras que el consumo para alimentación de ganado representa un porcentaje muy pequeño del total de residuos generados. Por estas razones, se necesitan otras alternativas de aprovechamiento de estos residuos. En este sentido, en este trabajo se plantea una alternativa adicional que consiste en emplear estos residuos vegetales de invernadero para dos objetivos simultáneos de (1) calefacción y (2) enriquecimiento carbónico (aporte de CO₂) en invernaderos. El objetivo sería autoabastecer tanto de calor como de CO₂ a los invernaderos utilizando los residuos vegetales generados en los mismos, alcanzando así una circularidad completa del sistema con cero generaciones de residuos.

En la tesis se han desarrollado diversas líneas de trabajo enfocadas a caracterizar los residuos vegetales de invernadero, estudiar la mejora de estos mediante procedimientos adecuados de recogida y gestión, así como su mejora mediante mezcla con otros tipos de biomasa. Una vez optimizado el tratamiento de los residuos se ha estudiado su combustión en calderas comerciales, optimizando las condiciones de operación de la caldera para el uso de estos residuos vegetales de invernadero como combustible y como fuente de calor para calefacción. Finalmente, se ha desarrollado una línea de aprovechamiento de los gases de combustión para el enriquecimiento de CO₂ en invernaderos, optimizando las condiciones de operación del proceso de adsorción con carbón activo y la dosificación del CO₂ al invernadero.

Los trabajos realizados en esta tesis han llevado a demostrar la efectividad de ciertas técnicas de pretratamiento y manipulación de residuos vegetales de invernadero. Se ha visto, a sí mismo, la importancia de emplear unos ajustes adecuados para los equipos de combustión implicados. Por otra parte, se ha comprobado el funcionamiento adecuado del sistema propuesto para capturar e inyectar CO₂ desde los gases de combustión durante una campaña completa.

ABSTRACT

Agricultural activities generate various kinds of residues. These are generated from various sources like 1) the vegetal part of plants, discarded fruits, liquid fertilizer infiltrations not assimilated by crops, and pesticidal traces. The present dissertation is focused on those greenhouse residues generated from vegetal plants. These are mainly generated along two growing steps: (i) plants pruning while they are being grown (ii) Plants their selves, once the growing season finish. This dissertation is focused on these residues generated from plants at the end of the growing season. This focus was taken because the main portion is generated at this stage, thus being the option with greater potential when being considered as an energy source.

Various actions have been developed for this dissertation. These were focused on performing characterization of these greenhouse crop residues, and studying some improvement through adequate techniques for their withdrawal and management. At the same time, their improvement by mixing with other biomass cases was also studied. Once, the treatment of these residues was optimized, their combustion in commercial boilers was studied. The operation conditions were optimized for a given boiler employing these vegetal crop residues as fuel and a heat source for heating applications. Eventually, a system has been developed for CO₂ enrichment in greenhouses. In addition, the operational conditions of this process for CO₂ adsorption with activated carbon and posterior supplying of this CO₂ inside a given greenhouse.

The work encompassed with this dissertation has made it possible to probe the effectiveness of some techniques for the pretreatment and manipulation of greenhouse crop residues. At the same time, it has been seen the importance of using adequate settings for the combustion equipment employed. Moreover, it has been probed that the operation of the system proposed for CO₂ capture and supply from flue gases was satisfactory during a complete growing season.

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Residuos vegetales de invernadero

Residuo se puede considerar a cualquier un subproducto de un proceso que carece de interés comercial. Esto sucede porque en la actualidad no existen alternativas para su transformación en otro producto que sí tenga interés (reaprovechamiento). De esta manera, esta materia ha de ser desechada. Por otra parte, el 70% de la superficie destinada al cultivo bajo invernaderos se encuentra comprendido en la zona sureste de España. Concretamente en las provincias de Almería, Granada y Murcia. La producción hortícola tiene un volumen importante (3,4 Mton). No obstante, en el 2019- 2020 registró un ligero descenso (1%) respecto a al año anterior [1]. Como muestra de la importancia del impacto económico que supone esta actividad se mencionan los porcentajes que suponen las principales variedades de especies cultivadas en cuanto a la producción total en España. Estas corresponden a hortalizas como pimiento, tomate, pepino, melón, sandía, calabacín, berenjena y judías verdes. Los porcentajes correspondientes son: -9,2; 6,7; 34,5; 46,8; y 68,2% [2]. Este nivel relativamente importante de productividad, a su vez conlleva la generación de una cantidad igualmente importante de residuos vegetales (RV). Dicha cantidad se estima en unas 759,5 kton/ año teniendo en cuenta solamente el peso seco [3].

El tratamiento de RV en la zona comentada es una problemática aún no resuelta por completo. Hay dos razones principales que son la gran generación de residuos y la variabilidad. A modo de ejemplo, actualmente, la retirada y correcto tratamiento de estos residuos suponen ser un gasto importante para el agricultor. Esto es así, ya que la normativa local establece que este es el responsable de dicho tratamiento [4], [5]. Tradicionalmente, en esta zona se desechaba este tipo de residuos abandonándolos en el medio rural, en zonas adyacentes a los invernaderos (medioambiente) [4]. Otra práctica usada tradicionalmente, consistía en incinerar dichos residuos sin condiciones de control [4]. Por otra parte, en algunos casos se enterraban en el sustrato de estos invernaderos [4]. Esto se hacía para recuperar parte de los nutrientes contenidos en estos residuos, pero no se les solía hacer un pretratamiento previo. Así mismo, en otros casos se utilizaban estos residuos como alimentación para el ganado [4].

El abandono de estos residuos en el medio rural conlleva varios efectos perjudiciales sobre el medioambiente. Estos están relacionados con la higiene del entorno rural. Por ejemplo, este abandono promueve la aparición de enfermedades patógenas perjudiciales (tanto de microorganismos patógenos, como animales). Estos efectos negativos pueden repercutir sobre los habitantes de las zonas colindantes a dónde se hace el vertido, o bien sobre las propias

plantaciones a cultivar durante la siguiente cosecha de esta zona [4], [6]. Adicionalmente, si estos residuos se dejan apilados durante un tiempo prolongado, pueden llegar a darse procesos de fermentación en los que se produce CH_4 como subproducto. Al ser este uno de los gases de efecto invernadero con mayor impacto, la repercusión medioambiental, se agrava más si cabe. Por otra parte, la opción de enterrar estos residuos bajo el sustrato de invernaderos sin pretratamiento también puede acarrear el desarrollo o transmisión de enfermedades patógenas para los cultivos sembrados en este. Sucedería algo similar al caso del abandono de estos RVI en el medio rural. Así mismo, la incineración de este tipo de residuos bajo condiciones con escaso control conlleva con bastante probabilidad la generación contaminantes gaseosos tales como el CO , NO_x , SO_2 , o toxinas derivadas de compuestos carbónicos parcialmente oxidados [7].

1.2. Tratamiento de los residuos vegetales de invernadero.

Existen diferentes alternativas para el tratamiento de los residuos vegetales de invernadero una vez han sido generados. Las mismas están destinadas a reducir lo máximo posible su impacto medioambiental y pretenden ser una vía para su revalorización y posterior aprovechamiento. Una de ellas es la producción de compost a partir de los RVI. Esta ha sido la llevada a cabo en diferentes plantas de tratamiento de la zona (Ejido Medioambiente y La Albaída). Si bien esta alternativa ha demostrado ser bastantes exitosa, hay dos factores que aún hacen que haya ciertos problemas. Por un lado, está la estacionalidad de la generación de estos residuos, del otro está que la demanda por parte de los agricultores locales no es tan alta como para consumir toda la cantidad generada. Estos dos factores hacen que en ciertos momentos se necesite de bastante espacio para almacenar tanto los RVI recibidos, como el compost producido hasta que llegue a ser comercializado. Por otra parte, recientemente se puso en marcha una planta para la producción de ensilado para ganadería a partir de los RVI [8], [9]. En los próximos años se podrá comprobar la eficacia de esta alternativa. No obstante, dos puntos a comprobar son si este producto resulta competitivo económicamente en comparación con el usado hasta ahora en el mercado y si a nivel local, la demanda es suficiente como para requerir toda la cantidad de ensilado producido o si se hace necesario exportar este producto a mercados externos.

En conclusión, lo que parece perfilarse entre las tendencias de mercado actual y las alternativas que se han desarrollado/ están desarrollándose, es que será necesario lograr una integración de todas estas alternativas junto con otras complementarias que puedan surgir. Este hito será de gran importancia para revalorizar la cantidad de RVI generada. Por otra parte, permitirá acercarse a una situación en la que el producto obtenido tenga un valor comercial que, al menos, sea el suficiente como para que el tratamiento de estos residuos no suponga ser un gasto. Dicha

integración resulta ser, además, beneficiosa teniendo en cuenta la heterogeneidad de los RV a tratar. Un factor que resulta ventajoso respecto a esta integración es el hecho de que las distintas porciones generadas pueden resultar más menos adecuadas para una alternativa en concreto. Esto dependerá de sus propiedades. Por otra parte, la cantidad de RV generados puede ser superior a la que puede ser destinada como alimento para el ganado existente en la zona actualmente. Por ejemplo, la planta de ensilado comentada se ha previsto que abastezca a 13000 ovejas tratando unas 38- 50 tn [8], [9]. A nivel provincial, se crían unas 169463 cabezas ovinas con lo que las 759,5 kton de RVI generadas en total sería superior (456- 652 ton). Aunque potencial esta sería una fracción bastante importante, se necesitaría una planta con 9 veces la capacidad de esta (o varias con capacidades intermedias). No obstante, con este contexto opciones adicionales y/ o complementarias resultan de interés.

1.3. Residuos vegetales de invernadero como combustible en calefacción

El empleo de RVI como fuente de energía en calefacción para cultivos llevados a cabo en invernaderos se plantea como otra vía alternativa para su aprovechamiento. Por otra parte, está la posibilidad de emplear el CO₂ generado con esta calefacción para suministrarlo dentro de estos invernaderos también (enriquecimiento carbónico). Para poder emplear este CO₂ generado, se ha de tener en cuenta que los gases inyectados necesitan cumplir ciertas condiciones previamente. Con este fin, esta combustión ha de cumplir con unos mínimos necesarios para que la posterior captura de CO₂ desde los gases de combustión sea abordable. En cuanto a esto último, se deben tener en cuenta aspectos económicos y prácticos.

Las hortalizas cultivadas en el sureste español en invernaderos suelen ser variedades provenientes de climas templados. Así pues, estas son sensibles a temperaturas bajas. Por este motivo el aporte de calefacción para mantener la temperatura por encima de unos niveles determinados resulta beneficioso. Esto a su vez evita posibles efectos adversos sobre los cultivos, mejorando su productividad. Si la temperatura cae por debajo de ciertos valores, el desarrollo y productividad de las plantas pueden verse afectados. Temperaturas demasiado bajas contribuyen a ralentizar su metabolismo. Así mismo, hay dos escenarios en los que esta situación se puede dar: un periodo prolongado o en intervalos cortos de tiempo, pero ocurren de forma recurrente (unas pocas horas, pero casi a diario), [10]–[12]. La consecuencia de estas condiciones ambientales se manifiesta en forma de respuestas al estrés térmico. Así pues, se hace relativamente conveniente disponer de un control de temperatura mínima.

El empleo de biomasa de origen vegetal se ha venido implantando significativamente en los últimos años para aplicaciones con fines energéticos, sobre todo térmicos. La producción de

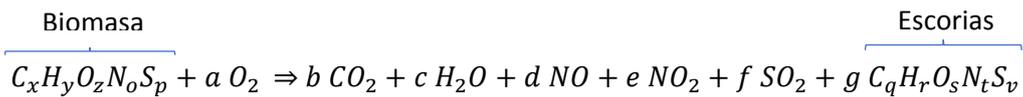
biomasa con fines energéticos en la Unión Europea fue de 96,896 ktep. En España fue de 5,528 ktep, 5,70% [13]. Dentro de los objetivos que la Unión Europea se ha marcado para reducir el consumo de combustibles fósiles, lograr que el 32% de la energía consumida provenga de fuentes renovables para 2030 (siendo este un 18,8 y 17,5% en la Unión Europea y España respectivamente) [14]. Entre los tipos de biomasa más utilizados están los pellets de pino, hueso de aceituna, cáscara de almendra, pellet o briquetas de descarte de vid entre otros. El empleo de estos está bastante extendido en aplicaciones que requieren calefacción tanto en el ámbito doméstico o como industrial [15], [16].

Así mismo, respecto a las características del combustible a emplear. Existen una serie de parámetros cuyo fin es dar una orientación adecuada del uso en equipos de combustión directa. Estos parámetros también están relacionados con la facilidad de manejo y homogeneidad. Distintos pretratamientos van a resultar necesarios para que estas propiedades resulten adecuadas en el caso de los RVI, al igual que sucede con otros tipos de biomasa. Los principales problemas que los RVI presentan, a la hora de ser empleados como combustible sólido, están relacionadas con la homogeneidad de sus propiedades [17], [18]. Entre estas propiedades con cuya homogeneidad es relativamente baja destacan: su densidad y poder calorífico de combustión (PCC). Esta variabilidad se debe a la estacionalidad de los cultivos, existiendo fluctuaciones importantes a lo largo del año respecto a estas propiedades [19], [20].

De este modo, la variabilidad observada a lo largo de diferentes épocas de año para estos RVI no tiene que ver solo con la cantidad generada, sino que también con sus propiedades. Varios factores contribuyen en esta variabilidad. Entre estos están: el hecho que se cultiven distintas especies, la cantidad de rafia contenida en estos RVI, o la cantidad de arena incorporada desde el sustrato de cultivo durante su retirada. Otra propiedad relativamente importante es el contenido en humedad, el mismo también puede variar según la época en la que estos RVI se retiraron. Además, el tiempo transcurrido entre el corte de las plantas o poda y el momento en que se cuantifica su humedad también introduce variabilidad.

Otra propiedad importante para las aplicaciones con combustiones directas es el poder calorífico que está relacionado con la humedad. A la hora de comparar unos combustibles con otros, es útil referenciar este valor a un contenido en humedad fijo. No obstante, el valor obtenido en condiciones reales será el correspondiente al contenido en humedad que presenta el combustible en el momento de ser empleado. La cantidad de agua contenida en este combustible restará entalpía de la generada en la combustión. Es importante diferenciar esta consideración, del concepto de poderes calorífico inferior y superior. Estos están relacionados con la entalpía cedida al agua generada durante la combustión, y recogida en la *Ecuación 1*. Esta

consiste en una propuesta para resumir la reacción química dada en esta combustión. Entre los compuestos generados estarían las escorias (ya sea parcial o totalmente consumidas). Estas corresponderían con “ $C_pH_rO_sN_tS_v$ ” y contienen elementos diversos, entre los principales que constituyen la biomasa. De este modo, una alta variabilidad del contenido en agua, y por tanto del poder calorífico, puede conllevar a tener problemas con el dimensionamiento. Estos estarían asociados, tanto a estos propios equipos como a los procesos de los que estos forman parte. Es decir, dependiendo del poder calorífico (asociado al contenido de humedad del combustible en el momento de ser utilizado), el mismo equipo dará entregas de potencia variables haciendo uso de una misma cantidad de combustible.



Ecuación 1. Fórmula simplificada de la combustión de biomasa.

Existen más propiedades útiles para predecir el comportamiento y rendimiento que ofrece un combustible sólido en calderas. Estas se detallan en la

Tabla 2 [21]. Entre ellas están: contenidos en cenizas, Cl, S, el poder calorífico, la composición elemental de las cenizas y su temperatura de fusión. Así pues, se llevó a cabo la determinación de estas propiedades para el caso de los RVI y se compararon con las correspondientes a otros biocombustibles sólidos. Los casos escogidos para esta comparación son de entre los más extendidos tanto en aplicaciones industriales como domésticas. En concreto fueron: huesos de aceituna y cáscara de almendra. Los datos expuestos en la *Figura 1* corresponden con estas propiedades [21], [22]. A modo de comparación, en la *Tabla 1* se reflejan datos de combustibles sólidos obtenidos a partir de biomasa empleados habitualmente en aplicaciones de combustión reportados [23]. Haciendo esta comparación, los RVI se tratan de un tipo de biomasa no leñosa y se caracterizaran por tener un contenido mayor en humedad, cenizas, así como de ciertos elementos como Cl y S [17] [23]. Estas características pueden implicar ciertos problemas para la combustión. Tal cual es posible obtener estos RVI tras ser cortadas las plantas, estos presentan un poder calorífico de combustión superior (PCCS) algo inferior a otros combustibles procedentes de biomasa.

Tabla 1. Propiedades relevantes para el comportamiento en combustión de distintos tipos de biomasa de origen vegetal sólida.

		Biomasa				
		Pellet de madera	Residuos de tomate	Hueso de aceituna	Residuos de cardo	
Análisis	Caracterización química (%)	C	46,5	52,3	46,5	39,1
		H	6,8	7,6	6,4	6,0
		N	1,9	3,4	0,4	2,0
		S	0,000	0,074	0,000	0,140
		Cl	0,03	0,12	0,34	1,21
	Caracterización generalista (%)	Carbono fijo	13,8	9,4	16,2	14,9
		Materia volátil	76,4	80,1	72,7	62,9
		Cenizas	1,0	3,5	2,3	11,3
		Humedad	8,8	7,0	8,8	10,9
	Poder calorífico superior base seca (MJ·kg ⁻¹)		18,4	22,7	19,4	14,8

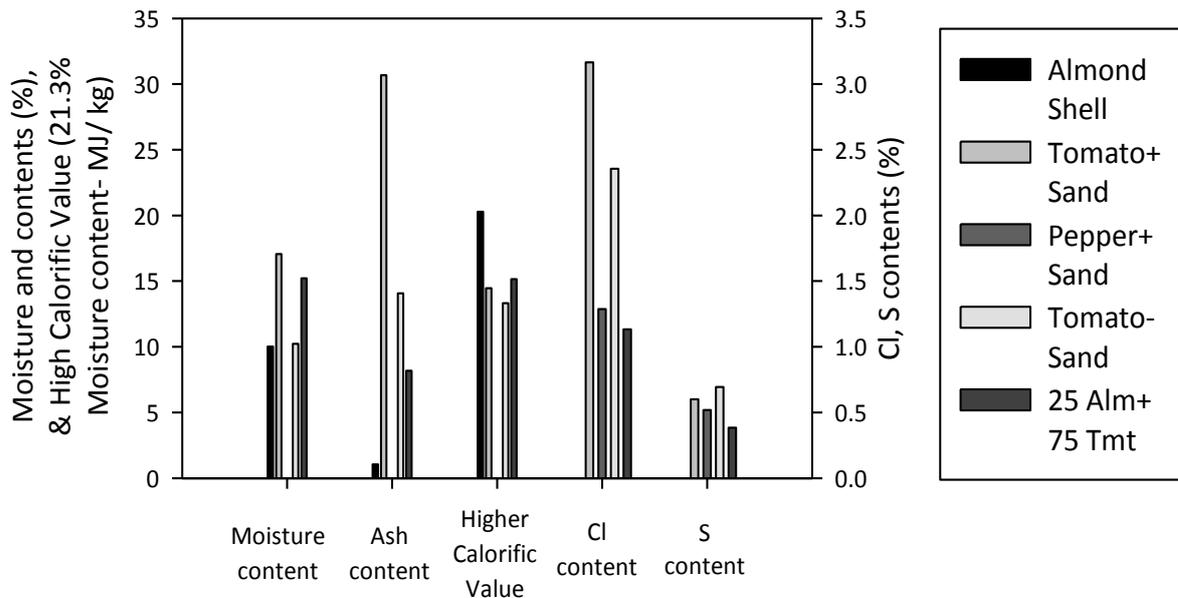


Figura 1. Propiedades importantes para combustibles sólidos de distintos tipos de biomasa obtenida de residuos vegetales de invernadero y de mezclas de estos con poda de almendro.

Tabla 2. Parámetros relevantes para evaluar la calidad de combustibles sólidos obtenidos a partir de biomasa.

Parámetro	Código de la Norma	Título de la norma	Referencia
Contenido en humedad	ISO 18134-1:2015.	Determinación del contenido en humedad. Método de secado en estufa. Parte 1: Humedad total. Método de referencia	[25]
Contenido en cenizas	ISO 18122: 2015.	Biocombustibles sólidos. Determinación del contenido de ceniza.	[26]
Contenido de las cenizas. Elementos mayoritarios.	ISO 16967:2015	Biocombustibles sólidos. Determinación de elementos mayoritarios. Al, Ca, Fe, Mg, P, K, Si, Na and Ti.	[27]
Temperatura de fusión	ISO 540:2008	Carbón duro y coque. Determinación de la fusibilidad de cenizas.	[28]
Poder Calorífico Superior de Combustión	ISO 18125:2017. 2017	Biocombustibles sólidos. Determinación del poder calorífico.	[29]
Contenidos de Cloro y Azufre.	ISO 16994:2016.	Biocombustibles sólidos. Determinación del contenido total de azufre y cloro.	[30]

La presencia de Cl puede contribuir a que se produzcan compuestos clorados volátiles, disminuyendo notablemente la vida útil de los equipos de combustión. Además, el impacto medioambiental supone la emisión de los gases de combustión a la atmósfera [31], [32]. Otros factores para tener en cuenta son, el alto contenido en cenizas tras su combustión y la baja densidad de estos RVI. Estas propiedades también necesitan ser mejoradas para emplear los RVI como biocombustible.

No obstante, según lo comentado anteriormente, el potencial energético que poseen estos RVI es relativamente considerable. Considerando el poder calorífico visto en caracterizaciones previas y la cantidad de RVI producidos en la provincia de Almería, el potencial energético sería de unas 116 ktep [22]. Este valor sería el 2.16% de la cantidad de energía generada en España de combustibles sólidos obtenidos a partir de biomasa (5.528 Mtep). El objetivo es que esta cantidad de energía vuelva ser destinada a las mismas explotaciones agrícolas donde estos RVI fueron producidos. En un escenario en el que haya agricultores que no opten por esta alternativa, o no puedan hacerlo de forma inmediata, se puede plantear la posibilidad de tratar de destinar estos RVI pretratados a otras localizaciones y/u otras aplicaciones en las que se requiera una combustión directa.

Como alternativas a los problemas de heterogeneidad descritos, baja densidad energética y altos contenidos en cenizas, humedad, Cl y S, se pueden emprender distintas acciones: 1) en lo referente a densidad energética, está la compactación de los RV en forma de pellet. Así mismo, este formato mejora notablemente la manejabilidad [3]. 2) Por otro lado, el secado bajo condiciones ambientales en el mismo invernadero puede homogeneizar y reducir significativamente el contenido en humedad de estos RVI [24]. Esta última conllevaría una homogeneización e incremento de su poder calorífico. De forma análoga, la correcta manipulación de la biomasa durante su recogida permitiría homogeneizar y reducir su contenido en cenizas. Esta disminución también conllevaría un ligero incremento de su PCC. Esto ha de darse, puesto que, se reduce la masa de compuestos que no reaccionan durante la combustión.

De otra parte, estaría la opción de hacer mezclas de estos RVI con otros tipos de biomasa. Esta alternativa de tratamiento tendría como objetivo la mejora de las propiedades relacionadas con la combustión. Estos otros tipos de recursos vegetales tendrían propiedades más favorables, en lo referente a la combustión directa. Respecto a esta posibilidad, se puede argumentar que se acaba obteniendo un combustible de peor calidad comparando con la que tenía la otra biomasa empleada en esta mezcla inicialmente. No obstante, mediante esta alternativa la mezcla de estos RVI pasa a presentar menos problemas en aplicaciones en las que hay implicada una combustión directa. Entre las propiedades que pasaron a ser más favorables estuvieron: el contenido en cenizas, Cl y S (disminuyendo estos tres).

1.4. Optimización de la combustión en la caldera

Además de las propiedades relacionadas con la combustión, está la eficiencia con la que se lleva a cabo el proceso. Una optimización adecuada de los equipos de combustión no solo permite mejorar la eficiencia desde el punto de vista del consumo de combustible, sino que, además, es importante de cara al proceso de captura de CO₂. Una combustión deficiente (en cuanto a términos de eficiencia) va a estar asociada a una mayor generación de gases nocivos (tales como CO, NO_x y/ o SO₂). Se deben contener estas emisiones por debajo de los niveles marcados en la normativa [33]. No obstante, una etapa de filtrado de estos gases permitirá separarlos de los gases de combustión. La inclusión de esta permitirá obtener un gas con una concentración elevada de CO₂ apto para el enriquecimiento de cultivos.

Variables como la tasa de aporte de O₂ y de combustible tienen influencia sobre este proceso. El aporte de O₂ se haría a través del aire suministrado y el combustible sería la biomasa. Estos dos son los reactivos de la reacción química correspondiente a la *Ecuación 1*. Los equipos de combustión empleados normalmente suelen ofrecer la posibilidad de regular estas tasas de

aporte. De hecho, los más avanzados son capaces de regular automáticamente esta relación para obtener el óptimo de combustión. Así mismo, otra variable para tener en cuenta es el grado de turbulencia existente dentro de la cámara de combustión. Esta turbulencia se consigue mediante el aporte de una corriente de aire secundario. Por ejemplo, el equipo de combustión empleado disponía de entradas hasta el interior del hogar de combustión de aire primario y secundario.

1.5. Integración de la calefacción y aporte de CO₂

Una vez hechos los estudios de caracterización de los RVI y de optimización de combustión, el siguiente paso es el testeo de un sistema en el que se acople la calefacción y aporte de CO₂. En el mismo, dicho ensayo se llevó a cabo con pellets de pino. Si bien, en los ensayos correspondientes al 2º bloque, se consiguió llevar a cabo una combustión con varias configuraciones encontrando una más adecuada. Se decidió no usar este combustible para el ensayo a largo tiempo. El alto contenido en Cl, junto con ciertos problemas de fiabilidad relacionados con la ignición automática con la caldera de biomasa adquirida para el ensayo motivaron esta selección. Por otra parte, se decidió proseguir con ensayos a largo tiempo independientemente del combustible empleado. El principal objetivo con estos ensayos fue comprobar el funcionamiento y robustez del sistema, así como cuantificar el aumento de productividad dado en las plantas al integrar estas dos técnicas de control de la temperatura mínima y concentración de CO₂. De cara al diseño del sistema, cobran importancia dos aspectos: 1) estrategia seguida para la integración del enriquecimiento carbónico y la calefacción y 2) sistema empleado para llevar a cabo la captura de CO₂.

Según lo explicado anteriormente, el objetivo es que ambas técnicas de cultivo queden integradas (calefacción y aporte de CO₂). En referencia a esto, las demandas de CO₂ y calor para la calefacción normalmente no coinciden en el tiempo. Cuando se requiere calefacción, suele ser principalmente durante la noche y primeras horas del día. Puesto que los beneficios del aporte de CO₂ están relacionados con la tasa fotosintética de plantas y en estos momentos la radiación solar es nula o relativamente baja, no se debe obtener prácticamente beneficio alguno llevar a cabo enriquecimiento. Para solventar esta circunstancia se deben almacenar uno de estos dos recursos para poder separar su aplicación en el tiempo. Es decir, aplicar calefacción en los momentos en los que se hace necesario elevar la temperatura dentro del ambiente de invernadero. Por otra parte, empezar a aplicar CO₂ siempre y cuando la radiación solar incidente sobre el cultivo sobrepase cierto valor mínimo.

De cara a la captura de CO₂ desde los gases de combustión, se ha visto, a sí mismo, la importancia de emplear unos ajustes adecuados para los equipos de combustión implicados.

Respecto a la elección del recurso a almacenar se pueden contemplar tres alternativas: CO₂, energía térmica, y/o ambos. Dependiendo de las condiciones climáticas, una de estas opciones resultará más conveniente. Es decir, o bien los requerimientos de CO₂, o bien los de calefacción serán los más altos dependiendo de estas condiciones climáticas. Así mismo, en el caso de esta tesis, la investigación llevada a cabo se ha centrado en la alternativa de almacenar CO₂. Esta opción fue considerada la más interesante, teniendo en cuenta las condiciones climáticas de la zona. Entre los requerimientos a considerar para el sistema a utilizar están la capacidad de almacenamiento del lecho de carbón activo y la demanda usual de calefacción. Respecto a la captura de CO₂, esta puede llevarse mediante varias alternativas. Entre las llevadas a cabo actualmente, están el empleo de formamidas, el uso de membranas y la adsorción sobre carbón activo.

Teniendo en cuenta la relación coste/ cantidad de CO₂ susceptible de ser capturado, en el caso de esta tesis, se consideró más oportuno el empleo de carbón activo, dirigiéndose la actividad fundamentalmente hacia este. Este material tiene la propiedad de adsorber selectivamente el CO₂. Esta capacidad está basada en interacciones de tipo Van de Valls establecidas entre moléculas de CO₂ y la superficie del lecho de carbón activo. Por otra parte, moléculas de gases nocivos (NO_x, SO₂ y CO) no presentan tanta polaridad como el CO₂. Esta propiedad va a permitir que carbón activo muestre mayor afinidad por este último compuesto permitiendo cierto grado de separación al hacer pasar una corriente de gases de combustión a través de un lecho de carbón activo. Esta capacidad de retención de CO₂ depende, a su vez, de la presión (aumenta con esta) y de la temperatura (disminuye con esta). De tal manera que, comprimiendo estos gases en un tanque de carbón activo y procurando que la temperatura de estos sea lo menor posible (dentro de unos límites de coste), se conseguirá un grado de afinidad por el CO₂ adecuado para implementar este proceso de separación en un sistema a una escala lo suficientemente grande como para resultar ser interesante para explotaciones comerciales.

La posibilidad de hacer captura del CO₂ generado por la combustión de RVI, aportaría la ventaja de la disminución del coste que suponen los combustibles utilizados usualmente. Esta ventaja sería aún mayor si se compara con el coste de que las fuentes actualmente usadas para su obtención (CO₂ purificado) y más limpio que la inyección directa de gases de combustión de combustibles fósiles. De otro lado, la integración del aporte de calefacción al cultivo y la captura de CO₂, ha de incrementar aún más si cabe la producción. Tomando como referencia el incremento potencial de la aplicación de una de estas técnicas por individual. Con objeto de

hacer esta alternativa lo más adecuada respecto a emplear estos RVI para ambas estrategias, la investigación habrá de centrarse en estudiar los RVI en sí mismos. Para ello se deberá determinar si es posible emplear estos en aplicaciones en las que se requiere la combustión de un material dado. Por otra parte, también ha de centrarse en los gases derivados de dichos residuos para diseñar y optimizar el sistema de captura e inyección de CO₂ dentro del invernadero. Con este fin se habrán de determinar las principales propiedades de los RVI relativas a la combustión, tal cual estos son extraídos normalmente de las explotaciones agrícolas. Por otra parte, también es procedente abordar posibles alternativas para la mejora de sus propiedades, con objetivo de ser aprovechados como combustible empleado en calefacción de invernaderos y enriquecimiento de CO₂ en el ambiente de los cultivos llevados a cabo en estos invernaderos.

Por otra parte, de forma general, una consideración para tener en cuenta de cara a abordar el enriquecimiento carbónico es que este ha de integrarse junto con el control de temperatura máxima y humedad media. Conforme la radiación aumenta a lo largo del día, ambas variables aumentan. El exceso de ambas se corrige mediante la apertura de las ventanas del invernadero, mediante convección natural. Otro factor que merece atención es la formación de condensación sobre la cara interior de la cubierta del invernadero. A partir de cierto grado, está se condensa y llega precipitar sobre los cultivos. Esta formación de condensación de agua se produce por la diferencia térmica entre el exterior e interior del invernadero. A su vez, depende de la humedad relativa del aire. Dependiendo de las condiciones climáticas, puede llegar a ser un problema bastante persistente. La forma de limitarlo es mediante la ventilación del invernadero, si bien existen alternativas adicionales tales como el empleo de plásticos antigoteo y disponer un doble techo por encima del cultivo. Esta precipitación de agua sobre los cultivos, a su vez, favorece el desarrollo de enfermedades tales como la *Botrytis (botrytis cinera)* y otras de origen fúngico. De cualquier modo, el control de esta condensación también requiere de abrir ventanas dependiendo de las condiciones climáticas.

Considerando estos factores expuestos anteriormente, la estrategia de control de concentración de CO₂ debe estar integrada y operar en consonancia con de temperatura y humedad relativa. De tal manera que se puedan mantener niveles por encima del atmosférico (el cual oscila alrededor a 380 ppm dependiendo de las condiciones atmosféricas) cuando es posible mantener cerrada la ventilación. En cuanto a los niveles de concentración a mantener según las conclusiones extraídas de trabajos publicados en bibliografía, un equilibrio entre los beneficios obtenidos de mantener una concentración alta y el coste correspondiente estaría en los 700-800 ppm durante los periodos de tiempo en los que es posible mantener la ventilación cerrada. En los momentos en los que se ha de abrir la ventilación por necesidad bien de controlar la

temperatura máxima, humedad relativa y/ o condensación, no es rentable mantener inyección de CO₂. Si bien, hay bibliografía que argumenta que también se obtienen beneficios de hacer aporte de CO₂, teniendo como consigna 400 ppm. En el caso de la presente tesis, se decidió seguir la estrategia de aportar CO₂ solo en momentos en los que no era necesario mantener las ventanas cerradas. Los periodos en los cuales se puede mantener la ventilación cerrada, suelen darse durante la fase inicial y final del día [34]. No obstante, el CO₂ inyectado durante la fase inicial del día resulta ser más efectivo. En cambio, durante la fase final, las plantas comienzan a adaptar su actividad metabólica para la noche. Durante este periodo empieza a predominar la actividad metabólica de respiración.

1.6. Alternativas para el control de temperatura y concentración de CO₂.

Otra consideración que es necesario abordar a la hora de considerar la inyección de CO₂ mediante quema de combustible, es que una vez implementado un sistema que permita inyectar CO₂ de este modo, sea posible amortizar el coste que supone la inversión adicional llevada a cabo. Así pues, la posibilidad de aprovechar el calor generado de la combustión para poder mantener una calefacción dentro del invernadero es bastante conveniente. No obstante, se debe tener en cuenta las consideraciones hechas en el comienzo de este apartado, acerca de que no coinciden en el tiempo los momentos en los que es necesario aportar calefacción o CO₂. Situaciones en las que se deba incrementar la temperatura no suelen coincidir con las que ha de inyectarse CO₂. Esto sucede puesto que las temperaturas mínimas suelen darse durante la noche principalmente a las horas más próximas al amanecer, mientras que las plantas van a necesitar una atmósfera rica en CO₂ durante el día que es cuando disponen de radiación solar para poder llevar a cabo la fotosíntesis. Con objeto de abordar esta necesidad técnica, se hace necesario disponer de un sistema que permita reservar, o bien la energía liberada durante la combustión, o bien acumular el CO₂ liberado durante la combustión.

De otra parte, la estrategia de almacenar CO₂ está enfocada a un fin distinto, en este caso la estrategia de control se centra en mantener la temperatura dentro del invernadero por encima de una consigna previamente fijada. En este caso se consume combustible para satisfacer la demanda energética dentro del invernadero y el CO₂ se aprovecha, siendo este un subproducto en este caso. Ha de ser posible que el CO₂ generado se almacene para poder ser inyectado cuando sea preciso durante el día para aumentar el rendimiento fotosintético de las plantas. Esta estrategia resulta conveniente en casos que el objetivo es asegurar una temperatura mínima o en los que dadas las condiciones climáticas del lugar donde se va a llevar a cabo el

cultivo, se prevé que la mayor parte de combustible demandado va a ser destinado para satisfacer las necesidades energéticas para poder mantener esta temperatura de consigna.

En lo relativo a esta estrategia de controlar la temperatura mínima y acumular el CO₂ generado, la selección del combustible a utilizar es un punto clave. Combustibles cuyo consumo produzca una cantidad baja de óxidos nocivos (CO, NO_x y SO_x) resultan convenientes para luego poder aprovechar los gases de combustión excedentes con su posterior uso en enriquecimiento de invernaderos. Estos deberían ser almacenados previamente. No obstante, estos combustibles son más costosos. Así pues, opciones que permitan reaprovechar los gases de combustión derivados de la quema de otros combustibles de menor coste son propicias para esta alternativa.

Dentro de los combustibles de bajo coste, se encuentran los obtenidos a partir de biomasa vegetal, (pellets de pino, hueso de aceituna, cáscara de almendra, etc.). Las principales ventajas de este tipo de combustibles: un menor coste y se evita la liberación de CO₂ hacia la atmósfera, sino que la parte que si acaba emitiéndose proviene de un combustible cuya obtención ha implicado previamente la asimilación de ese CO₂ por parte de las plantas de las que se obtuvo este combustible. Por otra parte, está el hecho de que el carbono presente en esta biomasa previamente se debió fijar desde la atmósfera en su mayor parte, con lo que este proceso resulta ser más sostenible desde un punto de vista de operación en cuanto a lo que las emisiones de CO₂ respectan.

Con el objetivo de solventar este problema está la opción de introducir una etapa de filtrado que permita separar estos óxidos o deseados del CO₂ presente en los gases de combustión. Los métodos actualmente disponibles se pueden distinguir entre aquellos cuyo objetivo es retener estos gases tóxicos o retener el CO₂. Dentro de los métodos focalizados en retener CO₂, está su captura mediante aminas y derivados [35]. También está la filtración de CO₂ por membranas compuestas de estos mismos compuestos y, así mismo, el empleo de adsorbentes sólidos como pueden ser las zeolitas o el carbón activado [35].

1.7. Captura de CO₂ mediante carbón activado

El carbón activado es un material obtenido tras tratar un material con un contenido alto en carbono. Este tratamiento consiste en una serie de etapas en la que se somete a este material a altas temperaturas y se impregna con ácidos fuertes (KOH por ejemplo). Este tratamiento le confiere a este material una micro- porosidad elevada lo cual le confiere una gran capacidad de adsorción de compuestos químicos con unas propiedades determinadas [36]. Esta adsorción se da por interacciones de tipo Van der Wals. Esta propiedad permite separar unos compuestos de

otros en base a su polaridad. En el caso de los gases de combustión, moléculas de CO₂ contenidas en estos, tienen mayor momento dipolar que el resto de estos gases tóxicos. Esto le otorga al carbón activo una afinidad mayor hacia el CO₂. Esta mejora a presiones altas y bajas temperaturas. Los factores que influyen en la elección fueron los costes de operación, la durabilidad de este material y la simpleza del método operativo. El hecho de poder trabajar sin disolventes y a temperatura ambiente contribuye en mantener contenidos los costes de operación.

2. JUSTIFICACIÓN Y OBJETIVOS

2.1. Justificación

A pesar de las alternativas disponibles actualmente y explicadas en la sección de introducción, alternativas nuevas y complementarias que permitan una revalorización de RVI y, por tanto, incrementar la eficacia de las explotaciones agrícolas bajo plástico, resultan de gran interés. Una nueva alternativa consiste en la obtención de combustible a partir de RV derivados de la cosecha. La idea consistiría en reservar los residuos generados en una cosecha, valorizados como combustible y emplearlos para la siguiente cosecha utilizando los RVI para su uso en calefacción y posterior aporte de CO₂ para disponer de atmósferas con concentraciones mayores que la atmosférica de dicho gas y conseguir con ello un aumento de la productividad de la cosecha.

2.2. Objetivo

El objeto principal de esta tesis es evaluar el aprovechamiento de RVI para su uso como combustible para calefacción y enriquecimiento carbónico en invernaderos. En torno a este, se derivan tres sub-objetivos interrelacionados a su vez.

2.2.1. Caracterización de los RVI.

Dentro de este objetivo se englobarían las siguientes tareas: 1) Estudio y análisis físico-químico y de los RVI para los procesos de combustión térmica y posterior aporte carbónico. 2) Se plantean alternativas para mejorar la combustión mediante pretratamientos y mezcla de otros tipos de biomásas que mejoren los parámetros con mayor influencia en la combustión. 3) Identificación y determinación de variables para tener una visión general del desempeño de la combustión de un combustible dado dentro de un equipo. En este caso, el equipo estudiado fue una caldera de biomasa adecuada a un rango amplio de combustibles (caldera multipropósito). Las variables estudiadas fueron: temperatura de los gases emitidos desde la caldera, concentración de CO₂, eficiencia térmica de combustión y concentración de gases nocivos emitidos (NO_x, SO₂ y CO).

2.2.2. Optimización de la combustión de biomasa.

Optimización del equipo de combustión empleando los parámetros de operación más habituales: la tasa de entrada de aire primario y secundario, y la de combustible. A su vez se deberán evaluar diferentes combustibles como los pellets de pino, los huesos de aceituna, los restos vegetales de plantas de tomate y una mezcla de estos últimos con poda de almendra para

obtener mejor resultados de eficiencia térmica de combustión, concentración de CO₂ y menores emisiones de gases tóxicos,

2.2.3. Ensayo del sistema a escala piloto para calefacción y aporte de CO₂.

Dentro de este objetivo se englobarían las siguientes tareas: 1) Estudio de la capacidad de adsorción de CO₂ del carbón activo. 2) Determinar el tiempo de agotamiento del lecho y de su regeneración. 3) Comprobación de la selectividad del carbón activo por el CO₂ y la concentración de gases tóxicos (CO, NO_x y SO₂) en los compuestos liberados desde la atmósfera y 4) Demostración del sistema realizando un ensayo a largo plazo. Así mismo, será necesario comparar la productividad de un cultivo con aporte de CO₂ y control de la temperatura mínima, con la de otro cultivo control en la que no se aplique ninguna de estas dos técnicas.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Caracterización de los RVI y alternativas para su mejora

3.1.1. Experimentos de secado

Se dejaron secar las plantas de RVI durante un periodo aproximado entre 2- 3 semanas. A través de ensayos previos [24], se comprobó que este intervalo de tiempo era el suficiente como para alcanzar la humedad de equilibrio de la biomasa estudiada. No obstante, este hecho se puede corroborar estudiando la evolución del contenido en humedad en el tiempo. Estos ensayos se llevaron a cabo dentro del propio invernadero (Estación Experimental de las Palmerillas (Fundación Cajamar) dónde se cultivaron las plantas. Este invernadero es experimental (tipo raspa y amagado) y con un área de 877 m².

Una vez se han cortado las plantas, éstas se secan por transferencia de humedad hacia el ambiente del invernadero. No obstante, tanto la velocidad de secado, como el propio valor de la humedad de equilibrio alcanzado dependen de las condiciones climáticas (principalmente la humedad relativa, la temperatura y la velocidad de circulación del aire por el interior del invernadero). Por otra parte, tras haberlas cortado, las plantas se dejaron en cajas para separarlas entre sí. Se cortaron unas cuatro plantas por cada día y se hizo una determinación del contenido de humedad. A su vez, dicha determinación se llevó a cabo con un intervalo de 2- 3 días, durante todo el tiempo que se prolongó el ensayo. De forma paralela, también se fueron evaluando los contenidos en cenizas y el poder calorífico de combustión a lo largo del ensayo. Los distintos procedimientos seguidos en las determinaciones involucradas en estos ensayos se han recogido la *Tabla 1* . Para la consecución del correcto procedimiento de muestreo se siguieron las recomendaciones dadas en la norma “*ISO 18135:2017. Combustibles sólidos. Muestreo*” [37]. Por otra parte, estos experimentos de secado se llevaron a cabo con cinco variedades distintas de hortalizas de fruto: tomate, pimiento, calabacín, pepino y melón.

3.1.2. Estrategias de recogida del RVI

Para este estudio se emplearon las mismas cinco variedades mencionadas anteriormente, apartado. Estas plantas fueron cultivadas en el mismo invernadero del que se tomaron las plantas tomadas para los ensayos de secado. Tras cortar las plantas se evitó el contacto con el sustrato. Por otra parte, el disponer las plantas dentro de cajas contribuyó a que hubiera adicción de impurezas (lo que incrementa el contenido en cenizas) en esta biomasa.

3.1.3. Mezcla de la biomasa con mejores propiedades como combustible sólido

Este estudio se hizo para las plantas de tomate exclusivamente. Este tipo de biomasa se mezcló con otra (poda de almendro), cuyas propiedades como combustible sólido eran más adecuadas (contenido en cenizas). El motivo de elegir los restos de tomate fue porque esta biomasa era la que mayores concentraciones de cenizas y elementos como Cl y S, según se observó en cuantificaciones previas de dichos contenidos. Por otra parte, esta es una de las variedades más extensamente cultivadas en la zona donde se ha centrado este estudio (con 28.5% de la superficie de cultivo dedicada y un 20.9 de la producción respecto al total de España) [38]. Tras los pretratamientos, esta biomasa fue triturada y molida. Así mismo, la biomasa proveniente de la poda de almendro también fue secada, triturada y molida. En este punto fue cuando estos dos tipos de biomasa (restos de tomate y poda de almendro) fueron mezclados. La proporción fue de 25- 75% (Poda de almendro- Residuos de tomate). Se llevaron a cabo la misma caracterización que la llevada a cabo para los tipos de biomasa estudiados en los experimentos de secado.

3.1.4. Caracterización de biomasa

Se tomaron muestras de cinco variedades hortícolas distintas (tomate, pimiento, pepino, calabacín y berenjena). Estas variedades son las más cultivadas en la zona en la que se ha centrado esta tesis (provincia de Almería). Así mismo, se tomaron de dos tipos de lugares: los invernaderos, tal cual es posible obtenerlas tras ser cortadas y centros de recolección de residuos vegetales (se tomaron muestras de dos centros diferentes). Los invernaderos en los que se tomaron estas muestras estaban ubicados en las instalaciones de la Estación Experimental de “Las Palmerillas” (Fundación Cajamar Caja Rural).

Por otra parte, las muestras de RVI tomadas consistieron en la parte aérea de las plantas (tallos y hojas). A la hora de tomar el muestreo se siguieron las mismas recomendaciones comentadas anteriormente con objeto de asegurarse la representatividad de la muestra. Respecto a esta consideración es importante, así mismo, mantener la misma proporción entre las hojas y el tallo de las plantas respecto a la que presentan originalmente. Con objeto de garantizar esta representatividad, previamente a hacer cada una de las caracterizaciones mencionadas, se procedió a llevar a cabo una serie pretratamientos. Estos fueron: secar, triturar y moler las muestras según lo especificado en la norma mencionada anteriormente. De forma adicional, se hizo la caracterización de otros tres tipos de biomasa cuyo empleo en aplicaciones en las que se requiere combustión está bastante extendido. Las muestras correspondientes se adquirieron de

suministradores locales. Estos tres tipos fueron: pellets de pino, hueso de aceituna y cáscara de almendra.

3.1.5. Métodos empleados para la caracterización

Según lo explicado en el apartado de introducción se consideró que fue relevante llevar a cabo la determinación de hasta siete propiedades distintas: contenido en húmedas, cenizas, elementos halógenos (cloro y azufre), poder calorífico de combustión, composición elemental de las cenizas y su temperatura de fusión. Los protocolos seguidos, como los equipos empleados en estas determinaciones se muestran en la

Tabla 2.

Respecto al poder calorífico medido según las directrices mencionadas en el protocolo “ISO 18125:2017. Biocombustibles sólidos. Determinación del Poder Calorífico de Combustión” [29]. Merece la pena resaltar la diferencia entre el poder calorífico de combustión superior (PCS) e inferior. La misma está en considerar la energía liberada por la generación de agua a partir del hidrógeno presente en las moléculas que componen los compuestos diversos presentes en la biomasa. En el caso del PCS esta energía sí se tendría en cuenta. Los valores presentados en esta tesis corresponden con este valor. Por otra parte, la humedad de la muestra también influye sobre este poder calorífico. En la *Ecuación 2* se plantea una expresión para estimar el poder calorífico de una muestra en función de la humedad y del poder calorífico de esta en caso de que estuviese completamente seca (poder calorífico en base seca).

$$\Delta H_{PCS_{up}_{hr}} = (1 - H) \Delta H_{PCS_{up}_{bs}} + H \lambda_v$$

Ecuación 2 Poder calorífico de combustión con la humedad que este tiene de forma original estimado a partir de su contenido en humedad y del poder calorífico que este presenta una vez ha sido secado por completo (base seca).

En esta *Ecuación 2* intervienen las variables siguientes: $\Delta H_{PCS_{up}_{hr}}$ que es el poder calorífico superior de una muestra de biocombustible con la humedad que tiene de forma inicial, $\Delta H_{PCS_{up}_{bs}}$ es el poder calorífico superior en base seca, H es el contenido en humedad de la muestra y λ_v es el calor latente de vaporización del agua (2,26 kJ/ kg).

3.2. Estudio de la eficiencia de combustión y optimización.

3.2.1. Biomasa

Cuatro tipos distintos de biomasa fueron testados: huesos de aceituna, pellets de pino, RVI de tomate y la mezcla de esta última con poda de almendro (75 biomasa de tomate- 25% de poda). Se llevó a cabo una caracterización de estos tipos de combustibles sólidos según se ha descrito en el apartado anterior. Las propiedades estudiadas fueron: contenido en humedad, cenizas y poder calorífico de combustión. Los valores de estas características se muestran en la *Figura 18* en la sección de resultados correspondiente a la caracterización de biomasa.

3.2.2. Caldera

La caldera empleada fue una Missouri 150000 (*Figura 2*). La potencia nominal de la misma fue de 160,46 kW. Así mismo, tiene un foso de parrilla a través del cual el combustible (en forma de pellets o gránulos) va aflorando desde el fondo empujado por un tornillo sin fin. Los gases de combustión recogidos desde el hogar de combustión son dirigidos y conducidos a través de un cambiador de tubos (agua/ gases) para ceder su calor. Este flujo se da principalmente por el empuje de aire desde las dos entradas de aire (primario y secundario). Se puede considerar como tiro forzado, aunque no se emplea un extractor de gases. Estos gases a su salida de la cámara de combustión circulan por el interior de los tubos. Este equipo es capaz de iniciar la combustión de forma automática. No obstante, para esto es necesario que quede una cantidad mínima de combustible en forma de ascuas. Si transcurre demasiado tiempo entre la última vez que se paró la combustión y se pretende iniciar de nuevo fallará su prendido. Una primera ignición debe hacerse manualmente. No obstante, hay una resistencia dentro del foso que facilita esta operación. Por otra parte, el depósito de agua de esta caldera, a su vez, vendría a ser la camisa de este intercambiador. La *Figura 3* es un esquema del diseño interior de la caldera.

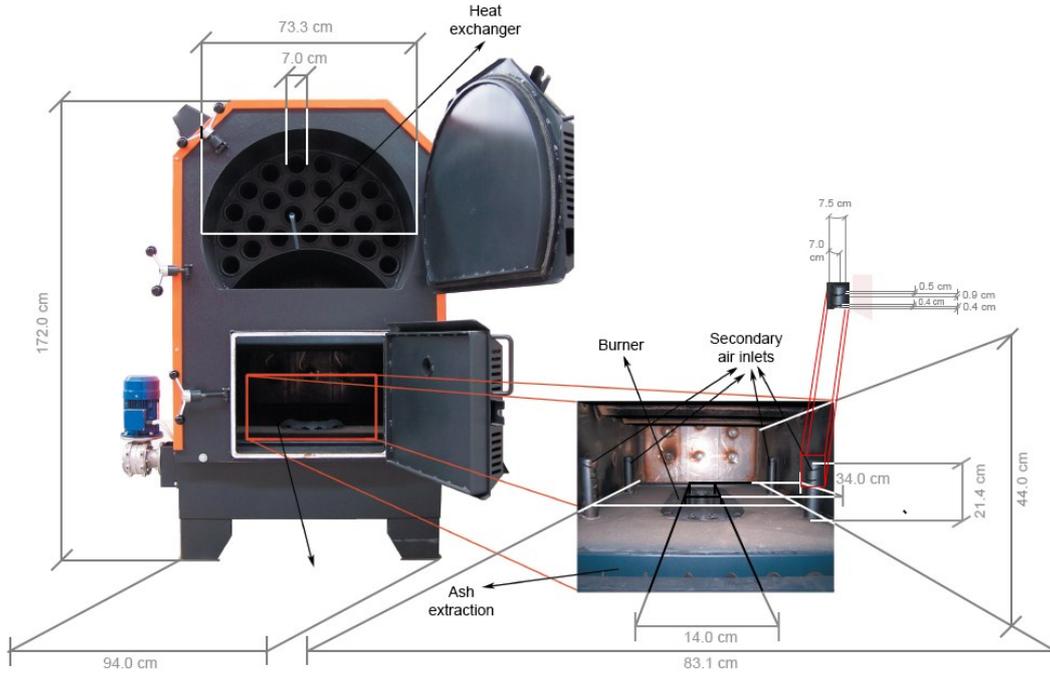


Figura 2. Caldera de biomasa, cámara de combustión y dimensiones de estas.

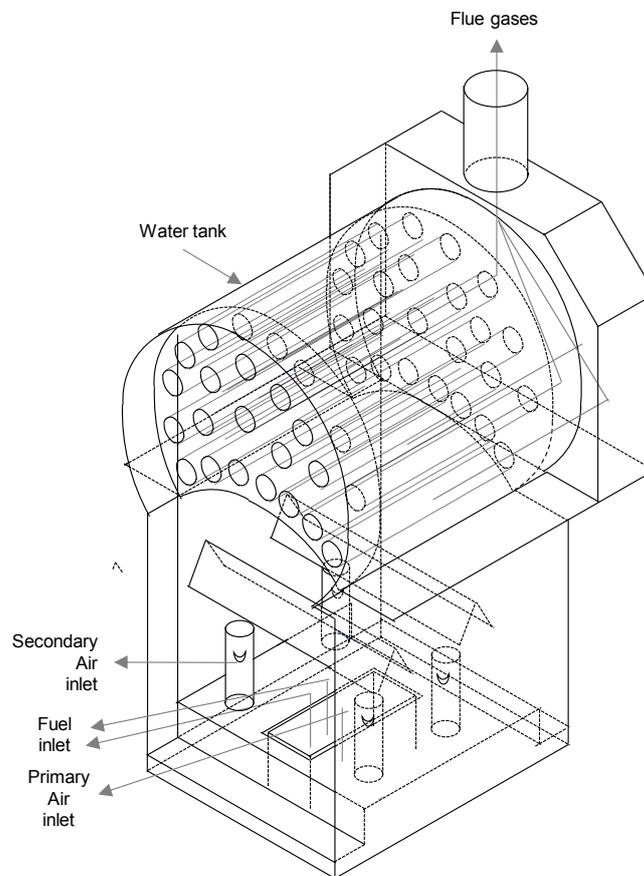


Figura 3. Esquema del interior de la caldera emplea en los distintos ensayos.

Por otra parte, este equipo permite regular el aporte de aire dentro del hogar de combustión. No solo esto, sino que permite suministrar de forma segregada dos corrientes de aire distintas. De una parte, está el aporte primario, cuyo fin principal es asegurar una concentración de O_2 adecuada (desde un punto de vista estequiométrico). Por la otra, está el aporte de aire secundario. Este último, aunque también suma cierto flujo de O_2 , su función principal es crear una mayor turbulencia dentro de la cámara de combustión. Por último, también es posible regular el aporte de combustible. De este modo, es posible hacer combinaciones distintas con estos tres parámetros para establecer una regulación adecuada entre el aire y el combustible aportado. Este equilibrio puede cambiar dependiendo del tipo de combustible utilizado (de hecho, lo más habitual es que varíe).

3.2.3. Ensayos de optimización de la combustión.

Se testaron varias combinaciones de los valores que es posible regular con la caldera empleada de los tres parámetros mencionados en el apartado anterior. Dichos parámetros están relacionados con la regulación de la proporción de aire/ combustible aportados dentro de la cámara de combustión. Estos fueron: aire primario, aire secundario y cantidad suministrada de combustible. El objeto de esta serie de ensayos fue tratar de identificar la configuración (combinación de estos factores) más adecuada para cada combustible probado desde el punto de la eficiencia térmica de la combustión y la generación de CO_2 . Normalmente esto se consigue minimizando el exceso de aire. No obstante, también se tuvo en cuenta que la generación de compuestos tóxicos no superara ciertos niveles establecidos en la legislación relevante [39].

Las configuraciones testadas se muestran en la *Tabla 3*. En estas se ha utilizado la nomenclatura de P#- S# (las letras "P" y "S" refiriéndose al aporte de aire primario o secundario y el número "#" corresponde con el valor del caudal de aire suministrado expresado en " m^3/s "). En lo relacionado con la tasa de aporte de combustible, [Masa]/ [Tiempo], el rango testado fue ligeramente inferior al que es posible establece con el equipo testado. El motivo de esto fue evitar emplear valores extremos y, por tanto, que conlleven problemas relacionados con el funcionamiento de la caldera. Por ejemplo, prendido (inicio de la combustión) fallido o acumulación excesiva de combustible sobre el foso. El suministro de combustible dentro de la cámara de combustión se hace mediante un mando, el cual permite regular la velocidad de giro de este tornillo sin fin. Por otra parte, los caudales de aire primario y secundario se estimaron a partir de medidas de la velocidad lineal del aire dentro del conducto correspondiente. Estas medidas, a su vez, se midieron con un anemómetro térmico.

Tabla 3. Distintas configuraciones ensayadas de cara a los ensayos de optimización de la caldera.

Biomasa empleada	Aire primario (m ³ / s)	Aire Secundario (m ³ / s)	Nomenclatura correspondiente en el eje x desde la Figura 19 hasta la Figura 21.	
Pellets de pino	0,026	0,016	PP P 0.026- S 0.016	
		0,051	PP P 0.026- S 0.051	
		0,087	PP P 0.026- S 0.087	
	0,052	0,016	PP P 0.052- S 0.016	
		0,051	PP P 0.052- S 0.051	
		0,087	PP P 0.052- S 0.087	
Hueso de aceituna	0,026	0,014	OP P 0.026- S 0.016	
		0,050	OP P 0.026- S 0.050	
	0,052	0,014	OP P 0.050- S 0.016	
		0,050	OP P 0.050- S 0.050	
Restos de tomate	0,017	0,014	Tm P 0.017- S 0.014	
		0,050	Tm P 0.017- S 0.050	
	0,026	0,014	Tm P 0.026- S 0.014	
		0,050	Tm P 0.026- S 0.050	
		0,087	Tm P 0.026- S 0.087	
	0,052	0,014	Tm P 0.052- S 0.014	
		0,050	Tm P 0.052- S 0.050	
	Residuos de tomate (75%)+ Poda de almendro (25%)	0,026	0,016	TA P 0.026- S 0.016
			0,051	TA P 0.026- S 0.051
0,087			TA P 0.026- S 0.087	
0,052		0,016	TA P 0.052- S 0.016	
		0,051	TA P 0.052- S 0.051	
0,017		0,016	TA P 0.017- S 0.016	
		0,051	TA P 0.017- S 0.051	
0,013		0,019	TA P 0.013- S 0.019	

3.2.4. Temperatura de los gases de combustión y concentración de CO₂.

Estas medidas se tomaron con un analizador de gases de combustión: IM 1400, IM Environmental Equipment, Heilbron, Alemania). Este analizador tiene una sonda, la cual se inserta dentro de la tubería situada a la salida de la caldera (chimenea) a través de un orificio practicado a tal efecto. Este orificio ha de estar ubicado lo más próximo posible a la salida de la caldera. Tomar esta medida demasiado alejada respecto a la salida puede llevar a obtener una medida significativamente distinta a la temperatura de gases de combustión respecto a su valor real, lo que también llevará a sobreestimar el valor de pérdidas térmicas.

3.2.5. Eficiencia térmica de la caldera y del proceso global de calefacción.

Respecto a estas dos variables, merece la pena resaltar la diferencia entre ellas. De un lado, la eficiencia térmica da una idea la relación entre las pérdidas de calor hacia el ambiente producidas desde el propio equipo de combustión (así pues, considerando este término, ambiente se refiere al espacio que rodea al equipo de combustión). No obstante, con este

término también se consideran las reacciones químicas producidas en la combustión. Por otra parte, este es empleado comúnmente a la hora de evaluar el desempeño de equipos de combustión. Por ejemplo, el analizador de gases de combustión proporciona una medida del mismo estimándolo a partir de otras medidas directas. Esta estimación se hace conforme al protocolo “BlmSCHV” [40]. No obstante, los equipos con los que se mide la eficiencia térmica de combustión suelen seguir dicho estándar. Dicha estimación se detalla en la *Ecuación 3*, donde se ha despejado la eficiencia térmica.

$$q_A = \frac{B}{1 - (t_A - t_L) \frac{A_2}{20,9 - [O_2]}}$$

Ecuación 3. Estimación de las pérdidas térmicas de equipo de combustión según el estándar “BlmSCHV”.

En esta *Ecuación 3* intervienen las variables siguientes: q_A son las pérdidas térmicas (%), t_A es la temperatura de los gases de combustión, t_L es la temperatura del aire circundante al equipo de combustión, B y A_2 son los parámetros propios de cada tipo de combustible, siendo 0,008 y 0,065 respectivamente en el caso de madera seca. Se han tomado estos valores por ser los RVI lo más parecido posible al caso en concreto de esta tesis (biomasa con cierto contenido en humedad).

De otra parte, está el termino al cual se le ha denominado en esta tesis: “Eficiencia térmica del proceso global de calefacción”. Esta estimación se ha hecho de forma complementaria a las anteriores medidas y viene a dar una idea de la relación entre la energía consumida, y cuánta es realmente aprovechada en elevar la temperatura del agua que circula por el circuito de agua conectado al equipo de combustión considerado. Esta estimación se hizo según lo planteado en la *Ecuación 4*. La misma se ha obtenido a partir de un balance de energía en cual se ha considerado un intervalo de tiempo determinado en el que se dejó hacer circular el agua a través del circuito. A la hora de registrar la temperatura del agua del depósito de la caldera, esta agua se hizo circular durante unos segundos. Este valor se tomó con una sonda de temperatura ubicada a la salida de la caldera. Esto tiene como objeto hacer circular cierto volumen a través de la sonda ubicada a la salida de la caldera, obteniendo un valor bastante cercano al que hay dentro del depósito de esta caldera. Al hacer esto, es normal observar un pico de temperatura. Tras este primer paso, se procedió a dejar el circuito en reposo durante cierto tiempo, llevando a cabo de forma simultánea la combustión de biomasa. De este modo, la mayor parte de la energía generada debe haberse invertido en incrementar la temperatura del agua contenida en

este depósito. Transcurrido este tiempo, se volvió a hacer circular el agua durante unos segundos y se registró la temperatura del agua. Se impuso como condición que el periodo durante el cual se mantuvo la circulación de agua parada y con combustión de biomasa, está última estuviese en un régimen estacionario.

El criterio seguido principalmente para esto fue, tanto la temperatura de gases de combustión, como de la concentración de CO₂. El hecho de dejar de hacer circular el agua a través del circuito hace más sencillo estimar las pérdidas térmicas dadas entre el tanque de la caldera y el ambiente circundante. Así mismo, se hizo esta determinación para los cuatro tipos de biomasa estudiados (pellets de pino, hueso de aceituna, residuos de tomate, y una mezcla de este último con poda de almendro, 75- 25%). Además, se ensayaron algunas de las configuraciones testadas para cada tipo de biomasa y la caldera, para estudiar su eficiencia térmica medida con el analizador de gases de combustión.

$$h = m_{H_2O} c_{p H_2O} \Delta Temp / (m_{comb} HHV)$$

Ecuación 4. Estimación de la eficiencia térmica del proceso global de calefacción.

En la *Ecuación 4* aparecen las siguientes variables: h es eficiencia térmica del proceso global de calefacción, m_{H_2O} es el flujo másico de agua circulando a través del circuito, $c_{p H_2O}$ es la capacidad calorífica del agua (en estado líquido, 4,186 J·g⁻¹·K⁻¹), $\Delta Temp$ es la temperatura del agua y m_{comb} es la masa de combustible consumida durante un intervalo de tiempo dado.

3.2.6. Concentraciones de CO, NO_x y SO₂

Las mediciones se realizaron con el analizador comentado en las secciones anteriores. Los valores mencionados en esta tesis en el apartado de resultados corresponden con reestimaciones llevadas a cabo suponiendo que la concentración de O₂ fuese de un 0% (mol/mol). Así mismo, se tuvo como condición que la caldera estuviese en un régimen de funcionamiento estable para registrar cada medida. Esto se hizo evaluando las distintas variables mencionadas en la sección anterior, analizando también su evolución en el tiempo. Para considerar que este desempeño fuese estable se esperó al menos unos 15 min tras haber efectuado un cambio de actuadores, tras esto también se comprobó que las medidas de estas variables se hubiesen estabilizado. El valor registrado de cada medida en concreto fue la media de un intervalo de al menos 10 segundos, tras observar este valor estable.

Para el proceso de captura de CO₂ una parte de los gases de combustión generados se toma desde los generados en la combustión llevada a cabo para aportar calefacción. Estos gases de combustión se han de hacer circular a través de un lecho de carbón activo (GMI P 4 S, CPL Activated Carbons Iberia - CPL GalaQuim -, Madrid, Spain) a presiones relativamente elevadas ($2 \cdot 10^5$ Pa).

Adicionalmente, según lo explicado en el apartado de introducción el carbón activo presentará mayor afinidad por el CO₂ que por otros compuestos químicos. Este hecho permitirá separar el CO₂. Por una parte, durante el proceso de captura manteniendo la presión de trabajo elevada, los gases expedidos desde el tanque quedarán con una concentración de CO₂ prácticamente nula o al menos por debajo del valor correspondiente a los gases de combustión expedidos desde la caldera (esto dependerá del nivel de saturación del lecho de carbón activo). Por otra parte, una vez se dispone a llevar a cabo inyección de CO₂ tras tener cierta cantidad de este adsorbida en el lecho de carbón activo, se liberan gases desde el tanque en el que se ha dispuesto este lecho de carbón activo. Esta corriente de gases fluyendo desde el tanque (y posteriormente dirigida hacia el invernadero) debe ser rica en CO₂ y prácticamente nula en estos otros gases los cuales no se pretendía inyectar (CO, NO_x y SO₂). Se hicieron las comprobaciones correspondientes, se empleó para ello un analizador de gases ambientales (MultiRAE Lite; Rae Systems Spain, S. L., El Prat de Llobregat, Spain). Este equipo está especializado en la determinación de concentraciones en un rango bastante menor a lo que suele observarse en gases de combustión. Por ejemplo, el rango de medida de analizadores de gases de combustión como el empleado para las medidas correspondientes a esta tesis en las determinaciones de la temperatura, concentración de CO₂, CO, SO₂ y NO_x presentes en los gases de combustión, está comprendido en concentraciones bastante superiores.

3.2.7. Análisis estadístico

La influencia estadística de los distintos factores estudiados ha sido estimada (tipo de biomasa, tasa de suministro de combustible, y aporte de aire primario y secundario). Se hizo un análisis de tipo tabla ANOVA multifactorial. En dicho análisis las variables dependientes fueron las mencionadas en el apartado 3.2 (temperatura de los gases de combustión, eficiencia térmica, concentración de CO₂, CO, NO_x y SO₂). Se tomó como referencia un P-valor de 0,05 y nivel de confianza de un 95% para este análisis. Por otra parte, se consideró una iteración de 2º grado entre algunos de los factores mencionados. Con esta estimación se pudo tener una orientación de cómo es la interacción cruzada entre estos. Las interacciones que fueron consideradas como razonables (desde el punto de vista de la naturaleza del sistema) fueron: tipo de biomasa vs.

aporte de aire primario, aporte de aire primario vs. Secundario y aporte de aire primario vs. tasa de alimentación de combustible.

3.2.8. Emisión de partículas

Se hicieron determinaciones cualitativas empleando la escala Bacharach con el analizador de gases de combustión previamente mencionado. Estas medidas fueron hechas solo con las configuraciones de la caldera más representativas de entre las testadas para el resto de las variables estudiadas.

3.3. Ensayo del sistema a escala piloto para calefacción y aporte de CO₂.

Este bloque corresponde con un análisis en más detalle de distintos aspectos relacionados con los datos recogidos durante los ensayos con el sistema piloto, todo lo relativo a los invernaderos, las plantas estudiadas y condiciones de cultivo es análogo a lo descrito en este apartado mencionado anteriormente.

3.3.1. Plantas estudiadas y condiciones de cultivo.

Mencionando algunos aspectos más específicos en lo referente a las condiciones de cultivo, se cultivaron unas 500 plantas (10 líneas con 50 plantas por cada línea). Aparte del control de temperatura mínima mediante la calefacción ya comentado, se mantuvo también un control de la temperatura máxima. Este se llevó a cabo mediante un intercambio de aire a través de ventanas dispuestas tanto en los laterales, como en el techo del invernadero. A partir de una temperatura máxima de consigna de 24 °C se procedía a abrir la ventilación.

Respecto a la calefacción, el diseño de la estrategia de control se ha centrado en integrar de un lado el mantenimiento de la temperatura mínima por encima del valor de consigna mencionado y el aporte de CO₂. La idea es capturar CO₂ siempre que se requiera llevar a cabo combustión para aportar energía calorífica de cara a la calefacción. Este enfoque está en contraste con la estrategia mencionada anteriormente, de quemar combustible para generar CO₂ y almacenar energía calorífica. Esta elección se basó en criterios económicos, teniendo cuenta también las condiciones meteorológicas que se dan usualmente en la zona dónde se ha centrado este estudio. Normalmente los periodos en los que se requiere calefacción suelen darse durante la noche. De este modo, el CO₂ generado de la combustión llevada a cabo para mantener calefacción durante una noche y capturado, es el que va a estar disponible para llevar a cabo

enriquecimiento al día siguiente. De este modo, de forma usual, era posible capturar CO₂ suficiente para satisfacer la demanda de un día para otro.

Por otra parte, la elección de una estrategia en la que el enriquecimiento se llevó a cabo solamente durante periodos en los que era posible mantener la ventilación cerrado se debió también a un criterio económico. Así mismo, llevar a cabo enriquecimiento con la ventilación abierta no es viable desde el punto de vista de criterios económicos. Teniendo en cuenta esta consideración, el enriquecimiento solo se llevó a cabo siempre y cuando se superase cierto nivel de radiación solar incidente ($10 \text{ W} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$). Por debajo de este nivel de radiación, se consideró que apenas las plantas pueden llevar a cabo fotosíntesis, con lo que no tiene sentido aportar CO₂. Este umbral de radiación se supera transcurridos unos minutos después del amanecer. Por otra parte, respecto a las condiciones climáticas que se dan usualmente en la zona dónde se llevaron a cabo estos ensayos, se registraron las siguientes variables relacionadas: las temperaturas mínimas diarias dadas en el exterior del invernadero, el salto térmico dado en ese momento entre el exterior y el interior, y la hora a la que se dio esa temperatura mínima en el exterior. Se calcularon las medias tanto semanales, como mensuales de estas variables. Estos datos se muestran en la *Figura 4*.

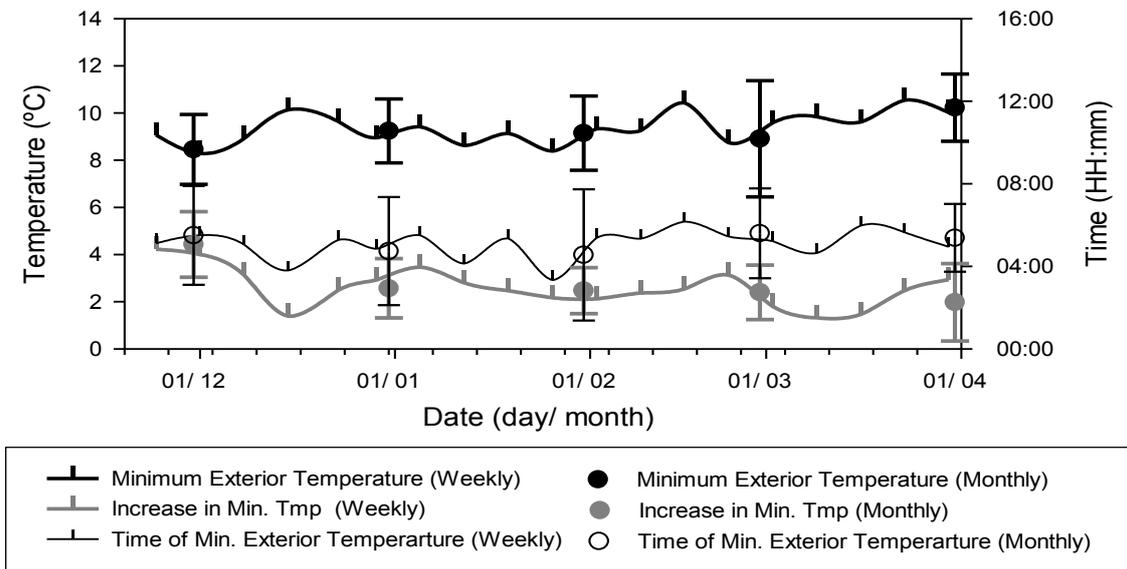


Figura 4. 1) Temperaturas exteriores mínimas diarias; 2) Salto térmico entre el exterior y el interior del invernadero en el momento en que se dieron esas temperaturas mínimas; 3) hora del día a las que se dieron esas temperaturas mínimas.

Así mismo, los distintos aspectos susceptibles de ser controlados (temperatura y concentración de CO₂ dentro del invernadero), los distintos actuadores involucrados (bombas aguas pertenecientes al circuito de agua caliente, ventanas del invernadero, soplane, válvulas de

regulación del flujo de gases de combustión, de gases inyectados dentro del invernadero), y también las distintas operaciones a llevar a cabo para el control de estas variables (activación de la calefacción y gestión de la captura e inyección de CO₂) fueron implementados mediante el desarrollo de distintos programas implementados a través de la herramienta de software LabView®. Dicha implementación permitió llevar a cabo este control y registrar distintas variables de interés de forma automática.

3.3.2. Sistema empleado para la calefacción y la captura y posterior aporte de CO₂

La *Figura 5* corresponde con el diagrama de bloques del sistema empleado. El mismo está integrado por dos partes: los equipos relacionados con aportar calefacción dentro del invernadero y aquellos relacionados con la captura y aporte del CO₂ generado en la combustión mantenida para satisfacer las necesidades energéticas correspondientes a la calefacción.

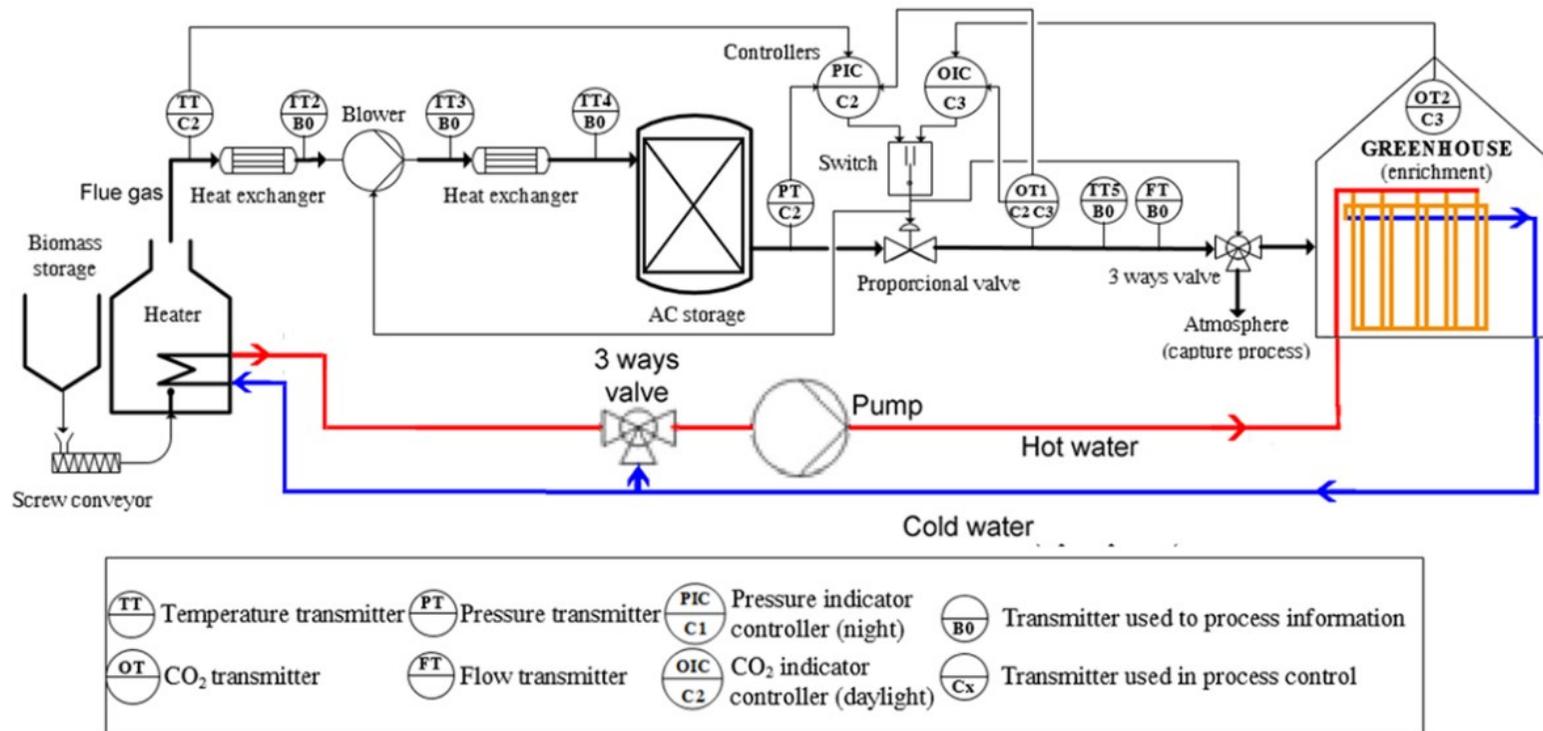


Figura 5. Diagrama de bloques del sistema empleado para la calefacción, la captura y aporte de CO₂.

3.4. Calefacción

Se empleó el mismo equipo de combustión mencionado en el apartado 3.2.2. El mismo dispone de un tanque de agua caliente. A su vez, este mantiene la temperatura de esta agua por encima de un valor de consigna dado. La estrategia de control es todo o nada. Una vez la temperatura en el tanque baja de este valor, procede a iniciar la combustión para aportar energía calorífica. Esta agua, así mismo, se hace circular a través de un circuito de tuberías dispuestas en el invernadero en los momentos en los que se requiere elevar la temperatura. De nuevo la lógica del control para esta variable es todo o nada, variando la consigna entre los 10- 12°C. Esto se explicó también en el apartado 3.3.1. Se empleó una combinación de tuberías acero inoxidable y polietileno para el circuito de agua. Una parte de estas tuberías (las de polietileno), se ubicaron alrededor a unos 5 cm por encima del nivel de sustrato de forma adyacente a la parte aérea de las plantas. Estas se dispusieron por el invernadero, de forma adyacente a cada línea. Por cada la línea, se dispuso un lazo que le daba una vuelta doble. Se muestran a continuación, desde la *Figura 6* hasta la *Figura 14*, distintas imágenes en que las que pueden apreciarse varios elementos con una importancia relativa tanto para el circuito de calefacción como el de distribución de CO₂.

En la *Figura 6*, *Figura 8*, y la *Figura 11* se muestran las tuberías de conducción de agua del circuito de calefacción a su paso por tres puntos distintos del sistema. Por esto hay números que se repiten en estas figuras. Estas tuberías, en concreto son: 1) Tubería de ida (en acero), 2) Tubería en la que se va recogiendo los distintos retornos de cada línea (esta sección es necesaria para que haya una distancia similar entre la bomba y cada uno de estos retornos). Por otra parte, en la *Figura 6* se han destacado los siguientes elementos, 3) Tubería de vuelta y 4) Inicio de una de las tuberías de polietileno dispuestas de forma adyacente a las plantas (esta da dos vueltas a cada línea antes de ser conectada la tubería dónde se van recogiendo los retornos). En la *Figura 8* se han destacado: 7) bomba que impulsa el agua por el circuito, 8) válvula de 3 vías que permite cerrar el lazo entre la ida y la vuelta para hacer circular agua sin hacerla pasar por la caldera (esto es útil para los ensayos explicados en la sección 3.2.5. Así mismo, en la *Figura 9* se han destacado, 9) la Soplante, 10) válvula proporcional, 11) caudalímetro de gases y 12) intercambiador de calor de calor dispuesto a la salida de la soplante. En la *Figura 10* se han destacado los siguientes elementos: 12) Válvula de tres vías dispuesta para direccionar el flujo de los gases que salen desde el tanque hacia el interior del invernadero o al exterior, 13) Conducción de los gases tras salir del caudalímetro y del tanque, 14) Conducción de los gases hacia la soplante, después de haber pasado por los dos intercambiadores de calor del sistema,

15) Tuberías de ida y vuelta del tanque de CO₂ 16) Conducción que dirige los gases que salen de la válvula de 3 vías (y del tanque) hacia el invernadero y 17) 2º Intercambiador dispuesto a la salida de la caldera.

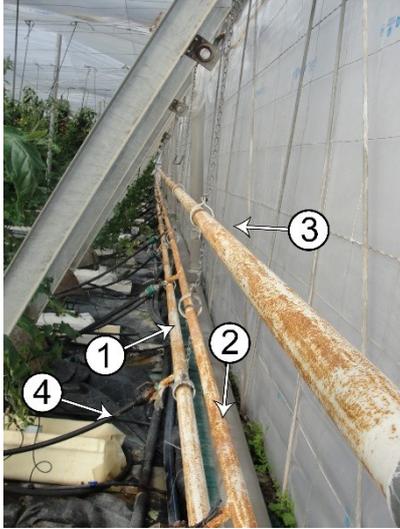


Figura 6. Elementos más destacables del circuito de calefacción dentro del invernadero (vista de la distribución de cada lazo dispuesto para las distintas líneas de cultivo).



Figura 7. Imagen de las conducciones tanto de (5) los lazos del circuito de agua caliente, como de (6) aquellas dispuestas para distribuir el CO₂ de forma homogénea por todo el invernadero.

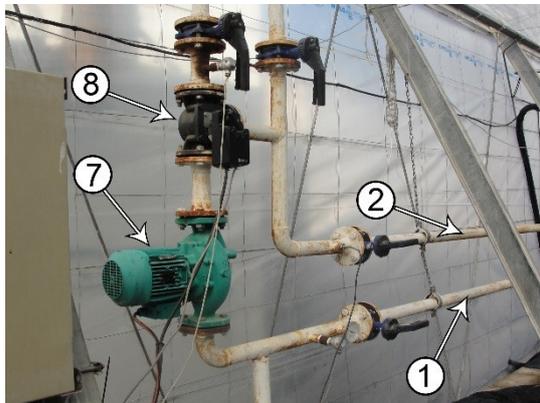


Figura 8. Distintos elementos del circuito de calefacción con relativa importancia a su entrada al invernadero.



Figura 9. Distintos elementos relacionados con la conducción de los gases de combustión.

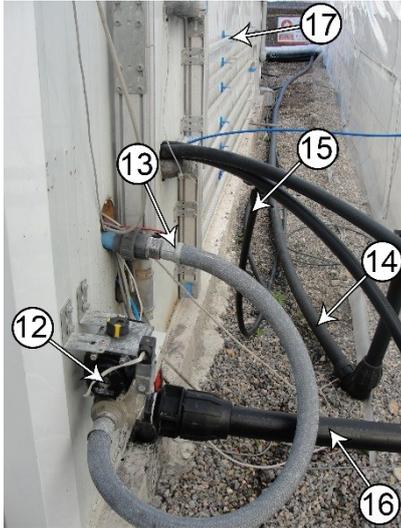


Figura 10. Diversos equipos y conducciones relacionados tanto con el circuito de calefacción como de distribución de CO₂ a la entrada del invernadero.

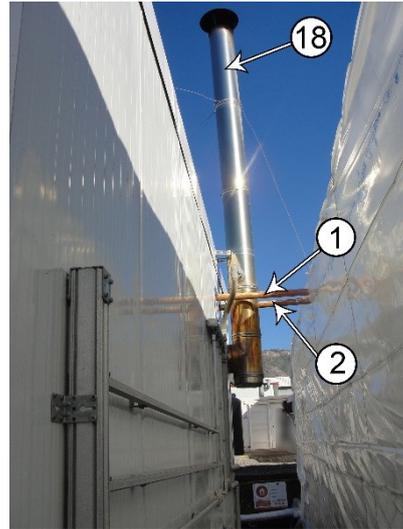


Figura 11. 18) Chimenea desde la que se toman parte de los gases de combustión generados.



Figura 12. Primer cambiador de calor dispuesto a la salida de la caldera.



Figura 13. Tanque en el que se ubica el carbón activo.



Figura 14. Carbón activo empleado (vista más cercana del lecho tal cual quedo dispuesto dentro del tanque).

3.5. Captura de CO₂ y enriquecimiento

La captura de CO₂ se llevó a cabo a través de un lecho de carbón activo contenido en un tanque. Este CO₂ quedaba almacenado en este tanque para posteriormente ser inyectado dentro del ambiente del invernadero en momentos en los que era conveniente llevar a cabo este aporte. Durante los momentos en los que se debía mantener combustión para aportar energía calorífica, de cara a la calefacción, parte de los gases de combustión eran bombeados dentro del tanque mencionado empleando una soplante. El valor de presión de trabajo, el cual se identificó como adecuado para llevar cabo esta operación fue de unos 200 kPa, este valor se regulaba mediante una estrategia de control proporcional con una válvula proporcional ubicada a la salida de este tanque.

Por otra parte, durante la captura se había de mantener activa la soplante mencionada para mantener la presión en un valor aproximado al de la consigna. Además de esto, se dispuso una válvula de tres vías, tras la proporcional. La misma permitía elegir dónde dirigir los gases eyectados desde el tanque, las dos posibilidades son: el invernadero, o el ambiente exterior. Así pues, durante el proceso de captura, los gases eyectados desde el tanque van a contener estos gases tóxicos (se está adsorbiendo CO₂ sobre el lecho de carbón activo). De esta manera, durante este proceso, lo conveniente es dirigir estos gases hacia el ambiente. Por otra parte, una vez se dispone a liberar el CO₂ capturado, la corriente de gases resultante tendrá una concentración prácticamente nula de estos gases tóxicos y relativamente alta en CO₂.

Una vez se dispone a llevar a cabo enriquecimiento, se procede a dirigir la corriente de gases que fluye desde el tanque hacia el invernadero. Al almacenarse los gases a alta presión tras finalizar la captura, se establece un flujo desde el tanque hacia las salidas del invernadero simplemente por diferencia de presión durante los primeros minutos de la captura. No obstante, tras igualarse la presión a la atmosférica queda cierto remanente de CO₂ dentro del tanque. Es posible agotar este, activando la soplante periódicamente con objeto de mantener cierto gradiente de presión entre el tanque y exterior. La inyección de CO₂ se detuvo una vez liberado el 80% del total de la capacidad de retención del tanque. Se fijó este valor por criterios económicos. Así mismo, se estimó la cantidad liberada de CO₂ mediante balances de materia según lo planteado en la *Ecuación 5*.

$$\dot{m}_{cpt} = \frac{[[CO_2]_{tnq} - [CO_2]_{g\ comb}] q_{CO_2} (P + P_{tnq}) M.M. CO_2}{R T_{inv}}$$

Ecuación 5. Flujo másico de CO₂ capturado durante el proceso de captura.

La ecuación 5 detalla: $[CO_2]_{tnq}$ es la concentración de CO₂ de los gases fluyendo desde de tanque, $[CO_2]_{g\ comb}$, es la concentración de CO₂ los gases a su entrada en el tanque (por lo tanto a su salida de la caldera de biomasa también), q_{CO_2} es el caudal de gases, P es la presión fuera del tanque (normalmente será la atmosférica, P_{tnq} es la presión dentro del tanque, $M.M.CO_2$ es la masa molecular del CO₂, R es la constante de los gases universal, T_{inv} es la temperatura del invernadero y \dot{m}_{cpt} es el flujo más de CO₂ capturado [[Masa]/ [Tiempo]].

Respecto a la forma en la que debía operar el sistema, la estrategia de control se centró en controlar la temperatura mínima dentro del invernadero. El control de esta variable fue lo prioritario en el caso de este ensayo. A partir de esto, en momentos en los que se demande hacer combustión, se procede a hacer captura siempre y cuando no se haya saturado el lecho de carbón activo previamente. Por último, en momentos en los que las condiciones ambientales sean adecuadas y su concentración esté por debajo de la consigna previamente fijada, se lleva a cabo inyección de CO₂. Estas condiciones son: 1) siempre que el valor de su concentración (radiación solar incidente por encima del mínimo fijado, no haya demanda de calefacción y no es necesario mantener la ventilación del invernadero abierta) y 2) Sea posible mantener la ventilación del invernadero cerrada (no se esté sobrepasando la consigna de temperatura máxima dentro del invernadero).

3.6. Estrategia de control

Un sistema automático se empleó tal y como se mencionó en el apartado 3.3.2. La estructura de control de este sistema también ha sido esquematizada en la *Figura 5*. Este se compone de distintas sondas y actuadores, los cuales permiten controlar y monitorizar las variables mencionadas a continuación. Entre estas estuvieron la temperatura y concentración de CO₂ dentro del ambiente del invernadero. Estas fueron monitorizadas en distintos lugares/ partes del sistema con relativa importancia.

Así mismo, entre aquellas partes en las que se monitorizó la temperatura estuvieron: el exterior del invernadero, corrientes de gas a su salida de la caldera, soplante y cada uno de los dos cambiadores de calor dispuestos (después de la caldera y de la soplante). Entre los lugares en los que se registró la concentración de CO₂: estuvieron la salida de la caldera y del tanque y el

ambiente del invernadero. Por otra parte, centrándose en el circuito de calefacción, la temperatura del agua también se registró en varios puntos: a su salida de la caldera, tras la válvula de 3 vías ubicada después de la caldera (dispuesta para este circuito de agua y ubicada al principio de este) y al final de este circuito (justo antes de llegar de nuevo a la válvula de 3 vías). Por otra parte, entre los actuadores del sistema están: la propia caldera de biomasa, la soplante, la válvula de tres vías ubicada entre tanque de CO₂ y el invernadero (para la corriente de gases de combustión), la válvula de tres vías dispuestas a la salida de caldera (para la corriente de agua empleada en la calefacción) y las ventanas del invernadero (involucradas en el control de la temperatura máxima). A su vez, ya se ha comentado que se utilizó un software licenciado (LabView®, *Apartado 3.5*) para implementar el control automático de las variables listadas anteriormente. A través de este, dichas variables se mantuvieron dentro de unos rangos adecuados. Los distintos actuadores del sistema fueron integrados en este control para lograr este propósito.

3.7. Ensayos de calefacción y enriquecimiento con CO₂

Se registraron distintos datos correspondientes a variables relacionadas con las condiciones de cultivo. Entre estas estuvieron la temperatura y la concentración de CO₂ dentro y fuera del invernadero. Así mismo, se estimaron distintos valores a partir de estas variables registradas. Entre estos valores estuvieron:

1. El gradiente de temperatura entre el invernadero y el exterior en el momento en el que se da la mínima en el exterior.
2. El máximo gradiente de temperatura en momentos en los que había demanda de calefacción (entre el exterior y el interior de nuevo).
3. La cantidad de biocombustible empleado.
4. El tiempo total durante el cual se llevaron a cabo las siguientes aplicaciones:
 - a. Calefacción.
 - b. Captura de CO₂.
 - c. Aporte de CO₂.
5. La concentración máxima de CO₂ registrada diariamente cada día.
6. La media ponderada correspondiente durante momentos en los que se estaba aportando CO₂ cada día.

7. La hora del día a la que se dieron los siguientes valores:
 - a. Temperatura exterior mínima
 - b. Máximo gradiente de temperatura (entre el exterior y el interior).
 - c. La primera hora del día a la que se llevó a cabo enriquecimiento.
 - d. La última hora del día a la que se llevó a cabo enriquecimiento.

8. Los siguientes flujos de calor:
 - a. El transmitido desde circuito de agua al ambiente del invernadero. Estimación llevada a cabo empleando la *Ecuación 6*.
 - b. El transmitido por la renovación de aire. Este serán pérdidas o ganancias, negativo o positivo, en función del gradiente de temperatura dado entre el exterior y el interior del invernadero. Su estimación se hizo según la *Ecuación 7*.
 - c. El acumulado entre dos momentos dados, considerando la masa total de aire presente en el invernadero (este también serán pérdidas o ganancias, dependiendo de este gradiente de temperatura). Estimación llevada a cabo empleando la *Ecuación 8*.

9. Las siguientes cantidades de CO₂ la cuales corresponden con:
 - a. El suministro dentro del invernadero para elevar su concentración. Se estimaron cantidades diarias. Estas, a su vez, se estimaron mediante el balance planteado en la *Ecuación 12*.
 - b. Pérdidas debidas al intercambio de aire con el aire exterior. Esta estimación se hizo mediante el balance planteado en la *Ecuación 13*.
 - c. Ganancia debida al intercambio de aire con el aire exterior. Esta estimación corresponde, de nuevo, con esta *Ecuación 13*.
 - d. Capturada para llevar a cabo enriquecimiento en momentos en los que se lleva a cabo combustión para mantener la calefacción. Estimado con el balance de materia planteado en la *Ecuación 14*.

Por otra parte, se procedió a corroborar que la cantidad total de CO₂ que el lecho de carbón activo es capaz de retener correspondiera con lo inicialmente diseñado según la capacidad que detalla el fabricante. Para esto se llevaron a cabo experimentos específicos. En los mismos, el sistema fue operado siguiendo una serie de medidas encaminadas a conseguir mantener el proceso de captura durante un periodo de tiempo lo más prolongado posible. Entre estas medidas están: 1) iniciar el proceso a primera hora de la mañana (a esta hora se suelen dar las temperaturas mínimas en el invernadero, 2) dejar enfriar el agua contenida en el circuito durante la noche anterior, al menos dos horas antes de iniciar estos experimentos, 3) fijar una

temperatura de consigna lo más alta posible para el agua contenida en el depósito de la caldera (80 °C) y 4) mantener el proceso de captura durante el máximo tiempo posible. Relativo a la 3ª medida expuesta, una temperatura con un valor mayor del mencionado puede ser peligrosa, uno de los motivos es que surjan sobrepresiones superiores a la recomendable dentro del depósito de la caldera, además con momentos en los que surja una evaporación repentina dentro de este. Otro motivo es superar la temperatura del agua máxima recomendada para las tuberías de polietileno. De forma general, relativo a estas cuatro medidas mencionadas, a pesar de seguirlas era relativamente normal que el proceso de captura debiera ser interrumpido por esta circunstancia de que la temperatura del agua del depósito de la caldera alcanzase su valor de consigna. Cuando sucedía esto, se procedía a pausar este proceso, y hacer circular el agua del circuito de calefacción sin aportar combustión para disminuir su temperatura hasta cierto valor que permitiera reanudar la captura durante cierto intervalo de tiempo adicional. Así mismo, en las primeras ocasiones que esto sucedía, se procedía a reemplazar el total del volumen del depósito de la caldera por agua más fría (prácticamente a la misma que el ambiente del invernadero). Se llevó a cabo este proceso de captura hasta observar que el lecho se hubo saturado. Se consideró que este punto se alcanzó al observar que la concentración de CO₂ de los gases a su salida del tanque era un 80% del de los que entran.

Por otra parte, relativo a los experimentos llevados a cabo a largo plazo, estos se llevaron a cabo durante los meses de invierno (desde diciembre hasta enero, época con las mínimas temperaturas diarias). No obstante, las plantas fueron trasplantadas en el invernadero en septiembre antes de haber sido sembradas dos semanas antes. Durante este periodo, el número de frutos por planta fue registrado (el mismo está relacionado con la productividad). Una plantación lo más similar posible se cultivó a modo de control. La misma se dispuso en invernadero ubicado junto a él que sí se aportó calefacción y enriquecimiento carbónico. Así mismo, se sembró la misma variedad de plantas. También se empleó la misma estrategia de control con respecto al resto de variables con influencia en el crecimiento. Entre estas estuvieron: el diseño del invernadero, la luz incidente sobre el cultivo. La tasa de riego y nutrientes suministrados, pH del suelo, salinidad de este, humedad relativa máxima y temperatura en el ambiente del invernadero. Con estas variables fijadas se deberían evidenciar cualquier diferencia en lo relativo al crecimiento y/ o productividad debida a la combinación de estas dos estrategias. Estas serían: 1) temperatura mínima del aire del ambiente que rodea al cultivo, llevada a cabo por la aplicación de la calefacción; y 2) Aporte de CO₂ para mantener su concentración por encima de 1325 g/ Nm³ (700 ppm), siempre y cuando sea posible mantener la ventilación del invernadero cerrada.

4. RESULTADOS

4.1. Caracterización de los RVI y alternativas para su mejora.

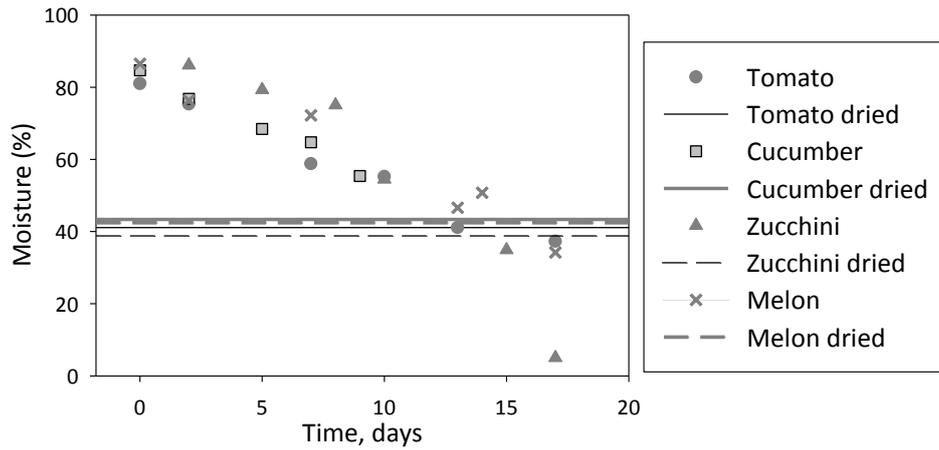
4.1.1. Secado del RVI.

Los experimentos de secado dentro del mismo invernadero donde se generaron los RVI permitieron disminuir su contenido en humedad significativamente en 20 días. La *Figura 15* muestra la variación de la humedad a lo largo del proceso de secado natural de los RVI.

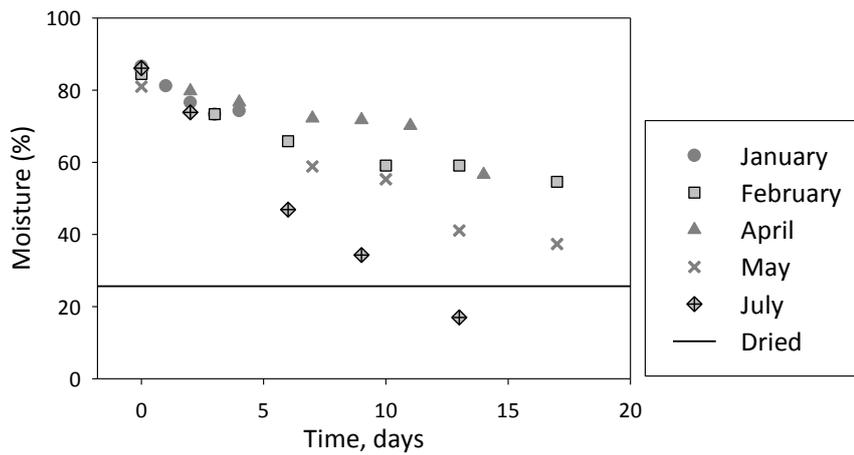
Centrándose en las condiciones climáticas, no se encontraron diferencias significativas respecto a la velocidad de secado entre las distintas variedades de cultivo estudiadas. Se puede considerar, que las condiciones climáticas no tuvieron una influencia significativa. Puesto que los experimentos llevados a cabo para cada variedad se llevaron a cabo de manera simultánea y en mismo lugar, es posible concluir que estas variaciones observadas para las velocidades de secado se dieron fundamentalmente por diferencias en cuanto al tipo de materia vegetal. Cada variedad hortícola debía tener distintas propiedades relacionadas con sus tejidos vegetales. Las cuales hacían que estos retuvieran humedad con distinta afinidad. Por otra parte, comparando la velocidad de secado de una misma variedad en distintas épocas del año, se evidenciaron ciertas diferencias. Las mismas estuvieron relacionadas con la humedad de equilibrio finalmente alcanzada y la velocidad de secado.

El hecho de llevar a cabo este secado en distintas épocas del año es el factor que se ha observado que tiene una mayor influencia. Esto a su vez, se explica por diferencias en cuanto a las condiciones climáticas. A pesar de hacer estos experimentos dentro de un invernadero, estas acabaron influyendo. La temperatura interior (dentro del invernadero) suele ser menor durante los meses de invierno. Así mismo, la humedad relativa suele ser mayor. Por otro lado, la velocidad de circulación de aire dentro del invernadero es otra variable con influencia. Esta depende en gran medida del viento exterior incidente sobre las ventanas. La misma no tiene una relación tan clara con la época del año. Si bien es cierto, que también influye el salto térmico entre el exterior y el interior del invernadero. Esta última contribución no es tan importante como la del viento externo. De este modo, cuanto mayor fue la temperatura y menor la humedad relativa externa, la velocidad de secado incrementó y la humedad de equilibrio alcanzada fue menor.

A) Various crops



B) Tomato



C) Pepper

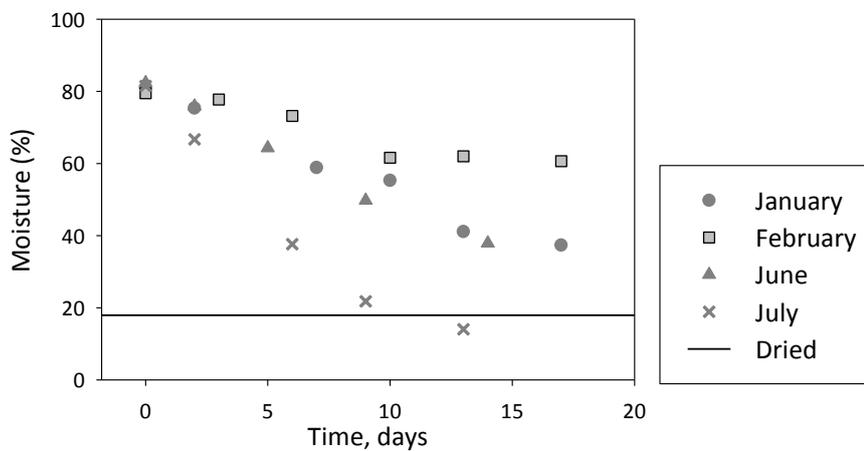


Figura 15. Resultados de la experimentación de secado para distintas variedades de cultivo en distintas épocas del año.

Por otra parte, al tratarse este pretratamiento de un secado es razonable estudiar si el contenido en cenizas puede aumentar tras su aplicación. La aplicación de este no supuso un incremento

significativo. Este hecho puede deberse a dos factores distintos. Por una parte, la temperatura alcanzada dentro de invernaderos era significativamente menor que la alcanzada en secaderos usuales (en estas se aplican corrientes de aire a temperaturas normalmente más elevadas). La segunda es que a pesar de que la humedad de este tipo de biomasa es bastante alta en el momento de ser arrancadas, tras los primeros días de secado el contenido en humedad baja notablemente. Este hecho, pudo limitar el desarrollo de microorganismos que potencialmente podrían haber desempeñado reacciones de degradación de esta biomasa.

4.1.2. Limitación del contacto con el sustrato del invernadero

Las propiedades relacionadas con la combustión directa se han recogido en la *Figura 16*. En concreto, las estudiadas fueron el contenido en humedad, cenizas, azufre, cloro y poder calorífico de combustión. Estos a su vez se han medido para tres tipos de biomasa. Esta previamente fue extraída del invernadero siguiendo esta forma de proceder. Los tipos de biomasa fueron: residuos de tomate, pimiento y tomate mezclado con arena. Es posible observar como la implementación de esta estrategia, permitió conseguir una notable reducción en el contenido en cenizas (hasta un 52,1%). Este hecho debió de ser consecuencia de esta modificación en lo referido a la retirada de las plantas del invernadero dónde estaban siendo cultivadas.

4.1.3. Mezcla con biomasa con propiedades de combustión más apropiadas.

Las propiedades de las mezclas evaluadas se presentan en la *Figura 1*. Tal y como se pretendía el contenido en cenizas pudo ser limitado notablemente a través de esta mezcla. Así mismo, el poder calorífico de combustión de la biomasa permaneció en un rango similar al del visto para otros tipos de biomasa empleados con mayor frecuencia en aplicaciones de combustión. Cabe recordar que este valor corresponde con el momento de la retirada de esta biomasa del invernadero (con su correspondiente contenido en humedad).

Los contenidos de Cl y S correspondientes a los residuos de cultivos de pimiento fueron inferiores a los de tomate. Así mismo, es relevante el hecho de que el contenido de estos elementos disminuyó para los residuos que fueron retirados evitando su contacto con el sustrato del invernadero. Esto se puede explicar por haber limitado la incorporación de arena y/o suciedad procedente del sustrato de cultivo. Este contacto parece tener una contribución significativa en la presencia de estos compuestos. Adicionalmente, los contenidos en Cl y S observados para la mezcla de poda de almendro y tomate (25- 75%) fueron similares a los

observados para los residuos de pimiento. No obstante, estos contenidos en Cl y S fueron significativamente mayores que los recomendados según la normativa relevante [41].

Respecto a la composición elemental de las cenizas obtenidas a partir de estos tipos de biomasa, esta se presenta en la *Figura 17*. Entre los elementos mayoritarios observados estuvieron el calcio, potasio, magnesio y fósforo. Analizando las diferencias más notables, se puede observar que el contenido en estos elementos fue considerablemente menor en el caso de aquellas muestras “libres de arena” (para la recogida correspondiente de biomasa se evitó su contacto con el sustrato del invernadero). Este resultado estuvo en consonancia con lo visto para el caso del contenido en cenizas. Esto a su vez permite presuponer que gran parte del contenido extra de cenizas de esta biomasa tal cual es encontrada empleando las técnicas habituales de retirada se debe a que incorpora arena durante la misma (SiO_2).

Al mismo tiempo, cabe destacar niveles relativamente superiores relativos al potasio en el caso de los residuos de pimiento, sodio en caso de los de tomate y calcio en el caso de la mezcla de los residuos de tomate y poda de almendro. Es destacable que la composición elemental: se redujo el contenido en cenizas de distintos elementos con presencia mayoritaria comparando con la biomasa retirada de forma usual y aquella con la que se evitó poner en contacto con el sustrato del invernadero. Esta variación en los niveles de concentración puede estar provocada, por el hecho comentado de evitar incorporar arena en su retirada. Además, se produjo un incremento notable en la concentración de calcio en el caso de la mezcla de RV de tomate y poda de almendra, esto es de esperar puesto que este tipo de biomasa usada para la mezcla era de origen leñoso.

Por otra parte, en la *Figura 17* se presentan también datos relacionados con el comportamiento de las cenizas fundidas para los correspondientes tipos de biomasa estudiados (sinterización, esferificación, hemi-esferificación y temperatura de fusión). Estas propiedades son útiles para predecir cómo se forman deposiciones de cenizas fundidas (escorias) sobre las superficies del interior de un equipo de combustión y cómo se generan cenizas volátiles. Analizando estos datos, la mezcla de residuos de tomate y poda de almendro presentaron una temperatura de fusión apreciablemente mayor. Diferencias en la composición de cada tipo de biomasa han ser la causa de esta variación en las temperaturas de fusión.

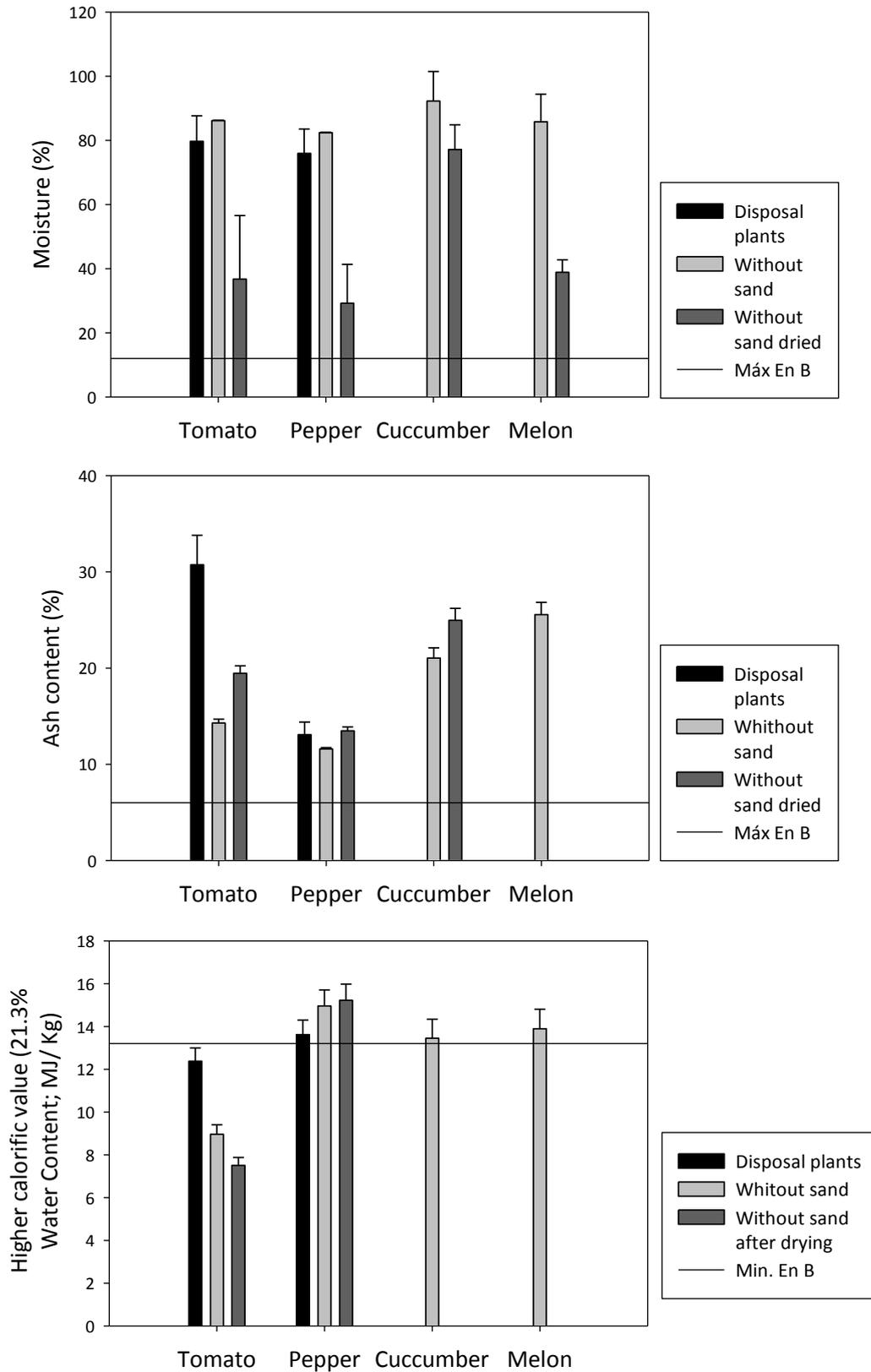


Figura 16. Comparativa de propiedades relacionadas con la combustión directa de distintos tipos de materia vegetal tras ser retirados evitando su contacto con el sustrato de cultivo.

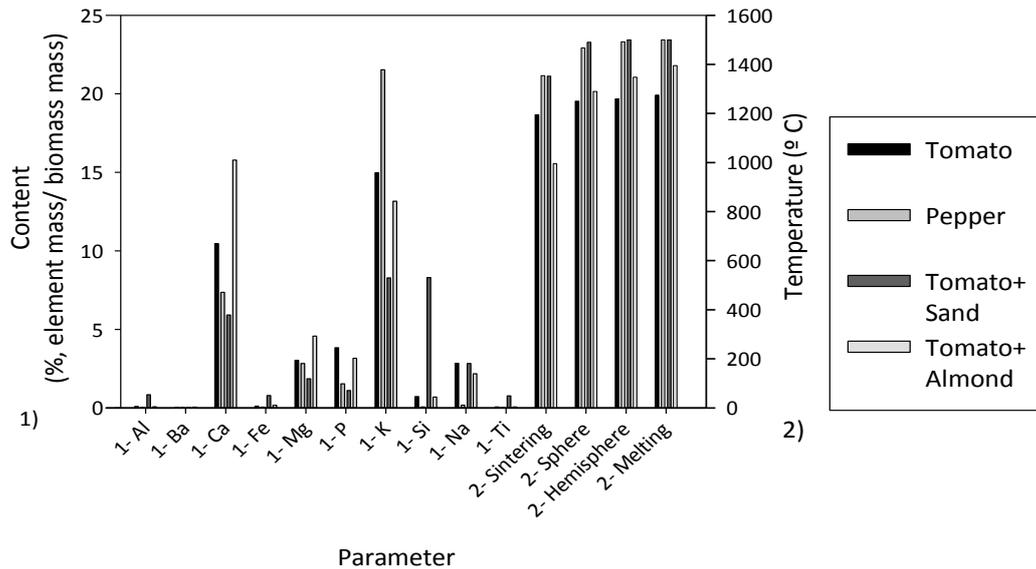


Figura 17. Contenido en elementos mayoritarios y temperaturas de fusión de las cenizas de restos vegetales de pimiento y tomate, así como de mezclas de restos de tomate con una alta presencia de arena (restos retirados según un procedimiento estándar) y mezclas con poda de almendro (temperaturas de fusión: sinterizado, esférica, hemisférica y fusión).

Considerar la posibilidad de que hubiera diferencias potenciales entre las distintas partes de las plantas, sería interesante. Publicaciones en las que se recogieron estudios sobre este aspecto pero para el caso de otras variedades de plantas, señalaron que sí existen estas diferencias [42], [43]. Teniendo en cuenta estas conclusiones, cabría esperar que diferencias similares fueran encontradas en las variedades de plantas estudiadas en este trabajo. En tal caso, alguna parte o tejido de estas plantas puede resultar ser más conveniente para combustión directa.

4.1.4. Caracterización de biomasa

Los resultados obtenidos de la caracterización de distintos tipos de biomasa estudiados son expuestos en la *Figura 18*. Se comparan las propiedades relacionadas con la combustión directa de distintos tipos de RVI con los correspondientes a otros tipos de biomasa empleados usualmente en aplicaciones comerciales. Por otra parte, en esta figura se han trazado los límites correspondientes a la normativa aplicable a biocombustibles sólidos (Solid biofuels- Fuel specifications and classes- Part 1: General requirements, 2014 [44]). Los datos mostraron como los RVI tienen contenidos en humedad bastante superiores a los presentes en pellets de olivo y madera. Estos valores estuvieron comprendidos en un rango entre el 58 al 80%. Sin embargo, existen ciertas diferencias entre los valores de distintas localizaciones. El principal factor fue el tipo de residuo. Aunque hubo ciertas diferencias entre los valores correspondientes a las

distintas localizaciones desde dónde se obtuvieron estos residuos, estas diferencias fueron considerablemente mayores comparando los datos correspondientes a cada variedad de cultivo estudiada.

Por otra parte, el alto contenido en humedad visto en estos RVI (correspondiente al momento de ser arrancadas del sustrato) implica que iniciar la ignición para proseguir con su combustión resulta bastante dificultoso, requiriendo someter el combustible a unas temperaturas relativamente altas. Así mismo, este alto contenido en humedad puede llevar a que, a pesar de haber conseguido la ignición, la combustión no sea capaz de seguir auto propagándose. Explicado de otro modo, la energía liberada durante los primeros momentos de la ignición no es capaz de seguir manteniendo una temperatura lo suficientemente alta como para que la combustión siga manteniéndose. Por otra parte, es relativamente reseñable que, los RVI pueden llegar a presentar una gran heterogeneidad. Esto ocurre puesto que no se les ha hecho un pretratamiento previo. El contenido en humedad, por ejemplo, varía considerablemente en función del tiempo que pasa desde que estas son extraídas del sustrato de cultivo. Así pues, un pretratamiento previo de secado como el explicado previamente (apartado 4.1.1) podría adecuar la biomasa en mayor medida de cara a ser empleada de combustión. En bibliografía previa se ha recogido que estos valores estuvieron en un rango algo más estrecho, entre el 80.9 y 93% (Pimiento y calabacín respectivamente, aunque también se reportaron valores intermedios para pepino, berenjena, tomate, judía, sandía y melón) [45]. No obstante, en este estudio en concreto solo tomaron plantas recién cortadas. Esto puede explicar este rango más estrecho. El propósito del estudio correspondiente esta tesis es determinar cómo es posible encontrar estos RVI en las plantas de recogida, por eso el procedimiento seguido fue el de tomar muestras en plantas de recogida de forma aleatoria. No obstante, también se compararon estas muestras con otras tomadas directamente de invernaderos y analizadas tras haber cortado las plantas. En este caso si es cierto que el rango de valores observados fue algo más estrecho y similar a los valores recogidos en esta bibliografía previa.

Por otra parte, el contenido en cenizas osciló entre un 14.1- 40.4%. Estos valores fueron considerablemente mayores que los correspondientes al de hueso de aceituna y pellets de madera. No hubo diferencias significativas de nuevo entre las distintas localizaciones. Tal cuál sucedió, con los valores observados correspondientes al contenido en humedad. El factor que tuvo más importancia en lo referente al contenido en cenizas, fue el tipo de biomasa empleado. Las plantas de pimiento presentaron menores valores, mientras que los correspondientes al

calabacín fueron mayores. La bibliografía previamente citada [45] reporta valores para estos contenidos en cenizas de entre 13.9 y un 29.8% (berenjena y calabacín respectivamente).

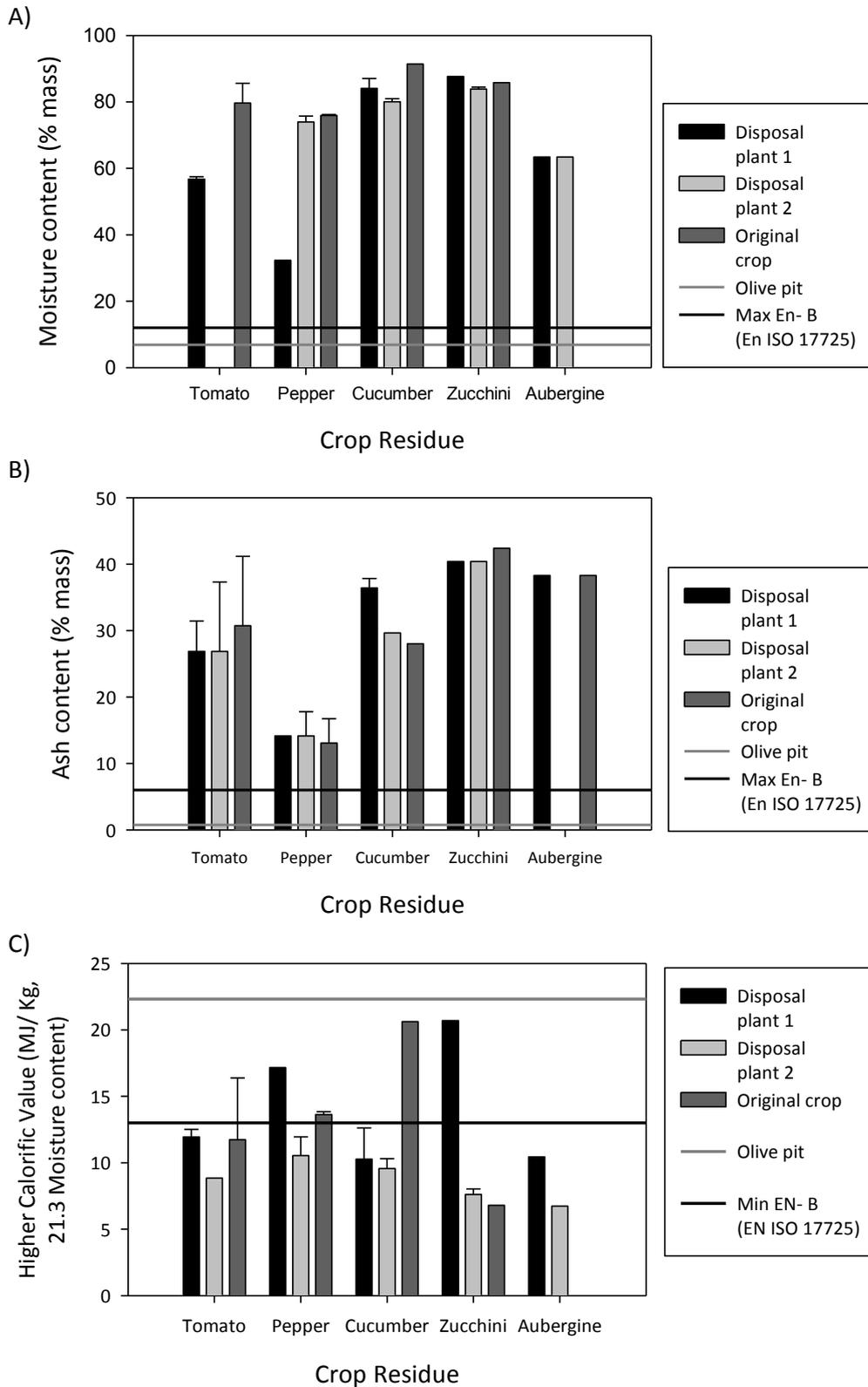


Figura 18. Propiedades físico-químicas y energéticas de RVI. A) contenido en humedad, b) Contenidos en cenizas y c) Poder Calorífico de Combustión.

Respecto al poder calorífico de combustión bruto (PCCB), este valor estuvo en el rango medido para otras biomásas empleadas usualmente en aplicaciones en las que hay involucrada una combustión directa (huesos de aceituna y pellets de madera). Los datos representados en esta *Figura 18* están estandarizados respecto a un contenido de humedad de referencia (21.3%). Todos los valores experimentales referentes al PCCB fueron recalculados considerando que este era su contenido de humedad y así poder tener una mejor referencia a la hora de comparar los valores observados para cada tipo de biomasa. Este valor de referencia (21.3%) corresponde con el valor medio observado del contenido en humedad de equilibrio obtenido en los experimentos de secado llevados a cabo. Teniendo en cuenta esta estandarización, los valores de poder calorífico bruto estuvieron en un rango de entre 6.7 MJ/ kg y 20.7 MJ/ kg (berenjena y calabacín respectivamente). Principalmente, la variedad de cultivo fue el factor con mayor influencia y procedencia de estos residuos tuvo un efecto menor. A la vista de los resultados obtenidos, el PCCB era aceptable para su uso como combustible. Siendo conveniente disminuir tanto su contenido en humedad como cenizas.

Se ha registrado que el PCCB de distintos tipos de biomásas estudiadas estuvo en un rango de 12.6- 16.5 MJ/ kg (calabacín y berenjena respectivamente), en cambio los valores observados en este trabajo presentan una variabilidad mayor. Puede ser debida a la misma causa argumentada para el caso del contenido en cenizas y poder calorífico de combustión. Puede ser relevante el hecho de que el caso que presentó mayor discrepancia fue aquel tipo de biomasa (berenjena) con un menor contenido en humedad. Esto puede deberse a que para el caso de la muestra tomada de este tipo de biomasa transcurrió un periodo de tiempo mayor entre el corte de la planta y el momento en que se procedió con la determinación de la humedad. Es importante recordar que la biomasa, tal cual se encuentra en las plantas de tratamiento, puede haber estado almacenada en estas durante periodo de tiempo distintos dependiendo de la muestra tomada. Por esto mismo, es razonable argumentar que esta diferencia pudo darse por el hecho de que distintos compuestos orgánicos sufrieron un mayor grado de descomposición. Esta circunstancia correspondería con el caso de estas muestras de biomasa de plantas de berenjena. A su vez, esta particularidad llevó a que el PCCB disminuyera más en el caso de las muestras de este tipo de biomasa.

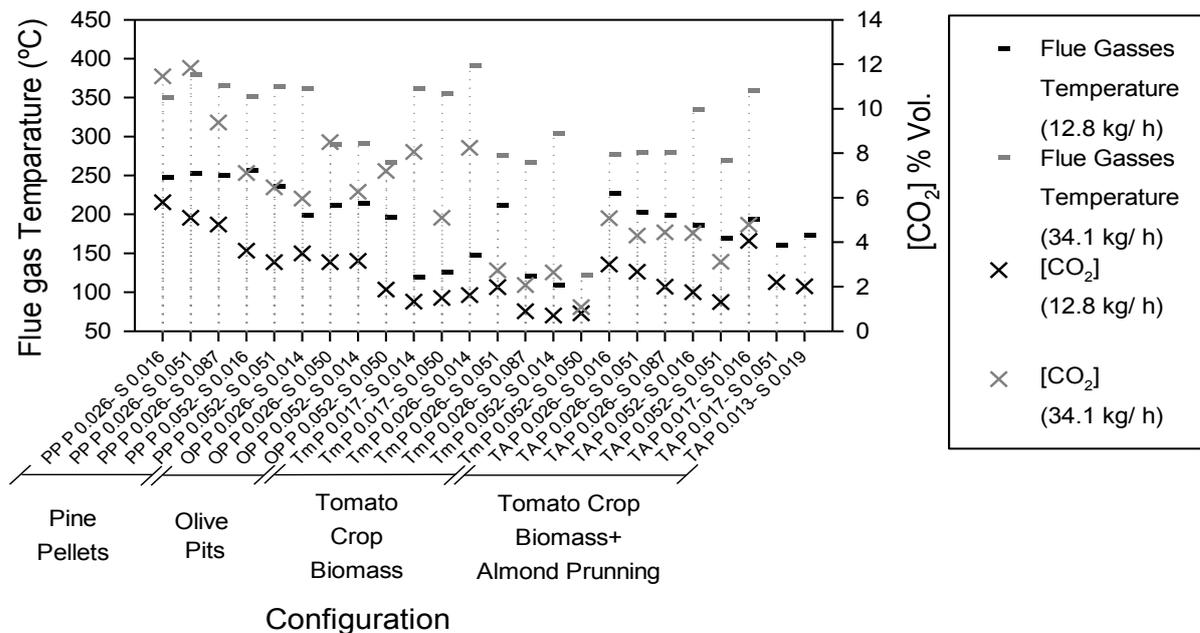
4.2. Ensayos de optimización de la caldera

La misma configuración fue ensayada para dos velocidades distintas de suministro de combustible. Los niveles de CO, NO_x y SO₂ fueron comparados con aquellos establecidos como

límite según la normativa aplicable. Así mismo, estos niveles fueron recalculados asumiendo que la concentración de O₂ era un 0%. En consecuencia, los límites que se pueden encontrar en estas figuras cambian dependiendo de la configuración considerada y el exceso de aire empleado en cada una de estas configuraciones estaba relacionado con estas variaciones.

4.2.1. Temperatura de gases de combustión y contenido en CO₂

Los valores observados para estos parámetros quedan presentados en la *Figura 19*. Estudiando la temperatura y centrándose en cada tipo de biomasa, la combinación de las tasas de aporte de aire/ combustible y turbulencia tuvieron un impacto notable. La relación observada con la tasa de aporte de combustible fue la más evidente, cuanto mayor era esta, mayor temperatura se obtuvo. Respecto al suministro de aire primario, la temperatura también aumentó con este. Por otra parte, el aporte de aire secundario no tuvo un efecto tan evidente, observándose que para algunas configuraciones apenas tuvo impacto. Los mayores valores observados, en lo referente a la temperatura, correspondieron con algunas de las configuraciones ensayadas con pellets de pino. Por otra parte, hubo valores especialmente bajos para algunas configuraciones de RVI de tomate y la mezcla con la poda de almendro. En estas configuraciones el proceso predominante durante la combustión debió ser el de deshidratación y/ o volatilización ya que estos procesos son los que se producen a temperaturas inferiores. Así mismo, el aporte de aire secundario tuvo un impacto mayor en la temperatura para el caso de estos dos tipos de biomasa.



Respecto al CO₂, los valores de concentración observados para cada configuración (presentados también en la *Figura 19*), parece haber una relación entre el aporte de combustible y la concentración de CO₂: uno aumenta a medida que lo hace el otro. Este incremento fue más evidente en el caso de pellets de pino y hueso de aceituna. Al mismo tiempo, no lo fue tanto en el caso de los otros tipos de biomasa. Relativo al aporte de aire primario, solo se pudo observar una relación clara para el caso de los pellets de pino. A medida que aumentaba una, lo hacía la otra. Respecto al aporte de aire secundario, este fue el impacto más destacable sobre esta variable para los pellets de pino para el caso de cada configuración ensayada. Esta tendencia solo fue observada para los flujos de aire menores cuando se testó la mezcla de residuos de plantas de tomate con poda de almendro. En este caso, la concentración de CO₂ decreció sensiblemente conforme lo hacía el aporte de aire secundario. Los niveles de CO₂ fueron mayores usando pellets de pino para la mayoría de las configuraciones probadas salvo en el caso de algunas de hueso de aceituna que obtenían valores mayores.

4.2.2. Eficiencia térmica y global de calefacción

Los valores correspondientes a la eficiencia térmica y del sistema de calefacción se han incluido en la *Figura 20*. En la misma, aquellos puntos para los que se especifica un valor de >95% para los valores de eficiencia térmica responden a medidas para las cuáles se excedió el límite del analizador. Por otra parte, la eficiencia de la calefacción fue estimada mediante el balance de energía y materia [22]. En las configuraciones que se superó un 90% han sido destacadas y estos valores se consideran que no son demasiado fidedignos debido a que se considera que la eficiencia en estos casos no debe de llevar a ser tan alta.

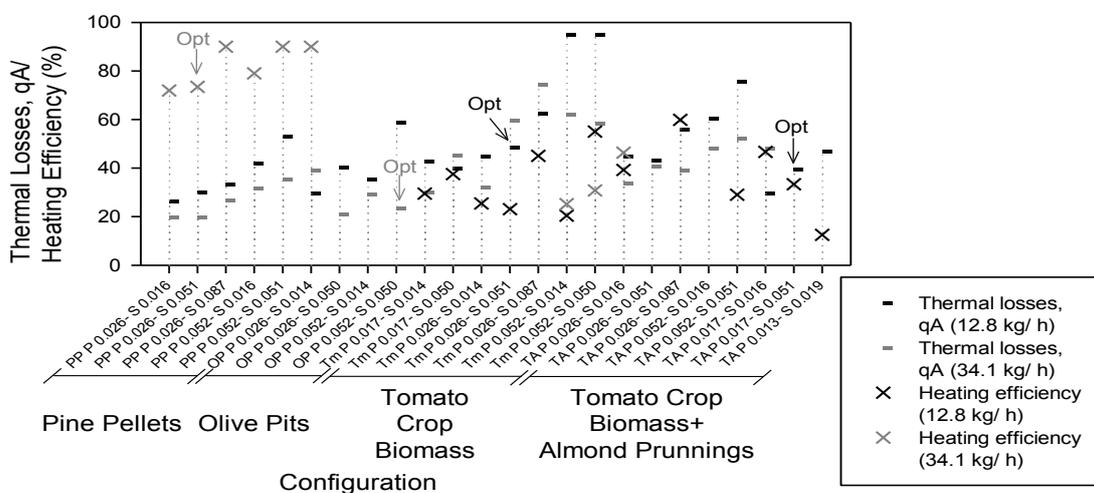


Figura 20. Eficiencia térmica y teórica de transmisión de calor observadas para cada tipo de biomasa y configuración de tasa de suministro de combustible, y aire primario y secundario suministrados (Opt: configuraciones identificadas como óptimas).

Comparando con datos recogidos en bibliografía anterior respecto a la eficiencia de la calefacción, los valores observados en estos experimentos para determinadas configuraciones usando pellets de pino estuvieron en un rango similar a los valores recogidos en estas publicaciones [46]. Por otra parte, el valor para la pulpa de tomate (los restos sobrantes tras haber extraído el zumo de tomate) fue de un 91.5% (según lo discutido previamente en la sección de introducción) [47]. Este fue mayor que lo observado en el trabajo llevado a cabo para la presente tesis. No obstante, en el caso del dato recogido en bibliografía, para ese trabajo se empleó una caldera con mayor potencia.

4.2.3. Otros gases presentes en los gases de combustión.

Relativo a la generación de CO, los niveles correspondientes se han recogido en la *Figura 21*. el CO sobrepasó el máximo que es capaz de medir el analizador empleado (2.5 g/ Nm^3 ; Nm^3 : m^3 en condiciones normales) en el caso de algunas configuraciones. Analizando la influencia de los factores estudiados, concentraciones demasiado bajas de O_2 dentro de la cámara de combustión acaban provocando una generación CO. Es posible observar incrementos en las concentraciones de este compuesto para el caso de aquellas configuraciones menos favorables. También se ha argumentado en otros trabajos disponibles en bibliografía que esta falta de suministro de O_2 es un indicativo del empleo de una combinación (suministro de aire/ combustible) poco apropiada [46]. En bibliografía relacionada se expuso que se obtuvieron valores en un rango comprendido entre 0,6- 0,8; 36,8; y 1.1 g/ Nm^3 para pellets de pino [20], [47], [48], hueso de aceituna [49] y pulpa de tomate (restos después de una extracción de zumo) [47], respectivamente. Otro trabajo recogió niveles más altos para pellets de pino, aunque este fue bastante discrepante respecto al resto de valores encontrados en bibliografía (hasta 923 g/ Nm^3) [50]. Estos valores encontrados en bibliografía estuvieron en un rango similar, aunque fueron ligeramente menores los observados a partir de la experimentación llevada a cabo para esta tesis, salvando la excepción comentada. Respecto a los huesos de aceituna, los valores mínimos observados en la experimentación llevada a cabo para este trabajo fueron sensiblemente menores que los encontrados en otros trabajos publicados en bibliografía. Así mismo, en el caso de la pulpa de tomate, los valores observados en la experimentación de esta tesis fueron notablemente mayores. A pesar de esto, debería tenerse en cuenta que este estudio se llevó a cabo con una caldera con una entrega térmica mayor y la biomasa obtenida de plantas de tomate contenía diversas partes (tallos, hojas, etc.).

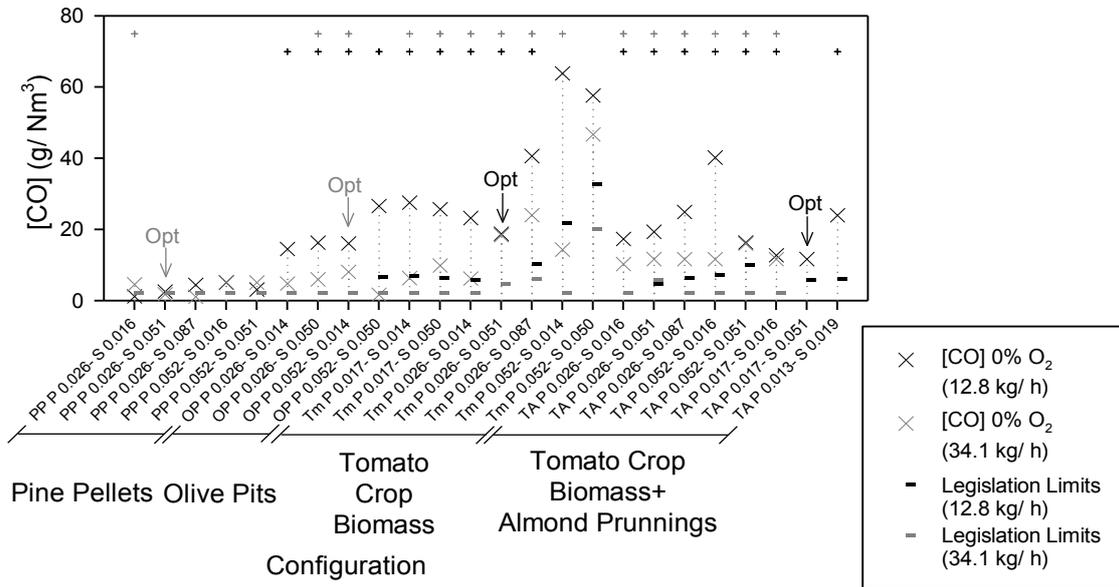


Figura 21. $[CO]$ 0% O_2 observados para cada biomasa y configuración de tasa de suministro de combustible, y aire primario y secundario suministrados (Opt: configuraciones identificadas como óptimas).

Las concentraciones observadas de NO_x quedan reflejadas en la Figura 22. En varias de las configuraciones se sobrepasó el límite que es capaz de registrar el equipo de medición (de forma análoga a lo observado para el CO_2). Estas configuraciones también se han registrado en esta figura. Trabajos disponibles en bibliografía han informado de valores en torno a 27- 989, 411-1798, 2333, y 92-1662 g/Nm^3 , respectivamente para pellets de pino [20], [47], [48], [50], hueso de aceituna [49] y pulpa de tomate (restos después de una extracción de zumo) [47] y otros tipos de biomasa empleados [46], [51].

Los valores observados de la experimentación de esta tesis fueron menores en el caso de los pellets de pino. No obstante, dependiendo de la configuración empleada si llegaron a sobrepasarlos en algunos casos. Por otra parte, el trabajo mencionado en el que se estudiaba pulpa de tomate informó de un valor notablemente mayor que los correspondiente a esta tesis. Respecto a esta observación, se debe tener en cuenta la misma consideración explicada en la sección anterior (4.2.2). En estos trabajos disponibles en bibliografía, los niveles observados fueron superiores a los reportado para otros tipos de biomasa.

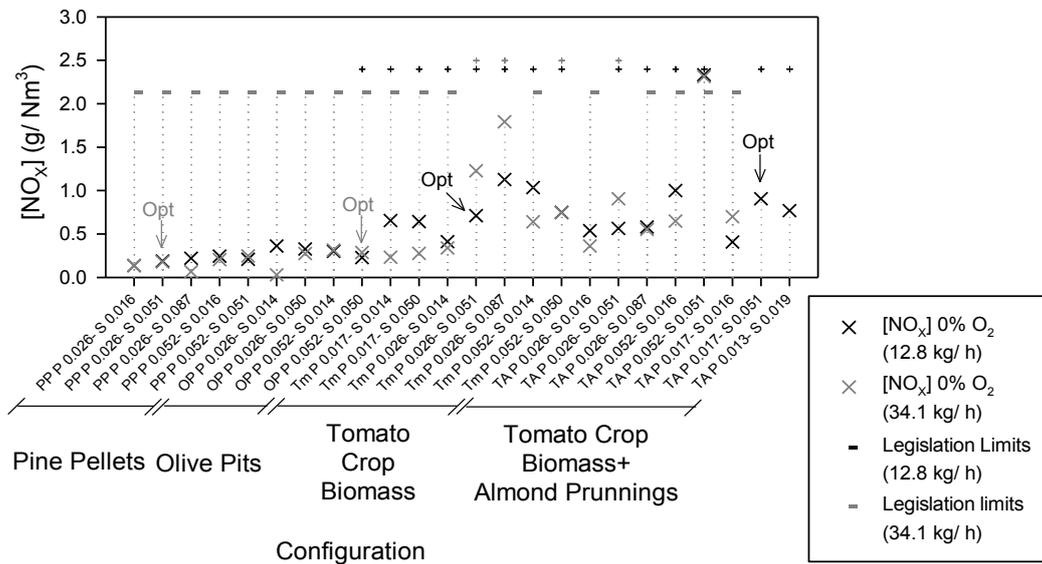


Figura 22. $[NO_x]$ 0% O₂ para cada biomasa y configuración de tasa de suministro de combustible, y aire primario y secundario suministrados (Opt: configuraciones identificadas como óptimas).

Respecto a las emisiones de SO₂ registradas en los gases de combustión, los datos correspondientes se han recogido en *Figura 23*. Revisando otros trabajos publicados, los niveles recogidos en la misma están en un rango de entre 14- 75 [46], [49], [52], [53]; 908 [54] y 0- 3504 mg/ Nm³ [48], [55], [56]. Los valores más bajos observados, teniendo como referencia los recogidos en la bibliografía citada, fueron los obtenidos en el caso de los pellets de pino. Así mismo, el valor informado sobre pulpa de tomate también fue menor que el correspondiente al de la experimentación de esta tesis.

Sin embargo, los valores más bajos observados con la biomasa de RVI de tomate más poda de almendro correspondieron los datos bibliográficos. Comparando con otros tipos de biomasa, los valores observados en ese trabajo estuvieron dentro del rango de los valores recogidos en bibliografía, a excepción de aquellas configuraciones menos favorable.

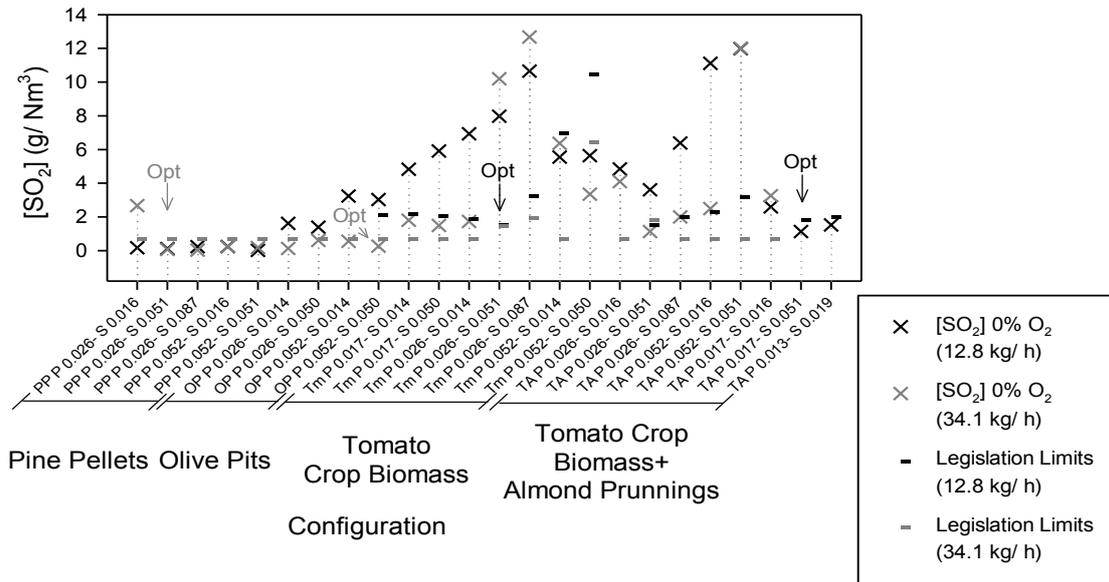


Figura 23. [SO₂] 0% O₂ para cada biomasa y configuración de tasa de suministro de combustible, y aire primario y secundario suministrados

En el segundo de los artículos que soportan esta tesis [22] se hace una recopilación de varios artículos en los que se estudia la combustión directa de distintos tipos de biomasa [20], [46], [47], [49]–[52], [57], [58]. Esta, así mismo, incluye un artículo en el que se reportan datos relativos a la combustión de restos de pulpa de tomate [47]. No se trata de la parte vegetal de este tipo de biomasa, pero sirve como referencia. Estudios previos concluyeron que la principal contribución a las emisiones de NO_x y SO₂ son el nitrógeno y azufre presentes en la biomasa empleada como combustible. Así pues, sería de esperar que estas emisiones varíen con la tasa de suministro de combustible. No obstante, los datos experimentales obtenidos mostraron como esta relación no es proporcional. Al mismo tiempo, alguno de estos gases tóxicos podrían fijarse compuestos sólidos derivados de esta combustión, por ejemplo las cenizas [59]–[61]. Al mismo tiempo, los otros dos parámetros estudiados (aportes primarios y secundarios de aire) pueden tener cierta influencia sobre el equilibrio de reacción dado para estas reacciones. La combinación de estos dos últimos con la tasa de suministro de combustible, también ha de tener influencia.

Por otra parte, el calcio y magnesio fueron los elementos más presentes en la biomasa de RVI al mezclar con poda de almendro. Ha sido demostrado que estos tienen capacidad de fijar estas emisiones formando otros compuestos a partir de la reacción entre estos mismo y los gases tóxicos [46], [62]. Se ha informado de la existencia de aditivos, los cuales contienen estos

elementos, en otro trabajo disponible en bibliografía, concluyendo que estos permiten disminuir las emisiones de gases tóxicos [63].

Se podrían abordar alternativas adicionales para tratar de mejorar la eficiencia de combustión y reducir las emisiones de gases perjudiciales. De forma paralela a los ámbitos de mejora abarcados en esta tesis, estas alternativas podrían agruparse en dos modos: optimizar la reacción de combustión y adecuar las características de la biomasa aún más. Respecto al primero, procurar establecer ciertos patrones de flujo de gas determinados en el interior de la cámara de combustión puede mejorar la eficiencia de la combustión y la reducción de emisiones de compuestos no deseados (los ya mencionados CO, NO_x, SO₂) [64]. En lo relativo al segundo ámbito, se puede tratar de abordar medidas enfocadas a disminuir el contenido en cenizas y elementos como el Cl y S. Relacionado con esto, hay estudios que han relacionado factores como la tasa de riego y la presencia de sales minerales en el sustrato de las plantas, por tanto, una alternativa podría ser tratar de variar estos factores durante los últimos días antes de cortar las plantas (en el orden de unos cuantos días a semanas). En este rango de tiempo, al tratarse de la última parte de la cosecha, estos factores ya no serían tan importantes. Por otra parte, puede ser un tiempo lo suficientemente extenso como para que las plantas puedan manifestar algún cambio en su composición. Incluso, dependiendo de la planificación del agricultor en concreto puede haber tiempo entre el final de un cultivo y el siguiente como para tratar de mantener las plantas durante este tiempo bajo estas condiciones (entre las mejoras propuestas, ya se ha planteado un secado natural en el mismo invernadero donde las plantas fueron cultivadas durante un tiempo que puede oscilar entre 1- 2 semanas).

Así mismo, relacionados con estas consideraciones, algunos trabajos publicados en bibliografía informaron de que las composiciones estructurales y elementales de cultivos energéticos fluctuaron dependiendo de la estación y la localización [65], [66]. Por otra parte, otro estudio mostró como la salinidad del sustrato de cultivo empleado para los cultivos puede influir sobre el transporte de nitratos y fosfatos dentro de las plantas (lo que implica a su vez una influencia sobre su composición química) [67]. Así mismo, pretratamientos ya comentados en este documento como enjuague y lavado con agua pueden llevar a obtener una biomasa con un contenido menor en cenizas. Esto se ha intentado por ejemplo con biomasa proveniente de plantas de pimiento [68]. La misma técnica fue ensayada con biomasa de RVI de tomate, llevando una reducción del 12% en el contenido en cenizas [54].

4.2.4. Reducción posterior de CO, NO_x, SO₂ y emisión de partículas.

Se consiguieron unas reducciones del 72,09; 99,99; y 99,99% para CO, NO_x y SO₂ respectivamente. Este filtrado fue conseguido gracias al sistema de captura empleado donde se hace circular la corriente de gases de combustión a través de un lecho carbón activo a una presión mayor que la atmosférica. Estos valores se estimaron teniendo en cuenta las concentraciones presentes en la corriente de gas inyectados a la salida del tanque (gases inyectados en el invernadero) y la corriente proveniente de la caldera (gases de combustión comprimidos dentro del tanque). Las reducciones mencionadas están referidas a la configuración óptima encontrada para la caldera (combinaciones de aire primario, secundario y entrada de combustible). Respecto a los valores de 99.99%, la reducción medida experimentalmente fue de un 100%. Puesto que en la práctica lograr una separación de un 100% no es posible (este es un proceso de separación), estos valores se han corregido.

Finalmente, los datos de emisiones de cada biomasa estuvieron en un rango entre 3-5, 3-6 y 4-8 en la escala Bacharach respectivamente para pellets de pino, huesos de aceituna, residuos de platas de toma y la mezcla de estos últimos como poda de almendro.

4.2.5. Análisis Estadístico

Los p-valores calculados para las interacciones entre los factores estudiados están representados en la *Figura 24*. La influencia de estos factores y sus interacciones presentaron un valor mayor de 0,05. Así pues, pueden considerarse como estadísticamente significativa a un 95.0% de nivel de confianza. Este valor límite de 0,05 también ha sido destacado esta *Figura 24*. Respecto a las iteraciones de 2º orden, las que presentaron cierta relevancia estadística fueron aquellas dadas entre el aporte primario de aire y el tipo de combustible. Este valor encontrado está bastante en concordancia con el funcionamiento del equipo de combustión estudiado. En este, la entrada de aire primario tiene lugar tangencialmente a la parrilla del hogar de combustión. Por otra parte, la densidad la pila de combustible es con probabilidad diferente para cada tipo de biomasa. Este combustible emerge desde el foso de la caldera. Este factor podría ser más importante cuando el combustible se acumula en el foso del hogar de combustión, debido a que la velocidad de aporte de combustible podría ser mayor a la de propagación de la combustión. Así mismo, ambos aportes (aire y combustible) se mezclan dentro del hogar de combustión. Con lo que es razonable que haya una interacción adicional (independientemente de la considerada por la acumulación de combustible en el foso de la caldera).

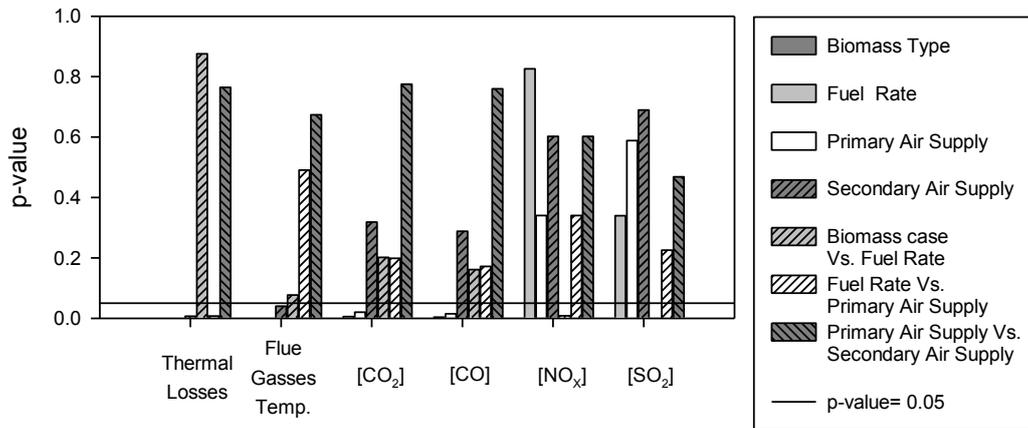


Figura 24. P- valor estimado del análisis de varianza llevado a cabo para el estudio de la influencia de los cuatro factores (biomasa, tasa de aporte de combustible, de aire primario y secundario; y las interacciones correspondientes con cada factor). Nivel de confianza- 95%.

Con los datos representados, se puede argumentar que las variables y parámetros estudiados tienen relaciones interdependientes. Esta observación se ve corroborada por los datos obtenidos a partir de este análisis estadístico. El mismo ha mostrado como varias interacciones entre dos factores tenían significancia estadística importante.

4.3. Ensayo del sistema a escala piloto para calefacción y captura/ aporte de CO₂ en invernaderos.

4.3.1. Variables relacionadas con la temperatura.

En la *Figura 25* se detallan datos correspondientes a los máximos gradientes de temperatura establecidos entre el interior y el exterior del invernadero. Estos gradientes corresponden con momentos en los que la calefacción estaba bajo demanda. Así mismo, la hora del día en la que estos valores fueron observados también se ha registrado y se han representado en esta figura los valores correspondientes a las medias semanales y mensuales de cada una de estas variables.

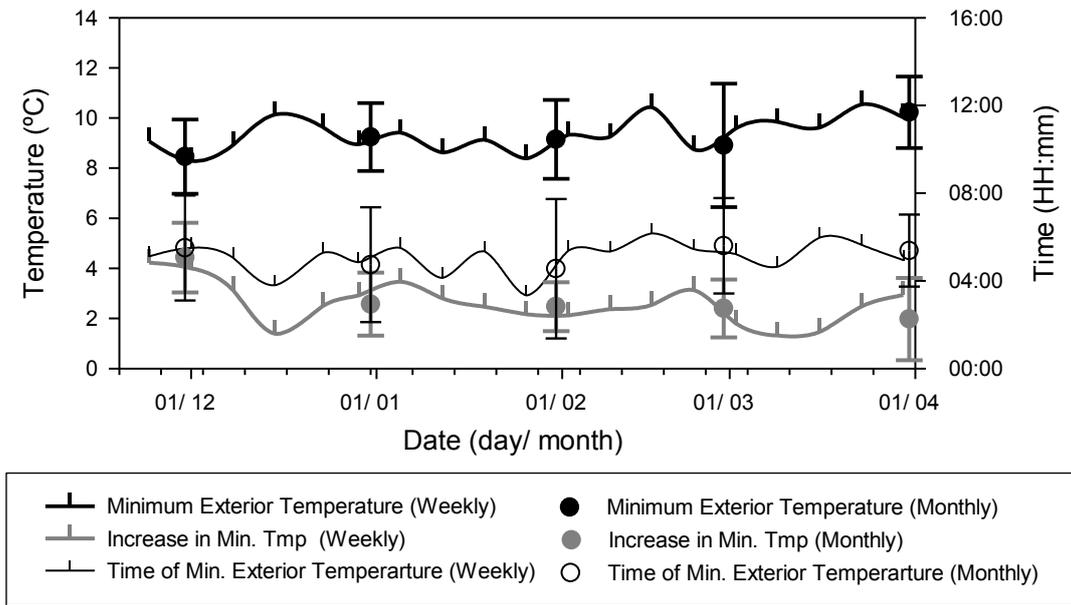


Figura 25. Saltos térmicos máximos observados entre el interior y el exterior del invernadero, y la hora correspondiente a la que fueron observados. Se han estimado los valores medios a partir de los obtenidos diariamente para cada semana y mes.

4.3.2. Funcionamiento del sistema de calefacción, captura y aporte de CO₂

La Figura 26 muestra los datos de consumo de combustible y el tiempo durante el cual la calefacción estuvo bajo demanda (dos variables relacionadas). La media global de consumo fue de $36,7 \pm 16,3$ kg/h, estudiando los valores correspondientes a las medias mensuales se observa que estaban en rango de entre $32,1 \pm 18,1$ (diciembre) y $43,3 \pm 22,6$ kg/h (marzo). Las diferencias en lo relativo al consumo de los distintos meses no fue demasiado evidente. Así mismo, la desviación estándar fue tan importante como la diferencia vista entre las medias mensuales registradas. Revisando los datos relativos a los tiempos durante los cuales la calefacción estuvo bajo demanda, la media global fue de $1,17 \pm 1,16$ h, mientras que las medias mensuales estuvieron comprendidas en un rango entre $1,78 \pm 1,18$ °C (diciembre) y $1,09 \pm 0,73$ °C (noviembre). En esta Figura 26 también se reflejan los datos correspondientes a los tiempos de captura de CO₂. El hecho de que haya calefacción bajo demanda no implica que la caldera esté encendida. Este dato es útil para comparar durante cuánto tiempo se hizo captura mientras la calefacción estaba bajo demanda. El desempeño de esta operación se analizará con mayor detalle en la sección siguiente.

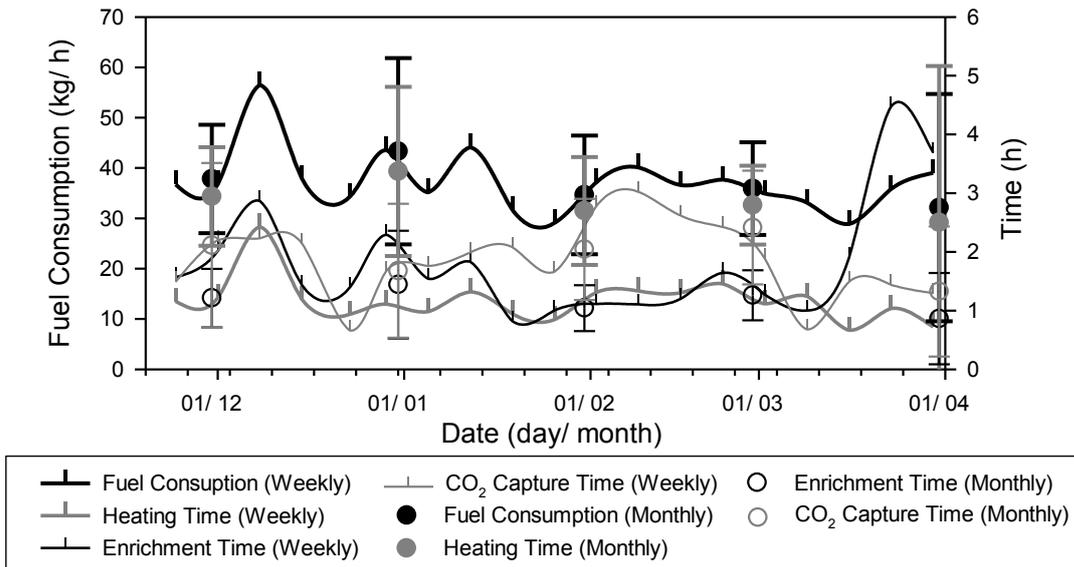


Figura 26. 1) Consumo de combustible. Tiempo durante el cual 2) la calefacción estuvo en demanda, 3) el enriquecimiento pudo llevarse a cabo, y 4) el CO₂ se capturó desde los gases de combustión generados cada día y la media correspondiente diaria.

4.3.3. Captura e inyección de CO₂

Respecto a las operaciones de captura e inyección de CO₂, los valores de tiempo diario durante los cuales se pudo hacer cada una (ya mencionados en el apartado anterior) se han comparado con los valores máximos de concentración alcanzados en el invernadero, así como la concentración promedio durante aquellos momentos en los que se hizo inyección. Estos datos se muestran en la Figura 27. En lo relativo a los tiempos de captura y enriquecimiento, estos estuvieron relacionados con lo de demanda de calefacción. No obstante, las condiciones climáticas también tuvieron cierta importancia. Por otra parte, la tendencia usual fue la de la demanda de calefacción fue algo superior a la de enriquecimiento.

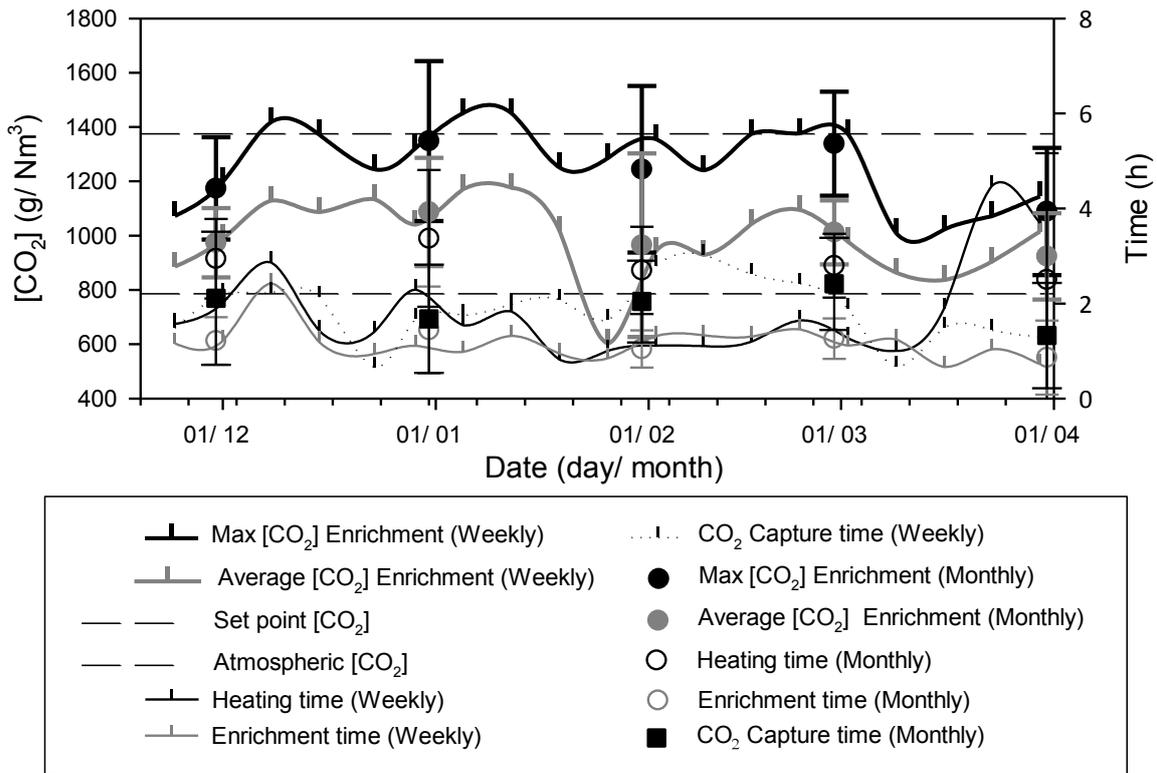


Figura 27. 1) Niveles máximos de Concentración de CO_2 alcanzados diarios. 2) Media de la concentración de CO_2 en momentos en los que se llevaba a cabo enriquecimiento. Tiempos diarios durante los cuales estuvieron bajo demanda la 3) calefacción y 4) el enriquecimiento. 5) Tiempos diarios durante los cuales se pudo hacer captura de CO_2 desde los gases de combustión.

Revisando los datos relacionados con el funcionamiento del sistema de captura de CO_2 , el lecho de carbón activo llegó a saturarse en un 80% de su capacidad de retención tras llevar a cabo este proceso de captura durante 2,1 h. Así mismo, el tiempo necesario para llegar a saturarse por completo fue de unas 6h. Este 80% de capacidad utilizada se considera como un punto óptimo de operación considerando la energía utilizada por masa de CO_2 retenido. El consumo de energía en momentos en los que se lleva a cabo captura de CO_2 fue de unos 1,37kW. Teniendo en cuenta estos valores y suponiendo un precio para la energía de 0,252 €/kWh (dato medio considerado)), el coste asociado a la captura de CO_2 fue de 0,268 €/ kg CO_2 . No obstante, este valor depende considerablemente del grado de saturación del lecho de carbón activo. Por ejemplo, estos costes oscilaron entre 0.229 and 0.127 €/ kg CO_2 ya que dependen en gran medida del grado de saturación del lecho de carbón activo. A modo de ejemplo, estos dos valores corresponden con un 80 y 50% de saturación respectivamente.

Adicionalmente, fue posible integrar el control de otros factores climáticos tales como la ventilación, calefacción y captura de CO_2 . Cumpliéndose, de este modo, con las especificaciones

iniciales para este sistema. No obstante, la capacidad de retención de CO₂ de este sistema sería bastante aceptable en el caso de que pudiese llevarse a cabo inyección durante más tiempo. Con esta meta debería de implementarse alguna medida para poder mantener la ventilación cerrada durante más tiempo. Así mismo, cierta relación puede ser identificada entre el tiempo total durante el cual se pudo llevar a cabo inyección y los niveles de CO₂ alcanzados dentro del invernadero (relación creciente). Del mismo modo, se pudo mantener la consigna de CO₂ durante cierto tiempo de forma usual a lo largo de la duración del ensayo.

La media de la concentración máxima alcanzada cada día fue de 1851,0± 262,8 mg/ Nm³, respecto a las medias mensuales, estos valores estuvieron comprendidos entre 1089,1± 188,7 (marzo) y 1348,3± 240,2 (diciembre) mg/ Nm³. Todos los datos relacionados con esta operación se han recogido en la *Figura 27*. Los meses en los que se alcanzaron mayores niveles de concentración de CO₂ corresponden a su vez con aquellos en los que la media ponderada fue mayor. Esta observación, es de esperar considerando que ambas variables están relacionadas con las cantidades de CO₂ suministradas.

4.3.4. Análisis adicional horario de las distintas operaciones llevadas a cabo

La hora media del día en la que se realizó la inyección (primera y última de cada ensayo), las máximas concentraciones alcanzadas cada día y las medias mensuales fueron registradas, que se muestran en la *Figura 28*. Los valores observados dependieron fundamentalmente de dos factores: disponibilidad de luz y la temperatura ambiente. El primero cambia a lo largo de la estación del año, mientras que el segundo lo hace con las condiciones climáticas. Cuanto menor era la temperatura exterior, mayor era el tiempo durante el cual se podía llevar a cabo inyección (se podía mantener las ventanas del invernadero cerradas durante más tiempo antes de llegar a poder abrir la ventilación).

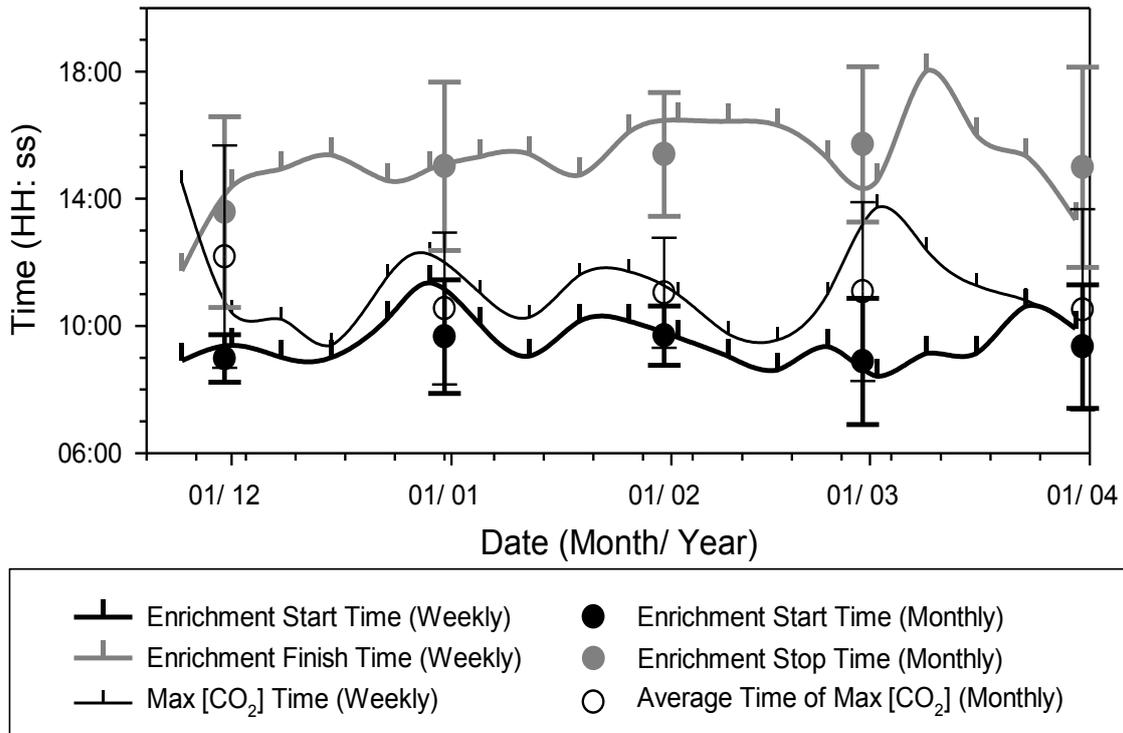


Figura 28. Horas entre las que se llevó a cabo inyección 1) por primera y 2) última vez cada día; 3) hora de máxima concentración de CO₂ promedio alcanzada mientras se hacía enriquecimiento.

Una consideración relativamente importante es que, dependiendo de las condiciones climáticas, algunos días se pudo llevar a cabo enriquecimiento solo durante la mañana. Este hecho redujo considerablemente la media de la hora en la cual se dejó de hacer enriquecimiento. Sin tener en cuenta esto, se puede interpretar que esta hora condiciona el valor medio observado (algo después del mediodía). Sin embargo, la situación real era que unos días se hacía inyección por última vez al final de la mañana y otros al final de la tarde. Esto se refleja en la desviación estándar obtenida.

Adicionalmente, se ha estudiado a qué horas del día se fueron requiriendo cada una de ellas. Los tramos horarios fueron: cada dos horas entre las 8:00 y las 20:00 (tramo diurno dónde se concentra la inyección de CO₂), de 0:00- 8:00 (tramo nocturno dónde se suele concentrar la demanda por calefacción) y de 20:00 a 0:00 (suele haber algo de demanda para calefacción principalmente aquellos días con temperaturas exteriores más bajas). Entre las operaciones están, 1) durante cuánto tiempo se lleva cabo enriquecimiento de CO₂ en tramo horario correspondiente, *Figura 29*; y 2) el mismo análisis pero para la calefacción, *Figura 30*; y 3) media de la velocidad del viento en exterior en estos mismo tramos horarios *Figura 31*. Este último dato es útil a la hora de tener una visión de la relación dada entre el desempeño de la calefacción y las renovaciones de aire. Así mismo, la influencia dada entre las condiciones climáticas y los

distintos parámetros controlados (temperatura dentro y concentración de CO₂ del invernadero) pueden ser mejor estudiados con los datos recogidos en estas figuras. Por otra parte, se puede observar también como estas condiciones fueron evolucionando a lo largo del tiempo durante el cual se mantuvo el ensayo, debido a esta, los tiempos durante los cuales se pudieron ir haciendo captura y enriquecimientos de CO₂ fueron cambiando.

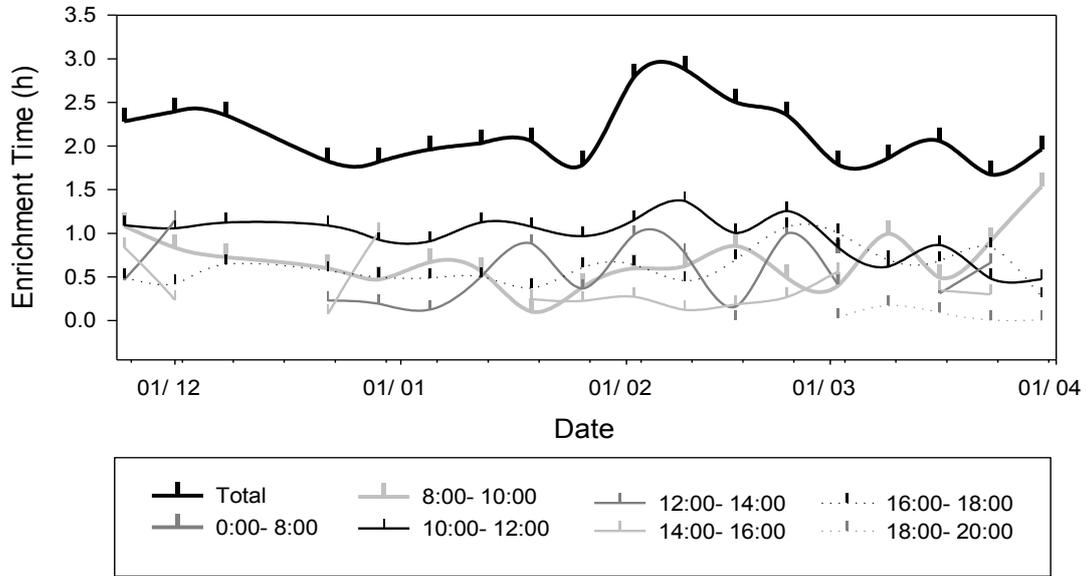


Figura 29. Tiempo diario durante el cual se llevó a cabo inyección.

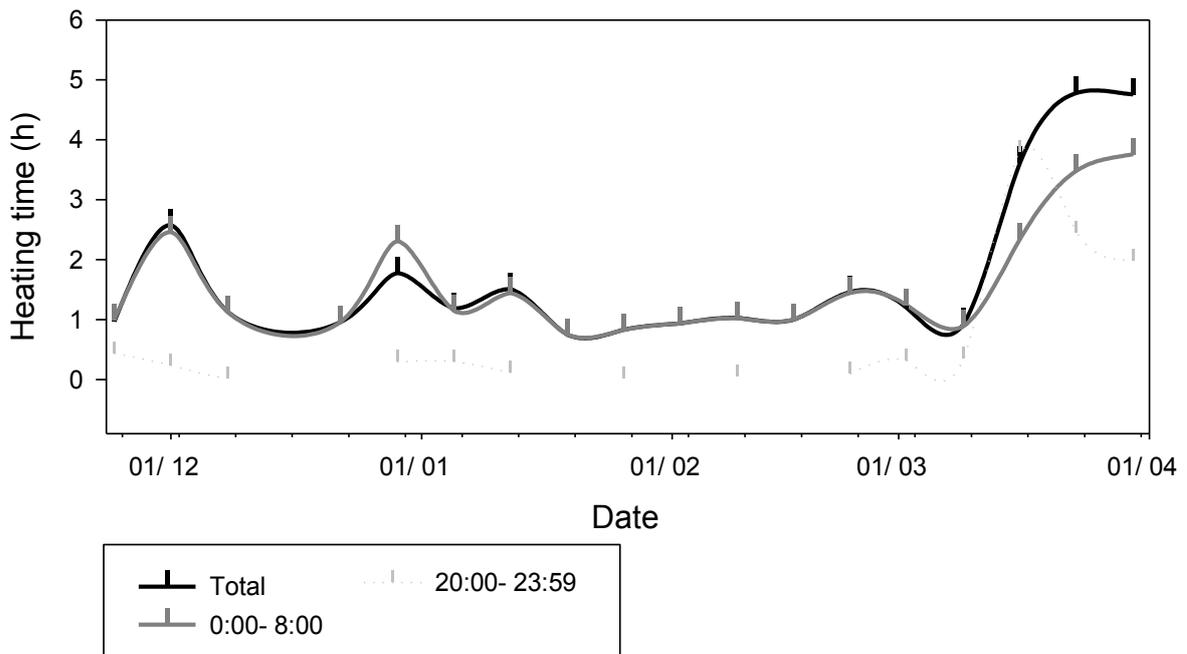


Figura 30. Tiempo diario durante el cual la calefacción estuvo bajo demanda.

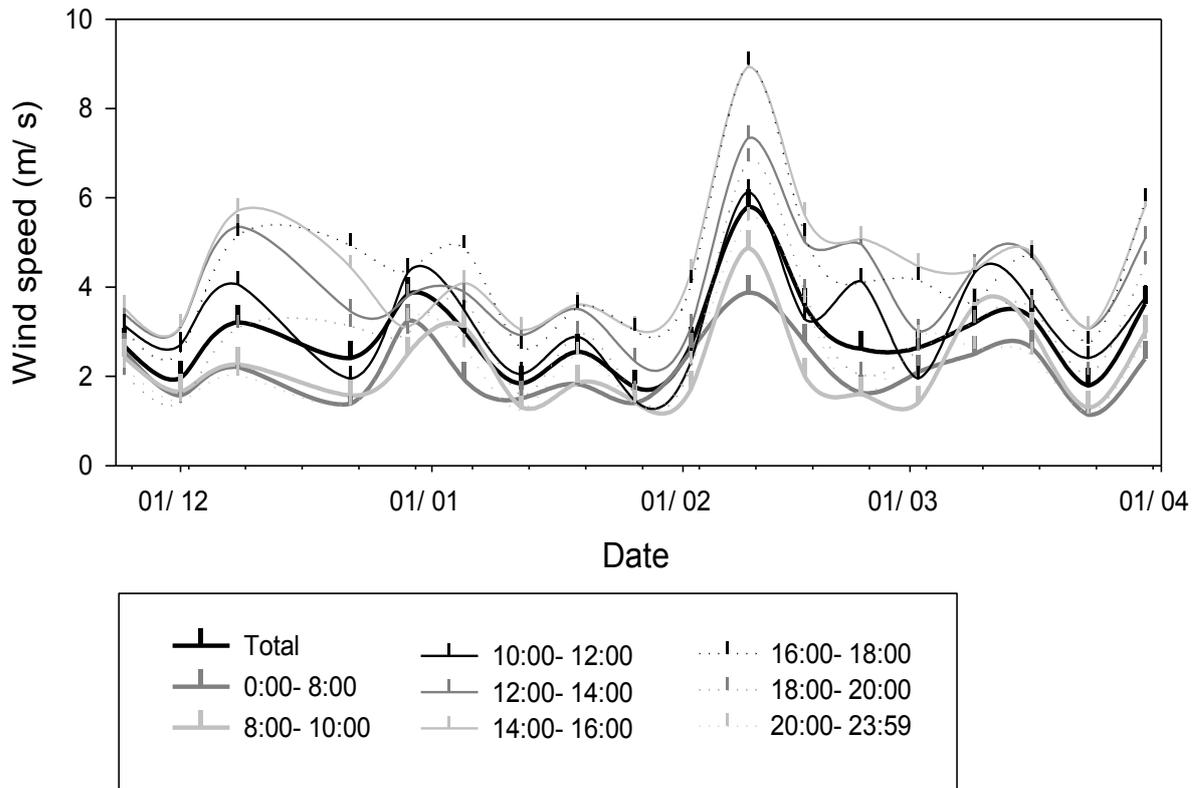


Figura 31. Media diaria de la velocidad del viento tratada por tramos horarios.

Las cantidades de calor y CO_2 aportadas dentro del invernadero fueron cuantificadas para cada día, planteándose una serie balances de masa y energía para tal fin [22]. Mediante esta cuantificación se pudo tener mayor detalle acerca de cómo se llevaron a cabo estas operaciones. Así mismo fue posible llevar a cabo una estimación del rendimiento calorífico de la calefacción. Estos balances se aplicaron para el conjunto de todo el tiempo durante el cual se mantuvo este ensayo (este fue del orden de meses en lugar del orden de min, el cual se aplicó en el apartado anterior). Estos balances mencionados se exponen desde la *Ecuación 6* hasta la *Ecuación 13*. Los flujos de calor cuantificados fueron: 1) transferencia de calor desde el circuito de agua, 2) pérdidas relacionadas con el intercambio de aire entre el invernadero y el exterior y 3) acumulación de calor. Se consideró que estos flujos de calor mencionados fueron los que tenían una importancia significativa en el balance global. Los valores correspondientes han sido representados en la *Figura 32*.

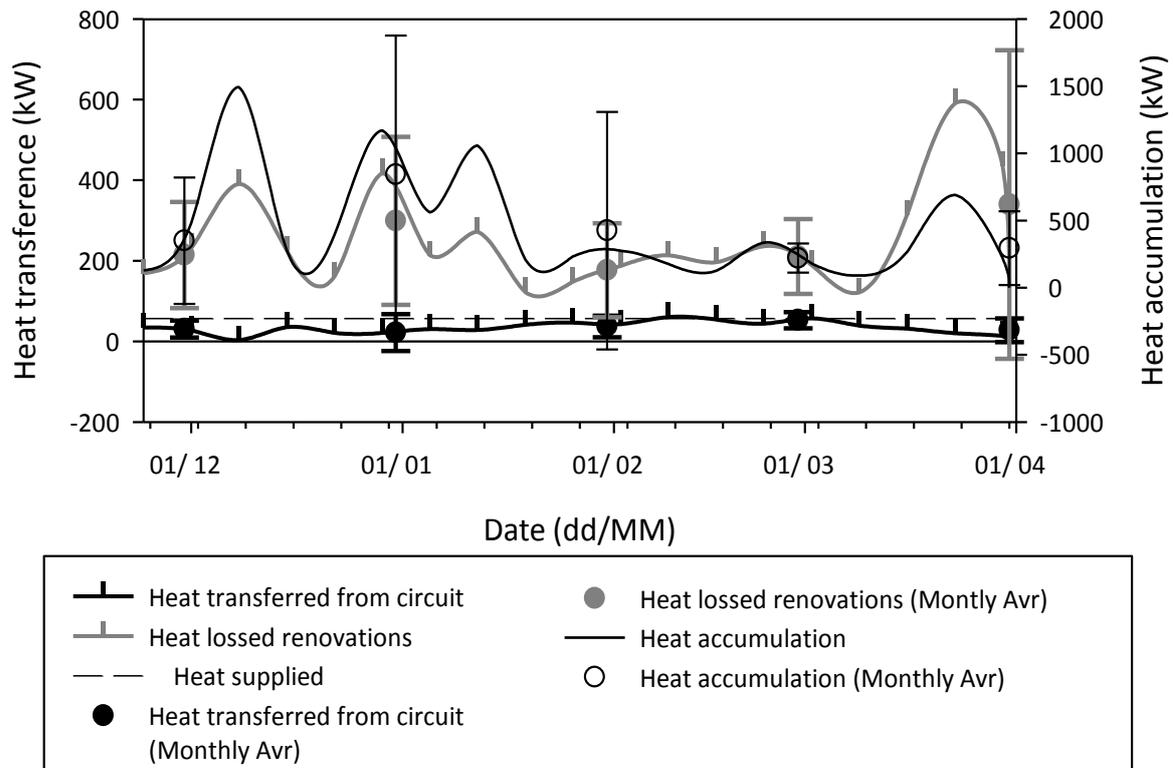


Figura 32. Flujos involucrados en el balance de calor global estimado a lo largo de todo el ensayo (Calor... 1- cedido desde el circuito. 2-

Analizando el balance de energía en mayor detalle, el término de acumulación (*Ecuación 11*) será positivo siempre que la temperatura dentro del invernadero esté aumentando (se está dando un incremento entre dos momentos distintos considerados). Al mismo tiempo, la energía calorífica que la caldera es capaz de suministrar se conoce. Si bien el fabricante suministra un dato de potencia nominal (160,42 kW) que es un valor teórico que solo es posible alcanzar bajo una serie de condiciones determinadas. La energía realmente suministrada en un periodo de tiempo determinado se puede estimar a partir de la velocidad de suministro y el poder calorífico del combustible. El calor transferido, el suministro de combustible, y poder calorífico de combustión fueron respectivamente: 56,68 kW, 12,8 kg/ h y 15,88 MJ/ kg. Al mismo tiempo, la media observada para los flujos de calor fueron respectivamente $35,0 \pm 33,2$; $262,4 \pm 235,0$; $458,2 \pm 603,9$ kW para el calor cedido desde el circuito, las pérdidas ocasionadas por el intercambio de aire entre el interior y exterior del invernadero; y la acumulación. Revisando las medias mensuales, los valores correspondientes estuvieron en el rango de $21,84 \pm 4,62$ (diciembre) y $52,56 \pm 19,84$ (febrero); $112,34 \pm 143,13$ (noviembre) y $339,6 \pm 382,86$ (marzo); y $220,4 \pm 151,9$ (febrero) y $843,2 \pm 846,0$ (diciembre) respectivamente en el mismo orden citado anteriormente.

$$q' = \frac{V_{crc} c_{p\ H2O} (T_{H2O_int} - T_{H2O_fnl})}{\Delta t}$$

Ecuación 6. Transmisión de calor desde el circuito de agua durante el periodo considerado.

Siendo: T_{int} es la temperatura inicial del agua, T_{fnl} es la temperatura final del agua, V_{crc} : es el volumen del circuito de agua, $c_{p\ H2O}$ es la capacidad calorífica del agua, Δt es el tiempo transcurrido para el balance de calor considerado y q' es el calor considerado.

$$q' = \dot{m}_{air} c_{p\ air} (T_{inv} - T_{amb})$$

Ecuación 7. Calor intercambiado debido a las renovaciones de aire

Siendo: T_{inv} es la temperatura del ambiente del invernadero, T_{amb} es la Temperatura del ambiente (exterior del invernadero), \dot{m} es la velocidad másica de intercambio de aire (masa/ tiempo) y $c_{p\ air}$ es la capacidad calorífica del aire.

$$\dot{m}_{air} = Renov \cdot \rho_{air}$$

Ecuación 8. Renovaciones de aire expresadas en forma de velocidad másica (masa/ tiempo).

\dot{m}_{air} : velocidad másica de aire (masa/ tiempo). *Renov*: intercambio de renovaciones de aire entre el invernadero y el medioambiente (volumen/ tiempo- estimadas mediante la ecuación 5). ρ_{air} : densidad del aire (estimada mediante la *Ecuación 9*).

$$\rho_{air} = \frac{P}{R_{spc} T_{inv}}$$

Ecuación 9. Densidad del aire como función de la presión y la temperatura.

P : Presión (debería ser la atmosférica tanto para la captura como la descarga- $101,125 \cdot 10^3$ kPa). R_{spc} : constante específica para el gas considerado, en este caso el aire: 287,058 J/ (Kg· K). ρ_{air} : densidad del aire.

$$Renov = (0.29 v_{vnt} + 0.76) V_{inv} R_{rnv}$$

Ecuación 10. Estimación del caudal de aire intercambiado desde las renovaciones dadas entre el invernadero y el exterior.

v_{vnt} : velocidad del viento. V_{inv} : volumen del invernadero. R_{rnv} : constante (0.907). v_{vnt} y v_{inv} deben ser expresadas en m/ s and m^3 respectivamente.

$$q' = V_{inv} c_{p \text{ air}} \frac{(T_{inv_fnl} - T_{inv_int})}{\Delta t}$$

Ecuación 11. Calor acumulado durante el tiempo considerado.

Δt : tiempo transcurrido para los balances de materia considerados.

$$\dot{m}_{CO_2_iny} = \frac{[CO_2]_{tnq} q_{CO_2} (P + P_{tnq}) M.M.CO_2}{R T_{inv}}$$

Ecuación 12. Velocidad másica de CO₂ inyectada en el invernadero.

$[CO_2]_{tnq}$: Concentración de CO₂ del gas expedido desde el tanque. q_{CO_2} : caudal de la corriente provenientes desde el tanque. P : Presión fuera del tanque (normalmente la atmosférica). P_{tnq} : Presión del tanque. $M.M.CO_2$: masa molecular del CO₂. R : Constante de gases (moles). T_{inv} : Temperatura del invernadero. $\dot{m}_{CO_2_iny}$: Velocidad másica de CO₂ inyectada.

$$\dot{m}_{CO_2_exc} = \frac{[[CO_2]_{inv} - [CO_2]_{amb}] Renov P M.M.CO_2}{R T_{inv}}$$

Ecuación 13. Cantidad de CO₂ intercambiada con las renovaciones de aire.

$[CO_2]_{inv}$: Concentración de CO₂ dentro del invernadero. $[CO_2]_{amb}$: concentración de CO₂ (fuera del invernadero). $\dot{m}_{CO_2_exc}$: velocidad másica del CO₂ inyectado (masa CO₂/ tiempo). Las renovaciones se estimaron, tal cual se indicó en la ecuación 5.

$$\dot{m}_{cpt} = \frac{[[CO_2]_{tnq} - [CO_2]_{g \text{ cmb}}] q (P + P_{tnq}) M.M.CO_2}{R T_{inv}}$$

Ecuación 14. CO₂ capturado de la combustión de biomasa.

Las pérdidas térmicas y la acumulación estimadas fueron significativamente mayores que la transferencia desde el circuito. Esta última se estimó a partir del calor sensible, el cual a su vez se estimó a partir de la diferencia de temperatura del circuito de agua entre dos instantes considerados (disminución, puesto que se está cediendo calor) y caudal de flujo dentro de este circuito. Estos valores deberían ser cercanos a la acumulación. Según lo obtenido con las estimaciones llevadas a cabo, la transferencia desde el circuito de agua estuvo en un orden de magnitud similar. No obstante, fue algo menor (35,0± 33,2 frente a 56,68 kW). Con esta estimación se podría calcular, a su vez, un valor de eficiencia de la transferencia de calor (transferencia desde el circuito de agua comparada con la aportada teóricamente a través de la

combustión de biomasa). Este valor sería de un $61,72 \pm 53,58\%$. Por otra parte, se observó una desviación estándar bastante alta. Este hecho podría explicar, en parte, la diferencia vista entre las cantidades de energía aportada y la entrega. El efecto del ruido en estos valores de temperatura debe de tener cierto impacto. Por otra parte, a su vez, quizás se podrían hacer estimaciones más precisas teniendo en cuenta intervalos de tiempo más extensos a la hora de analizar los incrementos de temperatura correspondiente. Al mismo tiempo, la transmisión de calor por convección entre el sustrato del invernadero y el ambiente de este puede ser más importante de lo considerado inicialmente. Respecto a esta última consideración, el sustrato del invernadero puede absorber o ceder calor térmico dependiendo del gradiente térmico existente entre este y el ambiente dentro del invernadero.

Respecto al enriquecimiento y captura de CO_2 , las cantidades de CO_2 suministradas y capturadas fueron cuantificadas a lo largo de toda la duración del ensayo. Así mismo, debe haber cierta pérdida de CO_2 debido a las renovaciones de aire. La cantidad correspondiente fue también cuantificada durante toda la duración de este ensayo. Estos tres flujos han sido representados en la *Figura 33*. Los balances de masa correspondientes se plantearon en la *Ecuación 12* y la *Ecuación 13*. La media global de las cantidades de CO_2 inyectadas, capturadas y pérdidas son respectivamente: $13,24 \pm 7,94$; $5,72 \pm 4,57$; and $2,40 \pm 4,57$ kg. Las cantidades totales también fueron estimadas (suma de todos los días del periodo en el que se mantuvo el ensayo). Estas fueron: 1681, 725, and 304 kg. Respecto a las medias mensuales observadas, las cantidades medias inyectadas por día oscilaron entre: 8.1 (noviembre)- 17.9 kg (febrero); 4.5 (marzo)- 11.2 kg (diciembre); and 0.90 (enero)- 4.40 kg (febrero), estos valores estuvieron relacionados con las cantidades mencionadas anteriormente en el mismo orden. Estos valores se han estimado, así mismo, a partir de la suma de la cantidad de CO_2 inyectado cada mes dividido por el total de días de ese mes. Revisando los valores estimados, las cantidades inyectadas y capturadas discernieron significativamente. Esto no debería suceder, especialmente considerando que estos son datos correspondientes a un periodo de tiempo relativamente largo.

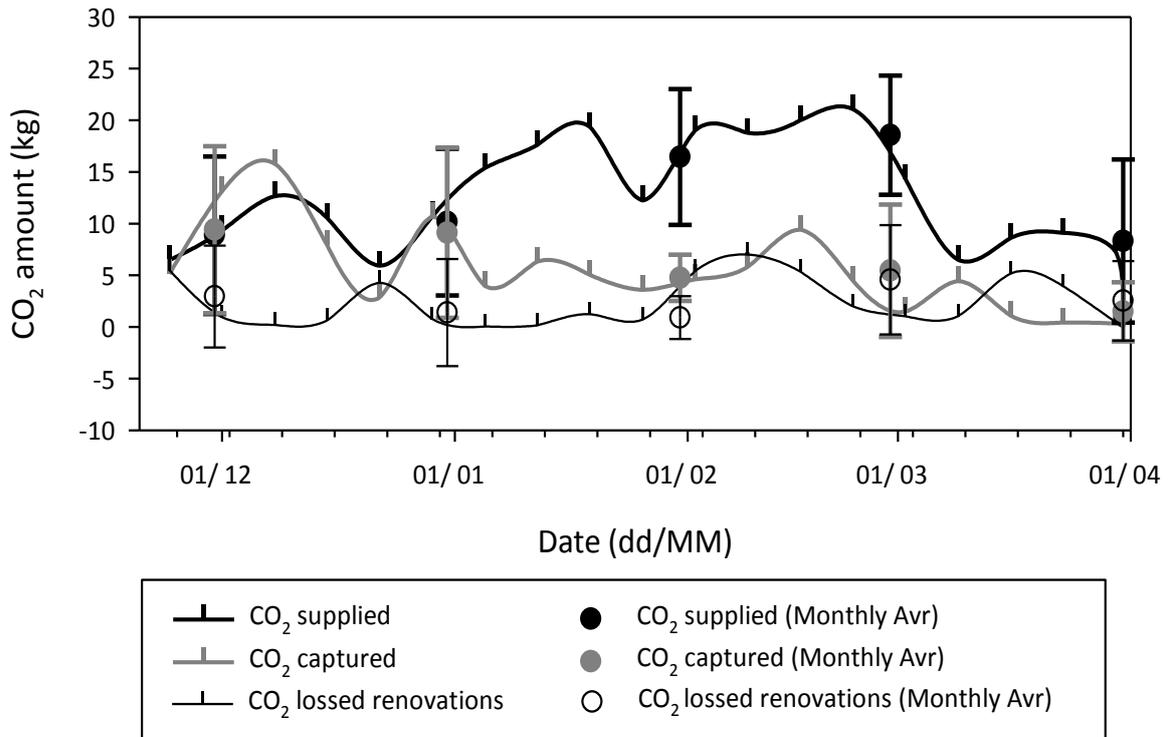


Figura 33. Cantidades de CO₂ suministrado, capturado y perdido debido a la renovación de aire.

Respecto a esta diferencia, se asumió que la concentración de CO₂ en la corriente de gases bombeada dentro del tanque (proveniente de la chimenea de la caldera, es decir, los gases de combustión) fue estable. Esto se tuvo en cuenta de cara a la estimación de las cantidades capturadas. La concentración en este flujo de gas fue medida 3 veces, considerándose este valor como razonablemente válido. El valor de desviación estándar observado con estas medidas permitió hacer esta presunción. No obstante, a pesar de estas observaciones, puede que tuvieran lugar ciertas fluctuaciones para esta concentración. Hecho que pudiese explicar esta diferencia observada entre las cantidades inyectadas y capturadas. Teniendo en cuenta este razonamiento, la cantidad de CO₂ inyectado debería ser considerada como la estimación más fiable. Sin embargo, lo que puede afirmarse es que la cantidad de CO₂ perdida como consecuencia de la renovación de aire fue menor que la inyectada (y la capturada por extensión). Tomando como referencia la cantidad de CO₂ inyectada en total, hasta un 18% fue perdido por este intercambio de aire con el exterior. Este valor fue considerablemente alto. No obstante, todavía fue posible alcanzar el valor de concentración de consigna.

4.4. Efecto de la aplicación de calefacción y enriquecimiento carbónico sobre la productividad de las plantas.

Por otra parte, los datos relacionados con la productividad de los dos cultivos llevados a cabo para este ensayo (con y sin aporte de CO₂ y calefacción) se representan en la *Figura 34*. La productividad fue incrementada en 17,9% al final de la campaña. Así mismo, la masa por fruto producido fue superior durante la mayor parte de la duración de este experimento. La máxima diferencia, respecto a esta variable, fue de 5,22% en noviembre. No obstante, este incremento fue mayor de un 4% de forma consistente desde las primeras semanas hasta febrero. Teniendo en cuenta estos datos, la hipótesis estudiada fue confirmada. Revisando publicaciones disponibles en bibliografía acerca de este ámbito de estudio, un “review” compara los datos que aportan distintas publicaciones, concluyendo que el enriquecimiento con CO₂ para cultivos de tomate, podría incrementar su productividad entre un 30- 60% [69]. Otro trabajo explica que se obtuvieron incrementos entre 54,2- 125,0% [70]. Finalmente, señalar experimentación desarrollada de manera muy similar a la desarrollada en la tesis [70]-[72] han obtenido un incremento de productividad en el rango (13- 30%).

Así mismo, las desviaciones leves en cuanto a la productividad vistas en comparación con los datos mencionados en bibliografía pudieron venir a raíz de la influencia de otros factores. Uno de ellos, es la conductividad del sustrato además de las diferencias en el tiempo en el que realmente se estuvo. Respecto a esta última consideración, probablemente ha de ser mucho más fácil comparar los incrementos de productividad obtenidos por el enriquecimiento de CO₂ tratando de dar una media de que concentración de CO₂ y durante cuánto tiempo se mantuvo dicha concentración. No obstante, otros parámetros con influencia han de ser la irradiancia solar recibida por la planta, la temperatura en el ambiente interior del invernadero, la humedad relativa, concentración de nutrientes en el sustrato de cultivo y conductividad [71], [72]. Teniendo en cuenta los datos recogidos en otras fuentes bibliográficas y la influencia de otros factores ya mencionados, los resultados recogidos en estas fuentes estuvieron en la línea de los obtenidos con el experimento llevado a cabo. Al mismo tiempo, estos datos se han obtenido de un ensayo llevado a cabo durante un periodo a medio- largo plazo en una instalación a escala piloto.

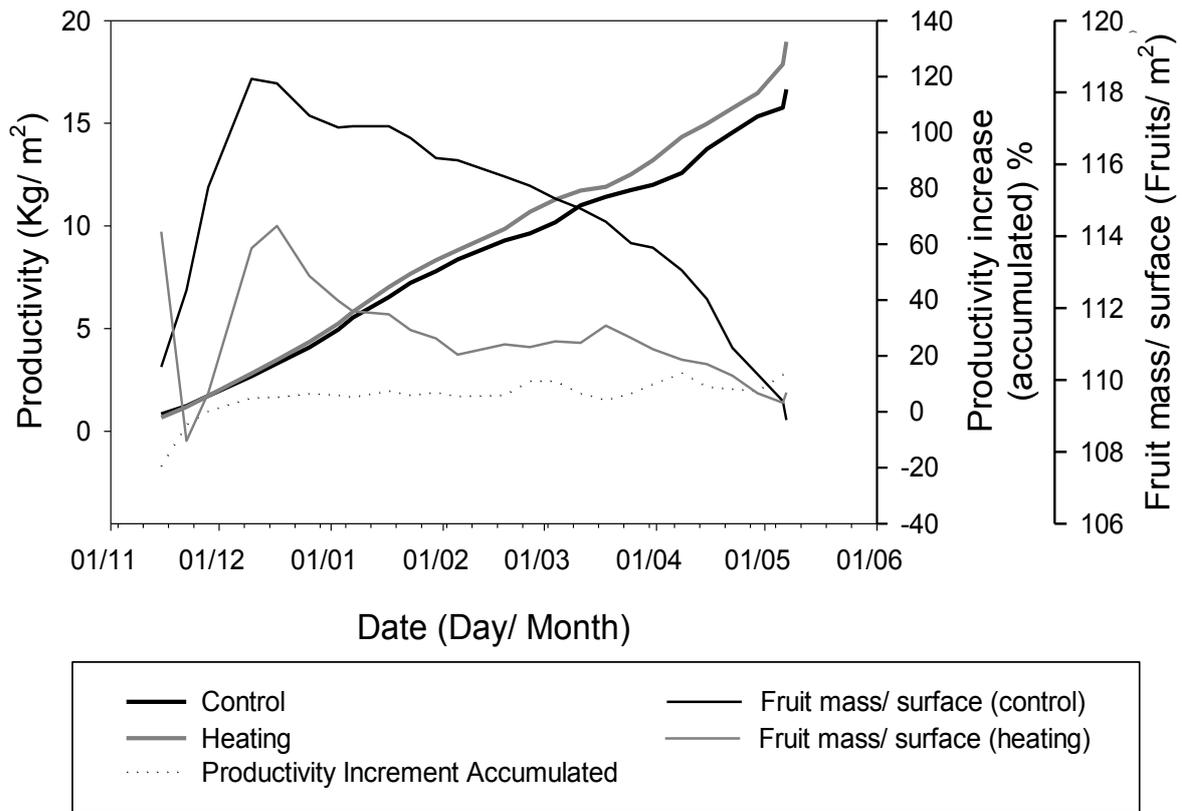


Figura 34. Comparación de la productividad de una explotación en la que se aplicó calefacción y enriquecimiento en CO₂ con otra “control” (sin estos aportes).

Otra consideración para tener en cuenta respecto al incremento de la productividad de fruto es el hecho de que la concentración de CO₂ y la productividad no están directamente relacionados. Es decir, disponer unos valores de concentración por encima de la atmosférica posibilita a las plantas elevar su tasa fotosintética y al mismo tiempo, este incremento implica otro asociado a la masa vegetativa de las plantas. Este último les puede ayudar a tener mayor rendimiento en lo relativo a la producción de fruto. Así pues, hay una relación en cierto modo, pero no es directa. Intervienen diversos pasos y/ o factores. Además de esto, la asimilación de CO₂ en la canopia de las plantas también juega un importante[73]. No solo se trata de disponer de una concentración alta de CO₂, sino que las plantas han de tener las condiciones adecuadas para poder asimilarlo.

Así mismo, bibliografía publicada señaló que la exposición de plantas a altos valores de concentración de CO₂ durante periodos largos e ininterrumpidos, puede llevar a disminuir la capacidad de asimilación de este. Así pues, los efectos positivos de enriquecimiento con CO₂ pueden disminuir en el tiempo [74], [75]. No obstante, este no debería de ser el caso del presente experimento. Bajo las condiciones climáticas dada usualmente en esta zona, los periodos en los que se llevó a cabo enriquecimiento fueron seguidos de otros en los que era necesario abrir la ventilación del invernadero. Durante estos periodos, no se llevó a cabo

enriquecimiento alguno. Por otra parte, además de estos beneficios sobre la productividad conseguida, podría conseguirse otros sobre propiedades tales como la calidad en términos de uniformidad y propiedades organolépticas [70], [76], [77]. Este punto puede ser susceptible de ser estudiado.

Revisando la productividad a lo largo de la cosecha, el principal incremento se consiguió durante los meses en los que las plantas empiezan a dar fruto (noviembre y diciembre).. Teniendo en cuenta esta consideración, resulta bastante relevante que el incremento en la productividad se de en estos meses ya que normalmente, la disponibilidad de estas hortalizas de fruto suele ser menor durante esta época. Por esto, en este periodo suelen tener valores de venta mayores. Además, este incremento de productividad fue sostenido después de este periodo en cierta medida (aunque menos cuantioso). Con las observaciones derivadas de este experimento, se puede argumentar que el estado general de estas plantas fue sensiblemente mejor que el de aquellas a las que no se les aplicó calefacción, ni aporte de CO₂. Por esta razón, las plantas pudieron desarrollar una productividad mayor. Otro punto con relativa importancia es la calidad del fruto producido. Respecto a este último, la aplicación de ambas técnicas puede resultar beneficiosa también. Se podrían llevar a cabo estudios adicionales podrían llevarse a cabo para abordar si la calidad de los frutos está asociada a factores tales como deformaciones o imperfecciones externas, la incidencia de plagas, la uniformidad en el tamaño y la homogeneidad del fruto obtenido.

5. CONCLUSIONES

- **Viabilidad del uso de residuos vegetales de invernadero como combustible**

Los residuos vegetales generados por la actividad agrícola pueden ser una alternativa como fuente de energía renovable. El empleo de estos residuos vegetales de invernadero como combustible sólido es factible, pero para ello es importante aplicar pretratamientos que mejoren su calidad (secado dentro de invernaderos, limitación del contacto con el sustrato y mezcla con otros tipos de biomasa), así como homogeneizar los residuos vegetales de invernadero. Por otra parte, de forma general esto implicó incrementar su poder calorífico de combustión y disminuir su contenido en cenizas. Por tanto, se consiguió que estos parámetros (relacionados con la calidad de un combustible sólido) se acerquen a los correspondientes a otros tipos obtenidos a partir de biomasa empleados más usualmente en equipos de combustión directa. Se ha demostrado como estos pretratamientos fueron: 1) secado de las plantas dentro de el mismo invernadero dónde estas fueron cultivadas, una vez su periodo productivo haya concluido; 2) modificar el método de retirada de estos residuos invernaderos procurando minimizar el contacto con el sustrato del invernadero y 3) mezcla de estos residuos vegetales de invernadero con otros tipos de biomas con contenido en cenizas inferior al presente de forma nativa en estos residuos.

- **Optimización de la combustión de residuos vegetales de invernadero**

Una combinación adecuada de los factores estudiados (configuración) es esencial para conseguir establecer una combustión óptima para cada tipo de biomasa. Por ejemplo, comparando entre las configuraciones más y menos favorables se observó un incremento de un 63,3- 65.2- 58.2 y 55.2% en pérdidas térmicas; 87,3- 87.5- 77.5- y 74.5% en emisiones de CO; 88.0- 89.0- 77.1 en emisiones de NO_x; y 99,3- 95,5 y 64,4 en emisiones de SO₂ respectivamente para pellets de pino, hueso de aceituna, biomasa de las plantas de tomate y mezcla de esta última con poda de almendro. Estos datos están referidos a una concentración de O₂ del 15%. Es decir, se recalcularon asumiendo que esta concentración tenía siempre este mismo valor. Así mismo, hubo configuraciones que superaron los límites marcados por la legislación relevante. Mientras que la configuración adecuada para el mismo tipo de biomasa quedaba por debajo de este.

Así mismo, la optimización de la combustión es importante para reducir el consumo de combustible. A su vez, esto es relevante a disminuir los costes derivados de la aplicación de calefacción. Por otra parte, la reducción de los gases tóxicos (tales como CO, SO₂, NO_x) es importante para la subsecuente captura de CO₂. Esta captura podría hacerse con los mismos

gases generados de la combustión llevada a cabo con la calefacción. Para este fin, un proceso previo de filtrado sería requerido para reducir estas emisiones de gases tóxicos. De esta manera, el CO₂ filtrado sería usado para enriquecimiento. A su vez, la combinación de calefacción y enriquecimiento tiene beneficios sobre la productividad para cultivos llevados a cabo en invernaderos.

Por otro lado, cabe resaltar que la configuración óptima era ligeramente distinta para cada tipo de biomasa estudiado. La eficiencia de combustión en el caso de la mezcla de biomasa de plantas de tomate/ poda de almendro fue sensiblemente mayor que la correspondiente a las de plantas de tomate 100%. Sin embargo, las emisiones de gases tóxicos fueron mayores. Este hecho es similar a lo visto para el caso de las propiedades relacionadas con la combustión de materiales sólidos. Los elementos presentes en la biomasa empleada capaces de fijar NO_x y SO₂ tienen influencia en estas emisiones, cabría contemplar la posibilidad de aumentar la proporción de estos elementos. Respecto a esta, la incorporación de poda almendro subió esta proporción. Teniendo presente esta consideración, dos tipos de biomasa con diferente comportamiento de combustión fueron mezcladas. Al hacer esto, fue posible incrementar la eficiencia de combustión de la biomasa que era menos adecuada en un principio. No solo esto, sino que está la posibilidad de que las principales propiedades relacionadas con la combustión puedan ser mejoradas con pretratamientos adicionales, tales como el lavado con agua.

- **Sistema de calefacción y enriquecimiento carbónico de invernaderos**

La tecnología propuesta podría suponerse una opción atractiva para incrementar la rentabilidad y reducir el impacto medioambiental de la actividad hortofrutícola intensiva desarrollada en el área donde este estudio se ha centrado. No obstante, esta podría ser aplicable en otras áreas donde se lleven a cabo cultivos y/ o prácticas agrícolas similares. Esta opción, así mismo, ofrece una nueva alternativa para la revalorización de otros residuos provenientes de cultivos agrícolas y con propiedades similares para aplicaciones que requieran de energía térmica y/ o aporte de calefacción. Esto resultaría adecuado, siempre y cuando, estas aplicaciones estén ubicadas a distancias razonables de los puntos donde se generan estos residuos.

La alternativa ensayada con las actividades correspondientes a este bloque (ensayo de calefacción/ aporte de CO₂ a largo plazo empleando biomasa) podrían constituir un medio alternativo para reemplazar el uso de combustibles fósiles con otros obtenidos a partir de biomasa. El proceso se haría más neutro respecto a las emisiones de CO₂ liberadas. A través del empleo de biomasa, no solo la cantidad de CO₂ generada para mantener los requerimientos de

calefacción debió ser fijada previamente, sino que además parte de esta vuelve a quedar fijada de forma rápida en los cultivos de la siguiente cosecha. Así mismo, estas técnicas pueden ser también aplicadas en otras aplicaciones relacionadas con la agricultura., por ejemplo, producción de plántones o el cultivo de flores dentro de invernaderos. De esta manera, estas las mismas pueden ser también aplicadas a otros procesos para los que éstas sean requeridas. No solo está esta posibilidad, sino que además sería factible aplicar estas técnicas a otros procesos en los que se necesiten estos dos recursos (por ejemplo, acuicultura).

Se comprobó que el sistema se comportaba adecuadamente, siendo este capaz de mantener calefacción empleando un combustible sólido obtenido a partir de biomasa. Por otra parte, el sistema fue diseñado para ser capaz de tratar con las operaciones de Se comprobó, así mismo que el sistema fue diseñado para ser capaz de llevar a cabo la captura y posterior inyección de cierta parte del CO₂ generado durante la combustión previa. El correcto funcionamiento de este fue testado durante un ensayo a largo plazo (equivalente a una cosecha entera incluyendo los tres meses del año con temperaturas mínimas inferiores). Por otra parte, la demanda de calefacción usual durante la noche fue lo suficientemente extensa como para que con la cantidad de CO₂ capturada durante la misma, se cubrieran las necesidades de enriquecimiento del día siguiente. Cubrir esta demanda es particularmente importante teniendo en cuenta las necesidades que debe cubrir este sistema. La aplicación y combinación de éstas dos técnicas de cultivo (calefacción y aporte de CO₂) permitió incrementar la productividad del cultivo (hasta un 17.9%).

6. PROSPECTIVAS

- **Residuos vegetales de invernadero**

Será de interés acometer acciones adicionales para intentar adecuar las características de esta biomasa en mayor medida. Las mismas podrían englobarse en distintas alternativas: 1) un lavado con agua a temperatura relativamente elevada estos RVI tras ser retirados del invernadero, 2) estudio de diferencias entre las distintas partes de la canopia de las plantas; principalmente analizar las diferencias entre los tallos y las hojas. 3) Tratar de varias. 4) Estudiar hasta qué punto puede contribuir el proceso de peletizado en el comportamiento de esta biomasa a la hora de ser consumida dentro de la caldera (alteraciones físico- químicas).

- **Optimización de la combustión de residuos vegetales de invernadero**

Respecto al equipo de combustión empleado posibles líneas de actuación para mejorar el proceso pueden estar en tratar de estudiar el empleo de calderas parillas móviles. Este tipo de equipos limitan una acumulación excesiva de cenizas en el foso de combustión. Por otra parte, se podría tratar de mejorar el sistema de ignición de la biomasa, de cara a hacer más robusto esta operación. Una alternativa en esta línea, podría ser que el equipo fuese capaz de comenzar la ignición con una biomasa que presente menos problemas. para posteriormente, una vez que se ha alcanzado cierta temperatura en el hogar de combustión pasar a introducirse los RVI. De igual modo, un estudio de cómo son los patrones de flujo dentro de la cámara de combustión de la caldera empleada puede llevar a conseguir mejoras adicionales tanto en la eficiencia térmica, como una reducción de gases contaminantes generados.

- **Sistema de calefacción y enriquecimiento carbónico de invernaderos**

Los ensayos llevados a cabo a largo plazo en esta tesis probaron que esta alternativa es interesante. El siguiente paso consistiría en un estudio económico de cara estudiar su posible implementación en explotaciones comerciales ensayos llevados a cabo para testar el sistema a largo plazo, se llevaron a cabo con un tipo de biomasa más convencional (pelets de pino). El objetivo sería utilizar estos Residuos Vegetales de Invernadero de forma continua para esta aplicación. Al menos una mezcla de estos con otro tipo de biomasa. En cuanto al desempeño del sistema, se vio que se debe tener en cuenta la caída de agua sobre el cultivo por condensación desde la cubierta. Medidas adicionales para tener en limitar este fenómeno serán de gran ayuda. Con tal fin introducir sistemas que permitan controlar la humedad interna del invernadero

dejando las ventanas cerradas resulta bastante interesante. Así mismo, una posibilidad adicional puede consistir en introducir sistemas que capten energías renovables (por ejemplo, la solar) de cara a obtener electricidad con la cuál aliviar el consumo energético requerido para la captura o para estos sistemas que controlen la humedad interna, incluso se puede plantear la posibilidad de prolongar el tramo diurno de las plantas aplicando iluminación artificial. Una opción adicional también puede ser el uso de bombas de calor inversas de cara a introducir refrigeración en situaciones en las que haya energía solar suficiente (calentando agua).

7. PUBLICACIONES DESARROLLADAS EN LA TESIS

Título	Boiler Combustion Optimization of Vegetal Crop Residues from Greenhouses
Tipo	
Autores	J.V. Reinoso , M. G. Pinna- Hernández, M. D. Fernández Fernández, J.A. Sánchez, J.C. López, F.G. Ación
Revista	Agronomy
Fecha	Mar/ 2021

Título	Optimal processing of greenhouse crop residues to use as energy and CO₂ sources
Tipo	Artículo en revista internacional
Autores	J.V. Reinoso , M. G. Pinna- Hernández, M. D. Fernández Fernández, J.A. Sánchez, J.C. López, F.G. Ación
Revista	Industrial Crops and Products
Fecha	Apr/ 2019

Título	Combustion development optimization of greenhouse crop residues
Tipo	Presentation in international congress
Autores	J.V. Reinoso , M. G. Pinna- Hernández, J.A. Sánchez, M. D. Fernández Fernández, J.C. López, F.G. Ación
Congreso	3 ^{er} Internacional Congress in Chemical Engineering (ICCE)
Entidad	Spanish Association of Chemistry and Chemical Engineers workers (Asociación Nacional de Químicos e Ingenieros Químicos de España)
Localización	Santander
Fecha	19- 21/ Jun/ 2019

Título	Optimization of boiler operation conditions for heating of greenhouses using crop residues
Tipo	Presentation in international congress
Autores	J.V. Reinoso , M. G. Pinna- Hernández, M. D. Fernández Fernández, J.A. Sánchez, J.C. López, F.G. Ación
Congreso	The 2nd International Bioresource Technology Conference
Entidad	Bioresource Technology for Bioenergy, Bioproducts & Environmental Sustainability
Localización	Sitges, Spain
Fecha	16- 18/ Sep/ 2018

Título	Modelling of the performance of a system for supplying CO₂ captured from flue gases generated from solid biomass fuel in greenhouses (Modelado del comportamiento de un sistema de aporte de CO₂ recuperado a partir de gases de combustión de biomasa en invernaderos)
Tipo	Presentation in international congress
Autores	J.V. Reinoso Moreno , J.A. Sánchez Molina, M. D. Fernández Fernández, J.C. López, F.G. Ación
Congreso	III Symposium in Spain of Agricultural Engineering- I Iberic Symposium (III Simposio Nacional de Ingeniería Hortícola – I Simposio Ibérico de Ingeniería Hortícola)
Entidad	Spanish Society of Agricultural Science (Sociedad Española de Ciencias Hortícolas)
Localización	Lugo
Fecha	21- 23/ Feb/ 2018

Título	Processing of crop residues for heating and CO₂ enrichment in greenhouses
Tipo	Presentation in international congress
Autores	J. V. Reinoso Moreno , M.D. Fernández, J.A. Sánchez-Molina, J.C. López, F. G. Ación Fenández
Congreso	6 th World congress on biofuels and bioenergy
Entidad	Conferenceseries.com
Localización	Londres (Reino Unido)
Fecha	Sep/ 2017

Título	CO₂ supply to a greenhouse from the combustion of vegetal waste
Tipo	Presentation in international congress
Autores	J.C. López, M.D. Fernández, J.V. Reinoso , F.G. Ación, J.A. Sánchez-Molina, M. David, C.Pérez and J.C. Gázquez
Congreso	International Symposium on New Technologies and Management for Greenhouses (GreenSys)
Entidad	University of Évora
Localización	Évora, Portugal
Fecha	Aug/ 2015

Título	Optimization of combustion of mixtures of crop residues and other biomass
Tipo	Presentation in National Congress
Autores	J. V. Reinoso Moreno , M. G. Pinna Hernández, J. A. Sánchez Molina, M.D. Fernández Fernández, J. C. López Hernández, F. G. Ación Fernández
Congreso	II Congress of Young Researchers in Agricultural Science (II Congreso de Jóvenes Investigadores en Ciencias Hortícolas, CIAIMBITAL)
Entidad	Research Centre for Research in Mediterranean Intensive Agricultural systems and Biotechnology (Centro de Investigación en Agrosistemas Intensivos Mediterráneos y Biotecnología Agroalimentaria, CIAIMBITAL)
Fecha	Sept/ 2019
Localización	Almeria, Spain

Título	Optimization of boiler operation conditions for heating of greenhouses using crop residues
Tipo	Presentation in National Congress
Autores	J. V. Reinoso Moreno , M. G. Pinna Hernández, J. A. Sánchez Molina, M.D. Fernández Fernández, J. C. López Hernández, F. G. Ación Fernández
Congreso	I Congress of Young Researchers in Agricultural Science (I Congreso de Jóvenes Investigadores en Ciencias Hortícolas, CIAIMBITAL)
Entidad	Research Centre for Research in Mediterranean Intensive Agricultural systems and Biotechnology (Centro de Investigación en Agrosistemas Intensivos Mediterráneos y Biotecnología Agroalimentaria, CIAIMBITAL)
Localización	Almería (España)
Fecha	20/ Dec/ 2018

Título	Combustion Optimization of Greenhouse Crop Residues in Biomass Boiler (In Spanish: Optimización de la combustión de residuos vegetales de invernadero en caldera de biomasa)
Tipo	Presentation in National Congress
Autores	J. V. Reinoso Moreno , F. G. Ación Fernández, J. C. López Hernández, M. G. Pinna Hernández
Congreso	II PhD Students Meeting in Renewable Energy (II Jornadas Doctorales en Energías Renovables)
Entidad	Centre for Advanced Studies of Energy and Environment of the University of Jaen (Centro de Estudios Avanzados en Energía y Medioambiente de la Universidad de Jaén)
Localización	Jaen (Spain)
Fecha	10/ May/ 2019

Título	A Case of Combustion Optimization of Biomass from Crop Residues in Boilers
Tipo	Symposium presentation
Autores	J.V. Reinoso Moreno , M. G. Pinna- Hernández, J. A. Sánchez, M.D. Fernández, J. C. López, F. G. Ación
Congreso	VIII- Mini Symposium in Research of the Experimental Sciences Faculty, the University of Almeria (III- Mini simposio de investigación en ciencias experimentales, Universidad de Almería)
Entidad	The Experimental Sciences Faculty of the University of Almeria)
Localización	Almeria
Fecha	Nov/ 2019

Título	Influence of methods applied to extract crop residues from greenhouses for their utilization on energy applications (In Spanish: Influencia de las técnicas de recogida sobre las propiedades de residuos vegetales de invernaderos para su aprovechamiento energético)
Tipo	National congress
Autores	M.D. Fernández, J.V. Reinoso , C. Perez, J.C. López, F.G. Ación, J.A. Sanchez, D.E. Meca, J.C. Gázquez
Congreso	VII Congreso ibérico de agroingeniería y ciencias hortícolas
Entidad	Sociedad española de agroingeniería y Sociedad española de ciencias hortícolas
Localización	Madrid, Spain
Fecha	Aug/ 2013

Título	CO₂ capture and purification system from biomass combustion for enrichment inside greenhouses
Tipo	Symposium presentation
Autores	J.V. Reinoso, M.D. Fernández, J.A. Sánchez, J.C. López, F.G. Ación
Congreso	III- Mini Symposium in Research of the Experimental Sciences Faculty, the University of Almeria (III- Mini simposio de investigación en ciencias experimentales, Universidad de Almería)
Entidad	The Experimental Sciences Faculty of the University of Almeria)
Localización	Almeria, Spain
Fecha	Nov/ 2014

Título	Greenhouse crop residues characterization and pre- treatment for biomass fuel production
Tipo	Symposium presentation
Autores	J.V. Reinoso, F.G. Ación, M.D. Fernández, J.C. López
Congreso	II- Mini Symposium in Research of the Experimental Sciences Faculty, the University of Almeria (II- Mini simposio de investigación en ciencias experimentales, Universidad de Almería)
Entidad	Faculty of Experimental Sciences (University of Almeria)
Localización	Almería, Spain
Fecha	Nov/ 2013

8. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Cajamar Caja Rural (Autor Institucional), “Análisis de la campaña hortofrutícola de Almería. Campaña 2021/2022,” 2022.
- [2] A. Escudero Población, S. Mancheño Losa, and L. P. J. J., “Anuario estadística 2021; Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación.,” 2022.
- [3] A. J. Callejón and J. A. López-Martínez, “Briquettes of plant remains from the greenhouses of Almería (Spain),” *Spanish J. Agric. Res.*, vol. 7, no. 3, pp. 525–534, 2009.
- [4] S. Parra, “Análisis económico de la valoración de residuos agrícolas orgánicos: Aplicación a la evaluación de proyectos alternativos en la horticultura protegida almeriense (Tesis),” Universidad de Almería, 2004.
- [5] P. y D. R. (Autor I. Consejería de Agricultura and C. de M. ambiente y O. del T. (Autor Institucional), “Líneas de actuación de las Consejerías de Agricultura, Pesca y Desarrollo Rural y de Medio ambiente y Ordenación del Territorio en materia de gestión de restos vegetales en la horticultura de Andalucía,” 2016.
- [6] S. Bautista-Baños *et al.*, “Chitosan as a potential natural compound to control pre and postharvest diseases of horticultural commodities,” *Crop Prot.*, vol. 25, no. 2, pp. 108–118, Feb. 2006.
- [7] D. Hall *et al.*, “PAHs, carbonyls, VOCs and PM2.5 emission factors for pre-harvest burning of Florida sugarcane,” *Atmos. Environ.*, vol. 55, pp. 164–172, Aug. 2012.
- [8] “El Ejido convierte los excedentes agrícolas en alimento para 13.000 ovejas,” *Diario de Almería*, 2019. [Online]. Available: https://www.diariodealmeria.es/provincia/excedentes-agricolas-alimento-ovejas-Ejido_0_1357064667.html.
- [9] “La Junta recibe 50 toneladas de alimento para el ganado de explotaciones afectadas por el fuego en Sierra Bermeja,” *Europa press*, 2021. [Online]. Available: <https://www.europapress.es/epagro/noticia-junta-recepciona-50-toneladas-alimento-ganado-explotaciones-afectadas-fuego-sierra-bermeja-20210927143925.html>.
- [10] B. Farneti, R. E. Schouten, T. Qian, J. A. Dieleman, L. M. M. Tijskens, and E. J. Woltering, “Greenhouse climate control affects postharvest tomato quality,” *Postharvest Biol. Technol.*, vol. 86, pp. 354–361, Dec. 2013.

- [11] Y. F. Liu, M. F. Qi, and T. L. Li, "Photosynthesis, photoinhibition, and antioxidant system in tomato leaves stressed by low night temperature and their subsequent recovery," *Plant Sci.*, vol. 196, pp. 8–17, 2012.
- [12] K. Ito, "Greenhouse temperature control with wooden pellet heater via model predictive control approach," in *2012 20th Mediterranean Conference on Control & Automation (MED)*, 2012, pp. 1542–1547.
- [13] "Solid biomass barometer 2020," 2020.
- [14] P. E. (Autor Institucional), *Directive on the European Parliament and of the Council on the promotion of the use of energy from renewable sources (recast)*. European Union, 2017.
- [15] A. Demirbas, "Potential applications of renewable energy sources, biomass combustion problems in boiler power systems and combustion related environmental issues," *Prog. Energy Combust. Sci.*, vol. 31, no. 2, pp. 171–192, 2005.
- [16] A. Debdoubi, A. El Amarti, and E. Colacio, "Production of fuel briquettes from esparto partially pyrolyzed," *Energy Convers. Manag.*, vol. 46, no. 11–12, pp. 1877–1884, 2005.
- [17] María Guadalupe Pinna Hernández, "Solar-biomass hybridization in thermoelectric plant," Almería, 2017.
- [18] M. G. Pinna-Hernández, I. Martínez-Soler, M. J. Díaz Villanueva, F. G. Acien Fernández, and J. L. C. López, "Selection of biomass supply for a gasification process in a solar thermal hybrid plant for the production of electricity," *Ind. Crops Prod.*, vol. 137, pp. 339–346, Oct. 2019.
- [19] J. C. López *et al.*, "Aporte de calor y CO₂ en invernadero procedente de la combustión de residuos vegetales (resultados preliminares)," 2012.
- [20] A. Garcia-Maraver, M. Zamorano, U. Fernandes, M. Rabaçal, and M. Costa, "Relationship between fuel quality and gaseous and particulate matter emissions in a domestic pellet-fired boiler," *Fuel*, vol. 119, pp. 141–152, Mar. 2014.
- [21] J. V. Reinoso Moreno *et al.*, "Optimal processing of greenhouse crop residues to use as energy and CO₂ sources," *Ind. Crops Prod.*, vol. 137, pp. 662–671, Oct. 2019.
- [22] J. V. Reinoso Moreno, M. G. Pinna Hernández, M. D. Fernández Fernández, J. A. Sánchez

- Molina, J. C. López Hernández, and F. G. Acién Fernández, "Boiler Combustion Optimization of Vegetal Crop Residues from Greenhouses," *Agronomy*, vol. 11, no. 4, p. 626, 2021.
- [23] J. F. González *et al.*, "Combustion optimisation of biomass residue pellets for domestic heating with a mural boiler," *Biomass and Bioenergy*, vol. 27, no. 2, pp. 145–154, Aug. 2004.
- [24] J. L. C. L. M.G. Pinna-Hernández, F.G. Acien Fernández, J.G. López Segura, "Solar Drying of Greenhouse Residues For Energy Valorization: Modelling and Determination of Optimal Conditions," *Agronomy*, vol. 10(12), 2020.
- [25] "ISO 18134-1:2015. Determination of moisture content- Oven dry method- Part 1: Total moisture- Reference method." International Organization for Standardization, 2015.
- [26] "ISO 18122: 2015. Solid biofuels- Determination of ash content." International Organization for Standardization, 2015.
- [27] "ISO 16967:2015- Solid biofuels- Determination of major elements- Al, Ca, Fe, Mg, P, K, Si, Na and Ti." International Organization for Standardization, 2015.
- [28] "ISO 540:2008. Hard coal and coke- Determination of ash fusibility." International Organization for Standardization, 2008.
- [29] "ISO 18125:2017. Solid biofuels- Determination of calorific value." International Organization for Standardization, 2017.
- [30] "ISO 16994:2016. Solid biofuels- Determination of total content of sulfur and chlorine." International Organization for Standardization, 2016.
- [31] H. Hartmann, "Solid Biofuels solid biofuel, Fuels and Their Characteristics," in *Encyclopedia of Sustainability Science and Technology*, R. A. Meyers, Ed. New York, NY: Springer New York, 2012, pp. 9821–9851.
- [32] I. Obernberger and G. Thek, "Physical characterisation and chemical composition of densified biomass fuels with regard to their combustion behaviour," *Biomass and Bioenergy*, vol. 27, no. 6, pp. 653–669, 2004.
- [33] *Decreto 239/ 2011, 12 de Julio, por el que se regula la calidad del medio ambiente atmosférico y se crea el Registro de Sitemas de Evaluación del la Calidad del Aire en*

- Andalucía; In Spanish: Statute 239/ 2011 wich regulates the atmospheric environmental.* Spain: Andalusian goverment, 2011.
- [34] L. M. Mortensen, "Review: CO₂ enrichment in greenhouses. Crop responses," *Sci. Hortic. (Amsterdam).*, vol. 33, no. 1–2, pp. 1–25, Aug. 1987.
- [35] M. K. Mondal, H. K. Balsora, and P. Varshney, "Progress and trends in CO₂ capture/separation technologies: A review," *Energy*, vol. 46, no. 1, pp. 431–441, Oct. 2012.
- [36] M. E. Casco, M. Martínez-Escandell, J. Silvestre-Albero, and F. Rodríguez-Reinoso, "Effect of the porous structure in carbon materials for CO₂ capture at atmospheric and high-pressure," *Carbon N. Y.*, vol. 67, pp. 230–235, Feb. 2014.
- [37] International Organization for Standardization, "ISO 18135:2017. Solid Biofuels- Sampling." International Organization for Standardization, 2017.
- [38] A. Escudero Población, S. Mancheño Losa, and J. J. López Pérez, "Anuario estadística 2019; Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación (Statistical Yearbook 2019; Ministry of Agriculture, Fishing and Food Supply of Spain)," 2020.
- [39] *Statute 239/ 2011 (12/07/2011) wich regulates the atmospheric environmental quality and establish the Data Register for the Evaluation of the Air Quality in Andalusia; in Spanish: Decreto 239/ 2011, 12 de Julio, por el que se regula la calidad del...* Spain: Andalusian goverment, 2011.
- [40] Federal Law Gazette and Federal Ministry for the environment- nature conservation- nuclear safety and consumer protection, *Ordinance on Small and Medium-Sized Firing Installations of 26 January 2010 (Federal Law Gazette [BGBl.] I p. 38), most recently amended by Article 2 of the Ordinance of 13 June 2019 (Federal Law Gazette I p. 804).* Germany: Federal Law Gazette; Federal Ministry for the environment, nature conservation, nuclear safety and consumer protection, 2010, p. 27.
- [41] "ISO 17225-1:2014 Solid biofuels- Fuel specifications and classes- Part 1: General requirements." International Organization for Standardization, 2014.
- [42] E. J. M. C. Boon, P. C. Struik, F. M. Engels, and J. W. Cone, "Stem characteristics of two forage maize (*Zea mays* L.) cultivars varying in whole plant digestibility. IV. Changes during the growing season in anatomy and chemical composition in relation to

- fermentation characteristics of a lower internode," *NJAS - Wageningen J. Life Sci.*, vol. 59, no. 1–2, pp. 13–23, Mar. 2012.
- [43] C. Ververis, K. Georghiou, N. Christodoulakis, P. Santas, and R. Santas, "Fiber dimensions, lignin and cellulose content of various plant materials and their suitability for paper production," *Ind. Crops Prod.*, vol. 19, no. 3, pp. 245–254, 2004.
- [44] "ISO 17225-2: 2014. Solid biofuels- Fuel specifications and classes- Part 2: Graded wood pellets." International Organization for Standardization, 2014.
- [45] A. J. Callejón-Ferre, B. Velázquez-Martí, J. A. López-Martínez, and F. Manzano-Agugliaro, "Greenhouse crop residues: Energy potential and models for the prediction of their higher heating value," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 15, no. 2, pp. 948–955, 2011.
- [46] V. K. Verma, S. Bram, G. Gauthier, and J. De Ruyck, "Performance of a domestic pellet boiler as a function of operational loads: Part-2," *Biomass and Bioenergy*, vol. 35, no. 1, pp. 272–279, Jan. 2011.
- [47] N. Kraiem, M. Lajili, L. Limousy, R. Said, and M. Jeguirim, "Energy recovery from Tunisian agri-food wastes: Evaluation of combustion performance and emissions characteristics of green pellets prepared from tomato residues and grape marc," *Energy*, vol. 107, pp. 409–418, Jul. 2016.
- [48] Y. Roy *et al.*, "Biomass combustion for greenhouse carbon dioxide enrichment," *Biomass and Bioenergy*, vol. 66, pp. 186–196, Jul. 2014.
- [49] J. F. González, C. M. González-García, A. Ramiro, J. Gañán, A. Ayuso, and J. Turegano, "Use of energy crops for domestic heating with a mural boiler," *Fuel Process. Technol.*, vol. 87, no. 8, pp. 717–726, Aug. 2006.
- [50] R. G. Fernández, C. P. García, A. G. Lavín, and J. L. Bueno de las Heras, "Study of main combustion characteristics for biomass fuels used in boilers," *Fuel Process. Technol.*, vol. 103, pp. 16–26, Nov. 2012.
- [51] S. Fournel, B. Marcos, S. Godbout, and M. Heitz, "Predicting gaseous emissions from small-scale combustion of agricultural biomass fuels," *Bioresour. Technol.*, vol. 179, pp. 165–172, Mar. 2015.
- [52] R. Laryea-Goldsmith, J. Oakey, and N. J. Simms, "Gaseous emissions during concurrent

- combustion of biomass and non-recyclable municipal solid waste," *Chem. Cent. J.*, vol. 5, no. 1, p. 4, 2011.
- [53] A. J. Callejón-Ferre, J. Carreño-Sánchez, F. J. Suárez-Medina, J. Pérez-Alonso, and B. Velázquez-Martí, "Prediction models for higher heating value based on the structural analysis of the biomass of plant remains from the greenhouses of Almería (Spain)," *Fuel*, vol. 116, pp. 377–387, 2014.
- [54] L. Morales, E. Garzón, J. M. Martínez-Blanes, and P. J. Sánchez-Soto, "Thermal study of residues from greenhouse crops plant biomass," *J. Therm. Anal. Calorim.*, vol. 129, no. 2, pp. 1111–1120, Aug. 2017.
- [55] A. Hukkanen, T. Kaivosoja, O. Sippula, K. Nuutinen, J. Jokiniemi, and J. Tissari, "Reduction of gaseous and particulate emissions from small-scale wood combustion with a catalytic combustor," *Atmos. Environ.*, vol. 50, pp. 16–23, Apr. 2012.
- [56] A. Kraszkievicz, A. Przywara, and A. S. Anifantis, "Impact of Ignition Technique on Pollutants Emission during the Combustion of Selected Solid Biofuels," *Energies*, vol. 13, no. 10, p. 2664, May 2020.
- [57] V. K. Verma *et al.*, "Agro-pellets for domestic heating boilers: Standard laboratory and real life performance," *Appl. Energy*, vol. 90, no. 1, pp. 17–23, Feb. 2012.
- [58] P. Dare *et al.*, "Combustion performance of biomass residue and purpose grown species," *Biomass and Bioenergy*, vol. 21, no. 4, pp. 277–287, 2001.
- [59] J. Yanik, G. Duman, O. Karlström, and A. Brink, "NO and SO₂ emissions from combustion of raw and torrefied biomasses and their blends with lignite," *J. Environ. Manage.*, vol. 227, pp. 155–161, Dec. 2018.
- [60] L. I. Darvell, C. Brindley, X. C. Baxter, J. M. Jones, and A. Williams, "Nitrogen in Biomass Char and Its Fate during Combustion: A Model Compound Approach," *Energy & Fuels*, vol. 26, no. 11, pp. 6482–6491, Nov. 2012.
- [61] T. Nussbaumer, "Combustion and Co-combustion of Biomass: Fundamentals, Technologies, and Primary Measures for Emission Reduction †," *Energy & Fuels*, vol. 17, no. 6, pp. 1510–1521, Nov. 2003.
- [62] W. Heschel, L. Rweyemamu, T. Scheibner, and B. Meyer, "Abatement of emissions in small-scale combustors through utilisation of blended pellet fuels," *Fuel Process.*

- Technol.*, vol. 61, no. 3, pp. 223–242, Nov. 1999.
- [63] L. Wang, J. E. Hustad, Ø. Skreiberg, G. Skjevrak, and M. Grønli, “A Critical Review on Additives to Reduce Ash Related Operation Problems in Biomass Combustion Applications,” *Energy Procedia*, vol. 20, pp. 20–29, 2012.
- [64] K. Křůmal, P. Mikuška, J. Horák, F. Hopan, and K. Krpec, “Comparison of emissions of gaseous and particulate pollutants from the combustion of biomass and coal in modern and old-type boilers used for residential heating in the Czech Republic, Central Europe,” *Chemosphere*, vol. 229, pp. 51–59, Aug. 2019.
- [65] A. Prochnow, M. Heiermann, M. Plöchl, T. Amon, and P. J. Hobbs, “Bioenergy from permanent grassland - A review: 2. Combustion,” *Bioresour. Technol.*, vol. 100, no. 21, pp. 4945–4954, 2009.
- [66] J. Acosta-Motos, M. Ortuño, A. Bernal-Vicente, P. Diaz-Vivancos, M. Sanchez-Blanco, and J. Hernandez, “Plant Responses to Salt Stress: Adaptive Mechanisms,” *Agronomy*, vol. 7, no. 1, p. 18, Feb. 2017.
- [67] V. M. Gallegos-Cedillo, M. Urrestarazu, and J. E. Álvaro, “Influence of salinity on transport of nitrates and potassium by means of the xylem sap content between roots and shoots in young tomato plants,” *J. Soil Sci. Plant Nutr.*, vol. 16, no. 4, pp. 991–998, 2016.
- [68] I. Iáñez-Rodríguez, M. Á. Martín-Lara, A. Pérez, G. Blázquez, and M. Calero, “Water washing for upgrading fuel properties of greenhouse crop residue from pepper,” *Renew. Energy*, vol. 145, pp. 2121–2129, Jan. 2020.
- [69] D. Vafiadis, A. Martzopoulou, A. Denizopoulou, and V. P. Fragos, “Plant growth in greenhouses using CO₂ enrichment at high temperatures with a passive solar system,” *Acta Hortic.*, no. 1296, pp. 417–424, Nov. 2020.
- [70] H. Mamatha, N. K. Rao, K. . Shivashanrakara, R. M. Bhatt, and K. C. Pavithra, “Impact of elevated CO₂ on growth, physiology, yield, and quality of tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill) cv. Arka Ashish.,” *Photosynthetica*, vol. 52, no. 4, pp. 519–528, 2014.
- [71] Z. Yi *et al.*, “Effects of Exogenous Spermidine and Elevated CO₂ on Physiological and Biochemical Changes in Tomato Plants Under Iso-osmotic Salt Stress,” *J. Plant Growth Regul.*, vol. 37, no. 4, pp. 1222–1234, Dec. 2018.

- [72] M. J. Sánchez-González, M. C. Sánchez-Guerrero, E. Medrano, M. E. Porras, E. J. Baeza, and P. Lorenzo, "Carbon dioxide enrichment: a technique to mitigate the negative effects of salinity on the productivity of high value tomatoes," *Spanish J. Agric. Res.*, vol. 14, no. 2, p. e0903, Jun. 2016.
- [73] D. Edwards, P. Jolliffe, and D. Ehret, "Canopy profiles of starch and leaf mass per area in greenhouse tomato and the relationship with leaf area and fruit growth," *Sci. Hortic. (Amsterdam)*, vol. 125, no. 4, pp. 637–647, Jul. 2010.
- [74] E. A. Ainsworth and S. P. Long, "What have we learned from 15 years of free-air CO₂ enrichment (FACE)? A meta-analytic review of the responses of photosynthesis, canopy properties and plant production to rising CO₂," *New Phytol.*, vol. 165, no. 2, pp. 351–372, Feb. 2005.
- [75] J. J. Hanan, "Carbon Dioxide," in *Greenhouses: Advanced Technology for Protected Horticulture*, J. J. Hanan, Ed. CRC Press, 2017, pp. 521–572.
- [76] Z. Zhang, L. Liu, M. Zhang, Y. Zhang, and Q. Wang, "Effect of carbon dioxide enrichment on health-promoting compounds and organoleptic properties of tomato fruits grown in greenhouse," *Food Chem.*, vol. 153, pp. 157–163, Jun. 2014.
- [77] D. Dannehl, I. Schuch, T. Rocks, S. Huyskens-Keil, U. Schmidt, and A. Rojano-Aguilar, "CLIMATE CONDITIONS IN A CLOSED GREENHOUSE AFFECT PLANT GROWTH AND SECONDARY PLANT COMPOUNDS OF TOMATOES (*SOLANUM LYCOPERSICUM L.*)," *Acta Hortic.*, no. 952, pp. 515–522, Jun. 2012.