

Universidad Nacional de Salta
Facultad de Ciencias Exactas

- TESIS DOCTORAL -

**INCORPORACIÓN DE VALOR AGREGADO A
LA PRODUCCIÓN FRUTÍCOLA DE LA REGIÓN
SUBTROPICAL DEL LA PROVINCIA DE
SALTA CON UTILIZACIÓN DE ENERGÍAS
RENOVABLES**

Tesista: Aien Salvo

Directora: Judith Franco

Co-Director: Alfredo Pais

Asesor de tesis: Pablo Dellicompagni

Año 2023

RESUMEN

Estamos viviendo en la actualidad la mayor crisis climática que se haya evidenciado en el último tiempo, contexto en el cual comienza a ser fuertemente necesario un replanteo profundo de las conductas humanas respecto a las formas de relacionarnos con el medio ambiente, así como de nuestros tipos y maneras de consumos. Dentro de las diversas tendencias y esfuerzos orientados a la mitigación y adaptación al cambio climático aparece la alimentación sustentable entendida como aquella en donde la producción de alimentos además de ser inocuos para la salud humana también tiende en su proceso productivo a la minimización de los impactos sobre el medio ambiente. Es en función de lo antes dicho y de la identificación de la problemática ambiental y económica de pequeños productores de la zona subtropical de Salta relacionada a la pérdida de excedentes productivos, que surge la propuesta de introducir el secado solar de alimentos como una alternativa que contribuya al desarrollo agroindustrial de la región, a la innovación tecnológica en poscosecha, a la generación de valor agregado de los excedentes productivos y a la minimización de pérdidas de producción. Se desarrolló a lo largo de presente trabajo de tesis doctoral el diseño, construcción y evaluación de un secador solar - eléctrico de manera experimental y numérica computacional mediante el empleo de Simusol. Se seleccionó la banana (*Musa var. nanica*) para el proceso de desarrollo tecnológico realizándose a su vez una evaluación organoléptica del producto obtenido. El deshidratador construido fue transferido a la agrupación de mujeres de San Ramón de la Nueva Orán "YPA YVI" las cuales ya realizaban al momento del desarrollo del presente trabajo, el secado de sus excedentes productivos mediante el empleo de hornos eléctricos.

ABSTRACT

We are currently experiencing the greatest climate crisis that has been evidenced in recent times, a context in which a profound rethinking of human behavior about the ways we relate to the environment, as well as our types and ways of consumption, is becoming strongly necessary. Within the various trends and efforts aimed at mitigating and adapting to climate change the concept of sustainable food appears, understood as food production that, in addition to being safe to human health, also tends to minimize the impact on the environment in its production process. Based on the above and on the identification of the environmental and economic problems of small producers in the subtropical zone of Salta related to the loss of the production surpluses, the proposal to introduce solar food drying as an alternative that contributes to the agro-industrial development of the region, to technological innovation in post-harvest, to the generation of added value of production surpluses and to the minimization of production losses. Throughout this doctoral thesis work, the design, construction and evaluation experimentally and numerical computational using Simusol of a solar-electric dryer was developed. The banana (*Musa var. nanica*) was selected for the technological development process being made also an organoleptic evaluation of the product obtained. The dehydrator built was transferred to the women's group of San Ramón de la Nueva Orán "YPA YVI", who at the time of this work were already drying their production surplus using electric ovens.

Agradecimientos

A Pablo, sin el cual este trabajo no hubiera sido posible, por su paciencia, su infaltable compromiso, ganas de trabajo incansable y gran generosidad con el conocimiento. También por su amistad y compañerismo.

A Judith por su guía, acompañamiento y paciencia durante todo el proceso, desde su comienzo hasta su final.

A Alfredo por sus sugerencias, correcciones y contribuciones sin las cuales este trabajo no hubiera sido igual.

A Francisca Cabezas, por abrirnos sus puertas para poder realizar este trabajo, por su tenacidad y ganas incansables de salir adelante y continuar aprendiendo.

A Nahuel, mi padre y mentor, por siempre responder mis dudas e incentivarme a continuar.

A mi madre y hermanos Lihuel y Uma, por acompañarme siempre en el proceso.

A mis amigos y querencias, sin los cuales ninguna meta sería posible, Camilo, Carlos, Coli, Rodri B., Rodri C. Pablo, Manu, Gise, Joa, Fer y Ceci.

A mis compañeros y amigos del INENCO quienes hacen más ameno el día a día, Camila, Karla, Moni, Sil B., Sil M., Emi, Fito y Valentín.

A todos los que día a día trabajan por que la ciencia sea para y por el pueblo.

INDICE GENERAL

Capítulo 1. Introducción	
1.1 Contextualización general	Pág. 8
1.1.1 Contexto global de crisis climática	Pág. 8
1.1.2 Dietas sostenibles: La importancia de las frutas y verduras	Pág. 9
1.1.3 El rol de las energías renovables en la conservación de alimentos	Pág. 11
1.2 Marco contextual del presente trabajo investigativo	Pág. 12
1.3 Objetivos	Pág. 14
1.4 Actividades realizadas	Pág. 14
1.5 Proyectos que financiaron la presente tesis doctoral	Pág. 16
1.6 Contenido por capítulos	Pág. 16
1.7 Publicaciones asociadas a la presente tesis doctoral	Pág. 18
Capítulo 2. Conservación de frutas y hortalizas – Estado del arte del secado solar de alimentos: Revisión bibliográfica latinoamericana	
2.1 Métodos existentes de conservación de frutas tropicales	Pág. 20
2.2 Estado del arte del secado solar de alimentos, revisión bibliográfica latinoamericana	Pág. 22
2.2.1 Metodología: Relevamiento bibliográfico	Pág. 24
2.2.2 Distribución y tipos de artículos	Pág. 24
2.2.2.1 Estudios sobre aplicación solar	Pág. 27
2.2.2.2 Procesos de mejora de equipos solares	Pág. 31
2.2.2.3 Simulación computacional de sistemas solares térmicos	Pág. 34
Capítulo 3. Contexto productivo – Desde una mirada global hacia una mirada local	
3.1 Producción mundial y nacional de frutas tropicales	Pág. 46
3.2 Área de estudio	Pág. 48
3.2.1 Departamento Orán	Pág. 48
3.2.2 Contexto productivo local	Pág. 49
3.2.3 Asociación productiva “Ypa Yvi”	Pág. 50
Capítulo 4. Descripción del cultivo seleccionado – Banana (<i>Musa sp.</i>)	
4.1 Justificación del cultivo seleccionado	Pág. 54
4.2 Estudio de la cinética de secado <i>Musa</i> var. nanica	Pág. 57
4.2.1 Metodología empleada para la construcción de las curvas de secado	Pág. 58
4.2.2 Resultados obtenidos	Pág. 61
Capítulo 5. Secador solar híbrido propuesto	
5. Diseño y construcción del equipo de deshidratación solar	Pág. 74
5.1 Diseño del colector solar de aire	Pág. 74
5.2 Evaluación experimental del colector solar de aire	Pág. 76
5.2.1 Resultados obtenidos a partir de la evaluación experimental del colector solar de aire	Pág. 78

5.3 Dimensionamiento de la cámara de secado	Pág. 80
5.3.1 Dimensionamiento de la chimenea	Pág. 82
5.3.2 Construcción de la cámara de secado	Pág. 83
5.4 Evaluación experimental del equipo de deshidratación completo	Pág. 84
5.4.1 Evaluación experimental del colector solar de aire instalado para su destino final.	Pág. 87
5.4.2 Caracterización experimental del equipo vacío	Pág. 94
5.4.3 Caracterización experimental de equipo cargado con bandejas de agua	Pág. 99
5.4.4 Caracterización experimental del equipo cargado con banana	Pág. 105
Capítulo 6. Análisis de calidad	
6. Análisis sensorial	Pág. 113
6.1 Estudio realizado para las bananas deshidratadas solarmente	Pág. 114
6.2 Análisis de calidad	Pág. 119
6.2.1 Prueba de color	Pág. 117
6.2.2 Análisis sensorial	Pág. 120
Capítulo 7. Simulación numérica computacional	
Nomenclatura	Pág. 129
7. Introducción	Pág. 133
7.1 Modelación matemática y validación experimental del colector solar de aire	Pág. 133
7.1.1 Modelo físico y matemático	Pág. 134
7.1.2 Condiciones de borde	Pág. 136
7.1.3 Rendimiento térmico	Pág. 138
7.1.4 Resultados de la simulación	Pág. 139
7.1.5 Mediciones experimentales	Pág. 144
7.1.6 Validación del modelo	Pág. 145
7.2 Propuesta numérica de un colector rectangular a partir del modelo numérico computacional validado	Pág. 147
7.3 Evaluación de la incorporación de materiales de cambio de fase en el colector solar de aire	Pág. 150
7.3.1 Descripción del modelo de parafina	Pág. 151
7.3.2 Descripción del modelo ensamblado	Pág. 154
7.3.3 Proceso de simulación y resultados	Pág. 155
7.4 Modelación matemática y validación de la cámara de secado sin carga	Pág. 160
7.4.1 Hipótesis de modelización de la cámara vacía	Pág. 163
7.4.2 Modelo físico y matemático de la cámara vacía	Pág. 166
7.4.3 Validación experimental de la cámara sin carga.	Pág. 168
7.5 Modelación matemática y validación de la cámara de secado con carga	Pág. 169
7.5.1 Hipótesis de modelación	Pág. 170
7.5.2 Modelo térmico	Pág. 170

7.5.3 Validación experimental de la cámara con producto	Pág. 176
Capítulo 8. Transferencia tecnológica	
8. Transferencia tecnológica.	Pág. 182
Capítulo 9. Conclusiones	
9. Conclusiones	Pág. 189
Bibliografía	Pág. 199
Anexo A. Resultados de las evaluaciones experimentales del deshidratador solar.	Pág. 208
Anexo B. Modelos térmicos realizados en <i>Simusol</i>	Pág. 248
Anexo C. Sentencias utilizadas en <i>Simusol</i>	Pág. 253
Anexo D. Manual de usuario del secadero solar realizado para las mujeres de la agrupación “Ypa Yvi”	Pág. 263
Anexo E. Publicaciones asociadas al presente trabajo de tesis doctoral	Pág. 281.

- CAPITULO 1 -

INTRODUCCIÓN

1.1 Contextualización general

1.1.1 Contexto global de crisis climática.

La actual crisis climática, cada vez más tangible a través de vivencias como la última pandemia, producida por la expansión del virus SARS-CoV-2, está generando un profundo cambio alrededor del mundo respecto a nuestro estilo de vida, motivando una cada vez mayor conciencia y replanteo en nuestra forma de relacionarnos con el medio ambiente lo que nos lleva a repensar principalmente nuestras formas de consumos en términos generales, marcados por cambios profundos en nuestro estilo de vida.

Sumergidos en dicha crisis climática, y con la actual dinámica poblacional humana, la cual, si sostiene el ritmo de crecimiento, se prevé que para el año 2050 alcance unas 9.7 millones de personas (Roig Vila, 2020), emergen distintas tendencias para abordar de manera multidisciplinaria alternativas que permitan minimizar las emisiones de gases de efecto invernadero y el consiguiente aumento de la temperatura global por debajo de los 2 °C y en lo posible debajo de 1.5 °C (Acuerdo de París, 2015). Dentro de estos múltiples esfuerzos surge el concepto de alimentación sustentable, imprescindible para sostener el mencionado aumento poblacional en un marco de sostenibilidad y conciencia ambiental.

El cambio climático afecta cada vez más la agricultura mundial la cual genera a su vez impacto y presión sobre los recursos, potenciando dicho cambio climático, generándose un ciclo de retroalimentación en detrimento del medio ambiente que nos lleva a la pregunta ¿Qué debemos hacer para poder introducir cambios radicales que permitan revertir o mitigar la actual crisis climática?, es aquí que el eje alimentación se considera *“una herramienta potente para optimizar la salud de las personas y el planeta”* (Roig Vila, op. cit.). Sin embargo, dicho reto alimenticio, no puede abordarse aislado, la necesidad de una diversificación de la matriz energética, cuya dependencia sobre los combustibles fósiles vaya en disminución también es urgente.

La alimentación/ dieta sostenible es entendida como aquella que contribuyen a la vida sana, a la seguridad alimentaria y nutricional tanto de las generaciones actuales como las futuras teniendo estas una minimización en sus impactos ambientales, mediante formas productivas que permitan la protección y respeto de la biodiversidad y los ecosistemas, que sean culturalmente aceptables, económicamente justas, accesibles, asequibles y nutricionalmente adecuadas, inocuas y saludables, y permitan la optimización de los recursos naturales y humanos (FAO en Roig Vila, op cit). Dicha definición puede generar confusiones respecto a que es efectivamente una dieta sostenible, sin embargo, la literatura coincide en términos generales que debemos tender a un menor consumo de carne y lácteos, los pescados y mariscos deben ser de lugares no amenazados, mayor consumo de alimentos vegetales o de origen vegetal, disminuir la ingesta energética y la cantidad de desperdicios.

Es posible enmarcar entonces dentro de dietas sostenibles tendencias como el veganismo, vegetarianismo o el acceso a alimentos orgánicos, los cuales han dejado en el último tiempo de ser un mero esnobismo de determinadas clases sociales (Blanckstein, 2021), para convertirse en una toma de conciencia por partes de los consumidores que pretenden y exigen cada vez más acceder

a alimentos, no solo inocuos para su salud, sino también producidos procurando minimizar al máximo sus impactos sobre el ambiente y los animales.

1.1.2 Dietas sostenibles: La importancia de las frutas y verduras.

Es debido a los múltiples y diferentes puntos de vistas respecto a que se entiende por dietas sostenibles, especialmente a la hora de ser abordadas por los gobiernos en cuanto a la formulación de políticas públicas que durante el año 2019, mediante solicitud de los países a la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO) y a la Organización Mundial de la Salud (OMS), que se realizó una consulta internacional de expertos sobre dietas sostenibles (FAO y OMS, 2020) a partir de la cual se formularon 16 principios rectores acerca de que constituyen dichas dietas de forma tal que los mismos puedan ser utilizados para diferentes tipos de comunicaciones y formulaciones de políticas. Dentro de los principios rectores el punto tres destaca el consumo de las frutas y verduras en abundancia excluyendo dentro de dicha categoría la ingesta de tubérculos (FAO y OMS, 2020).

Las frutas y verduras, destacadas a su vez en el marco del año internacional de las frutas y verduras (IYFV, 2021) en cuanto a su importancia para la nutrición humana, la seguridad alimentaria y la salud, tienen una fuerte relación con el cumplimiento de los objetivos de desarrollo sostenible, ver figura 1. Las mismas son fuentes de aromas y sabores variados, tienen un alto valor nutricional mejorando la calidad de vida por los múltiples beneficios que generan; aportan vitaminas, minerales, fibra, agua y otros nutrientes requeridos en la dieta alimenticia saludable. (Leiton- Ramirez et al., año 2016). En muchos países son utilizadas para la prevención y cura de numerosas enfermedades (Ahmad et al., año 2004).

La producción mundial de estos alimentos aumentó casi la mitad entre 2000 y 2018 alcanzándose un total de 868 millones de toneladas de frutas y 1089 millones de toneladas de verduras (FAOSTAT citado en FAO 2020 - b). Las principales frutas reportadas fueron plátano, banana y cítricos como la naranja, tangerina, mandarina, limón, etc; en cuanto a las verduras, las más abundantes fueron el tomate, alliums (cebolla, ajo, chalota, puerro) y algunas del género brassica como el repollo, coliflor, brócoli, etc. (FAO, 2020 - b). El crecimiento productivo se dio en consonancia con un crecimiento en el consumo de dichas frutas el cual a nivel mundial fue del orden del 18% (Ahmad et al., año 2004).

Más del 50 % de su producción se realiza en explotaciones agrícolas de menos de 20 hectáreas siendo sustento de vida de una gran cantidad de pequeños productores (FAO, 2020 - b) los cuales, sin embargo, dependiendo de las prácticas individuales de producción, en determinados contextos pueden generar daños sobre el ambiente. La necesidad creciente de determinados alimentos sucede a la par de una producción y productividad limitadas condicionadas por las pérdidas existente de alimentos a lo largo del proceso de obtención de los mismos, pérdidas que implican además del desperdicio de los alimentos producidos, el mal aprovechamiento de los recursos implicados en dicha producción con la consiguiente generación de gases de efectos invernadero (Valencia Alonso, año 2014).



Figura 1. Relación entre las frutas y verduras y los objetivos de desarrollo sostenible. Tomado y adaptado de FAO, 2020 - b.

Entre el 25% y el 50% de los productos hortofrutícolas se pierden después de la cosecha (Yahia et al., año 2001) por múltiples causas y que en líneas generales están determinadas por las elecciones que se toman al momento de producir en cuanto a la selección de cultivos y sus patrones, por las cadenas comerciales y los canales de distribución, por las prácticas de compras y uso de los alimentos por parte de los consumidores (FAO, 2011). Influye también la inadecuada y/o ausente existencia de infraestructura para el manipuleo, almacenamiento y elaboración competente de la producción agrícola a la par del alto costo de las tecnologías de procesamiento y la falta de información o de un apropiado conocimiento técnico de los procesos (FAO, año 2004). Las pérdidas pos-cosecha suelen ser mayores en zonas tropicales y subtropicales por las condiciones climáticas prevalecientes (Yahia et al., año 2001). En el caso de productos de carácter perecederos como es el de las frutas y las verduras, existen factores que permiten y/o facilitan los procesos de descomposición como por ejemplo el ataque por insectos y microorganismos.

Lo antes dicho, reduce la eficiencia y la sostenibilidad de los sistemas de manera global, incitando la búsqueda de sistemas de comercialización en fresco más eficientes e inclusivos (FAO, 2020 - b) pero, sobre todo, y especialmente cuando se habla de pequeños productores, encontrar e innovar

sobre nuevos métodos de conservación que permitan cierta independencia de los ciclos de oferta y demanda, que prioricen el no uso de agentes químicos como ser fungicidas, pesticidas, bactericidas, etc., que busquen satisfacer en mayor medida las necesidades de consumo, y que permitan minimizar al máximo posible la generación de desperdicios en cuanto a la producción de alimentos, permitiendo finalmente la obtención de valor agregado que generen la menor huella de carbono posible.

1.1.3 El rol de las energías renovables en la conservación de alimentos.

Dentro de los múltiples ejes de abordaje que permitan modificar nuestras formas de consumo y de relacionarnos con el medio se reconoce dentro de los ODS el objetivo 7 de desarrollo sostenible “Energía asequible y no contaminante” el cual aborda tanto la seguridad energética como la migración o diversificación de matrices en función de que las mismas sean cada vez más limpias, buscando minimizar la utilización de combustibles fósiles, punto fundamental considerando que los mismos son los principales responsables de las emisiones de gases de efecto invernadero mediante su combustión.

Las energías renovables, tema estratégico a nivel mundial, pueden ser definidas como *“aquellas fuentes energéticas basadas en la utilización del sol, el viento, el agua o la biomasa vegetal o animal -entre otras-. Se caracterizan por no utilizar combustibles fósiles –como sucede con las energías convencionales-, sino recursos capaces de renovarse ilimitadamente. Su impacto ambiental es de menor magnitud dado que además de no emplear recursos finitos, no generan contaminantes. Sus beneficios van desde la diversificación de la matriz energética del país hasta el fomento a la industria nacional; y desde el desarrollo de las economías regionales hasta el impulso al turismo”* (Ministerio de economía, 2022).

Dentro de las mencionadas en el párrafo anterior, es la energía solar considerada el principal recurso renovable en los últimos años (British Petroleum, 2019) siendo histórica y ampliamente utilizada. Las tecnologías y dispositivos solares han comenzado a jugar un importante rol en el contexto de calentamiento global y cambio climático (IRENA, 2019). La implementación de tecnologías solares, en todas las escalas, promueve la disminución de la utilización de combustibles fósiles y el decrecimiento en la emisión de gases de efecto invernadero (Dellicompagni et al., 2019; Ullah et al., 2017). Su aplicación está dividida actualmente en dos grandes grupos: fotovoltaica y térmica, siendo ésta última de fácil acceso y amplia utilización a diversas escalas que van desde pequeñas - familiares a industriales (Salvo et al., 2020) siendo el deshidratado para la conservación de alimentos mediante su exposición en canchones a la radiación una de las aplicaciones más antiguas de la misma (Saravia Mathon, 2010).

En la actualidad, el desarrollo e investigación sobre métodos de conservación se realiza priorizando el no uso de agentes químicos que puedan contaminar, alterar o degradar las propiedades de los alimentos. Se buscan más bien alternativas entre distintos tipos de tratamientos

físicos que afecten la viabilidad de microorganismos permitiendo extender la vida útil del alimento tratando de modificar lo mínimo posible sus características nutricionales y organolépticas.

El secado es el proceso comercial más utilizados para la preservación de la calidad de los alimentos (Ávila Gómez et al., 2010) permitiendo simultáneamente la generación de valor agregado. Dicho proceso requiere temperaturas relativamente bajas, con el requisito de no superar determinados máximos en estas debido a la posibilidad de cocinar los productos antes de secarlos o que los mismos no se deshidraten de manera homogénea. Esta característica de la cinética del proceso permite la utilización de energía solar térmica mediante la construcción de equipos de bajo costo relativo.

El estudio y desarrollo de colectores de placa plana se viene realizando para la evaluación de su empleo en distintas circunstancias como climatización de edificios o piletas, destilación y/o calentamiento de agua, secado, entre otros. Los mismos, dependiendo del fluido caloportador empleado, pueden ser de aire o agua, siendo los primeros de uso más común debido a su diseño simple y a su fácil construcción. Si bien su eficiencia es menor comparados a los colectores de agua (Zulkifle et al., 2018), se proponen constantemente alternativas en los diseños para mejorar la misma.

Es importante destacar entonces que el conservar alimentos mediante la utilización de energía solar nos permitiría en el marco del objetivo 17 de la ONU realizar un proceso de conservación físico de alimentos que contribuya a una dieta sostenible, a la mitigación del calentamiento y el aprovechamiento de los excedentes productivos fruti-hortícolas siendo a su vez una buena alternativa para generar valor agregado a la producción en general. Por otro lado, este tipo de tecnologías de bajo costo y alta accesibilidad las convierten en disponibles aún en zonas rurales donde no lleguen servicios como electricidad y gas. El desafío es entonces el estudio de los prototipos ya desarrollados de forma tal de evaluar el desempeño en su contexto de aplicación de forma tal de incorporar mejoras o cambios pertinentes que optimicen su eficiencia dependiendo la situación climática, de la disponibilidad del recurso solar, del tipo de producto y el objetivo de su secado.

1.2. Marco contextual del presente trabajo investigativo.

La propuesta de trabajo de la presente tesis doctoral surge a partir del análisis FODA¹ que se realizó en el marco del plan de mejora competitiva del clúster de frutos tropicales (2013) de la provincia de Salta – Argentina, en el cual se identificó como una de las debilidades del sector

¹ Análisis FODA: Siglas que aluden a las fortalezas, oportunidades, debilidades y amenazas. Consiste en realizar una evaluación de los factores fuertes y débiles que en su conjunto diagnostican una situación interna, del sector frutícola del NOA en este caso, a la par de una evaluación externa a partir de la identificación de oportunidades y debilidades (Sarli et al., 2015). El análisis del sector frutícola fue realizado por el Programa de Servicios Agrícolas Provinciales (PROSAP) del que participan, en diferentes niveles, técnicos locales, facilitadores, consultores externos, representantes de instituciones vinculadas al clúster como el INTA, UNSa, asociación de productores de frutas y hortalizas, entre otros.

productivo a la exigua capacidad instalada para la generación de alternativas agroindustriales, planteándose como una línea de acción para el trabajo de dicho eje la *“promoción de la actividad agroindustrial centrándose en la difusión de las nuevas tendencias en materia de agroindustria y la gestión de apoyos para el desarrollo agroindustrial”* (PMC Cluster de Frutos Tropicales de Salta, 2010).

La incorporación de deshidratación solar se propone en función de la mencionada línea de acción, planteándose como una alternativa orientada al mejor aprovechamiento de la producción de frutas tropicales, la cual permitiría, por un lado reducir las pérdidas productivas del sector a la par de la generación de valor agregado, posibilitando la obtención de alimentos inocuos enmarcados dentro del concepto de alimentación sustentable desarrollado con anterioridad. A su vez, en el abordaje del objetivo propuesto, la utilización de tecnologías que funcionen a partir del aprovechamiento de energía solar consideradas dentro de las nuevas tendencias en materia de agroindustria, se entienden como estratégicas en el actual contexto global de crisis climática ya descrito; impulsada su elección y utilización en la existencia del plan provincial de energías renovables presentado por el gobierno de la provincia de Salta en el año 2014 (Plan Provincial de Energías Renovables, 2014).

La región subtropical del NOA Argentino surge como área de estudio en función de la problemática identificada para ser abordada. Se determina para el desarrollo de la propuesta la realización de un estudio de caso trabajándose para tal fin con el grupo de mujeres “Ypa Ivi” las cuales viene implementando la valorización de los excedentes productivo de frutas y verduras como mango, banana, papaya, palta, moringa, entre otras, mediante la realización de mermeladas y deshidratación eléctrica, desarrollando su trabajo en la localidad de Orán. Debido a las condiciones climáticas del área seleccionada para el desarrollo tecnológico, se propuso que el equipo a ser transferido funcione combinando la energía eléctrica con la solar, de manera que la agrupación de mujeres destinatarias disminuya por un lado los costos de producción asociados a la utilización de electricidad y a su vez incorporen una tecnología de tipo solar que pueda ser utilizada la mayor parte del año posible.

Se buscaron antecedentes de experiencias de secado realizadas en el departamento de Orán encontrándose únicamente citada dentro del plan de mejora competitiva del clúster de frutos tropicales (2013) la experiencia de la planta de deshidratado Solfrut la cual combina la deshidratación osmótica con la solar para la obtención de frutos secos no encontrándose mayores detalles técnicos. Debido a la escases de antecedentes de secado solar en el área de estudio, es que se investigó sobre experiencias en otras regiones fitogeográficas de las provincias de Salta y Jujuy, que si bien son realizadas bajo otro tipo de condiciones climáticas puedan ser utilizadas como referencias para el diseño del equipo aquí propuesto siendo posible nombrar el secador construido con chapa galvanizada instalado en la localidad de Luján, cercana al pueblo de Cachi - Salta (Passamai et. al., 2006), el secador-invernado para el secado de tomate perita instalado también en Cachi (Passamai et. al., 2004), el diseño y ensayo en Salta Capital de un secador solar pasivo portátil con el objeto de secar carne de llama (Echazu et.al., 2001). Entre los sectores campesinos del NOA podemos citar el desarrollo por parte de la Agencia de extensión Rural Coordinada Hornillos de un deshidratador

solar móvil de hortalizas y el Secador Solar para la puna jujeña desarrollado por Centro de Información y Tecnología (CET) – VIII Región, Chile (Cáceres et. al., 2007). En cuanto a experiencias que combinan el secado solar con otro tipo de fuentes de energía, se encontró el secador solar activo híbrido (Condorí et. al, 2008) para el secado de pimientón de dos toneladas de capacidad de carga en la localidad de San Carlos, Salta el cuál combina energía solar con aquella proveniente del quemado de biomasa, no habiéndose encontrado antecedentes de aplicaciones que utilicen secado solar – eléctrico puntualmente.

1.3. Objetivos

Objetivo general:

- ❖ Incorporar valor agregado a los excedentes de la producción de frutas de la región subtropical mediante la utilización de energías renovables.

Objetivos Específicos:

- ❖ Estudiar la oferta de la producción de frutas frescas de la región subtropical en las provincias de Salta y Jujuy identificando aquellas producciones que mayores excedentes generan.
- ❖ Relevar e indagar sobre las experiencias de transformación de productos frutícolas que han experimentado los productores de la región, en particular aquellas que utilizan energías renovables en el proceso.
- ❖ Analizar los sistemas de secado de frutas que mejor se adapten a la región climática correspondiente a la zona de estudio.
- ❖ Comparar los productos de secado obtenidos de un sistema directo y uno indirecto de secado, así como el comportamiento de las frutas durante el secado pre-tratadas mediante diferentes métodos.
- ❖ Diseñar y poner a prueba un secadero que utilice fuentes de energías renovables destinado al secado de los excedentes de las frutas que actualmente generan mayores volúmenes de los mismos.
- ❖ Estudiar la aceptación del producto desde el punto de vista organoléptico.

1.4. Actividades realizadas

- ❖ Objetivo 1: Estudiar la oferta de la producción de frutas frescas de la región subtropical en las provincias de Salta y Jujuy identificando aquellas producciones que mayores excedentes generan.
- Actividades realizadas:
 - Relevamiento de información secundaria.
 - Caracterización de la zona de estudio.
 - Entrevistas a informantes calificados (Extensionistas, prestadores de servicios agropecuarios, comercializadores, funcionarios públicos, etc.)

- Encuestas a productores.
 - Identificación y selección del cultivo con el cual trabajar en el diseño del equipo.
- ❖ Objetivo 2: Relevar e indagar sobre las experiencias de transformación de productos frutícolas que han experimentado los productores de la región, en particular aquellas que utilizan energías renovables en el proceso.
- Actividades realizadas:
 - Relevamiento de información secundaria.
 - Identificación de las experiencias que utilicen energías renovables en el proceso de transformación.
 - Visita de experiencias identificadas y entrevistas a los emprendedores.
- ❖ Objetivo 3: Analizar los sistemas de secado de frutas que mejor se adapten a la región climática correspondiente a la zona de estudio.
- Actividades realizadas:
 - Relevamiento de información secundaria.
 - Estudio del arte del secado solar en Latinoamérica.
- ❖ Objetivo 4: Comparar los productos obtenidos de un sistema directo y uno indirecto de secado, así como el comportamiento de las frutas durante el secado pretratadas mediante diferentes métodos.
- Actividades realizadas:
 - Construcción de curvas de secado en diferentes condiciones de laboratorio realizando diferentes formas de pretratado y presentación de los productos en estudio.
 - Secado comparativo en un sistema directo y uno indirecto realizándole a los productos distintos tipos de pretratamiento.
 - Evaluación del color de los productos obtenidos bajo los diferentes tipos de pretratamientos en los diferentes sistemas de secado.
- ❖ Objetivo 5: Diseñar y poner a prueba un secadero que utilice fuentes de energías renovables destinado al secado de los excedentes de las frutas tropicales que actualmente generan mayores volúmenes de los mismos.
- Actividades:

- A partir de las diferentes experiencias relevadas en el objetivo 3 se realizó el diseño del equipo de secado en etapas: Primero el sistema de colección solar, luego la cámara de secado y la chimenea, finalmente dimensionamiento del sistema auxiliar.
 - Construcción por etapas y evaluación experimental de cada una de las partes con propuestas e incorporación de mejoras.
 - Evaluación del funcionamiento con pruebas de agua libre a diferentes capacidades de carga.
 - Realización de pruebas de secado con el cultivo seleccionado pretatado y presentado con los resultados obtenidos del objetivo 4.
 - Construcción de un modelo térmico computacional del equipo que permita la evaluación de incorporación de mejoras.
- ❖ Objetivo 6: Estudiar la aceptación del producto desde el punto de vista organoléptico
- Actividades realizadas:
 - Realización de encuesta organoléptica.
 - Realización de una evaluación organoléptica de los productos obtenidos bajo los diferentes tipos de pretratamientos en los diferentes sistemas de secado.
 -

1.5 Proyectos que financiaron la presente tesis doctoral

Proyecto de vinculación tecnológica, desarrollo productivo y economía social *“Agregando valor a la producción frutí-hortícola de la región con energías renovables”*. Resolución R-Nº 1995 – 2019 del rectorado de la Universidad Nacional de Salta

PUE – Proyectos de Investigación de Unidades Ejecutoras. *“Innovaciones tecnológicas en energía y ambiente en concordancia con los objetivos de desarrollo sostenible y la agenda 2030 de naciones unidas”*. RESOL-2019-574-APN-DIR#CONICET

1.6 Contenido por capítulos

- Capítulo 1: Introducción

A lo largo de este capítulo se pretende la contextualización a nivel general el desarrollo de la presente investigación definiéndose la problemática identificada, así como la propuesta de abordaje junto a su justificación. Se presenta brevemente el estudio de caso a realizarse, así como los objetivos del trabajo detallándose las actividades que han sido realizadas.

- Capítulo 2: Conservación de frutas y hortalizas. Estado de arte del secado solar de alimentos: Revisión bibliográfica latinoamericana.

A lo largo del capítulo se detallan las diferentes tecnologías de conservación de alimentos existentes haciéndose hincapié en el secado solar, a partir del cual se presenta el estudio del estado de arte desarrollado sobre el mismo. Se evalúan múltiples experiencias de aplicación e investigación en el área temática desarrolladas en la región latinoamericana realizándose un resumen comparativo de las principales características identificadas en cada una de éstas.

- Capítulo 3: Contexto productivo. Desde una mirada global hacia una mirada local.

Se describe la producción de frutas a nivel mundial y nacional haciéndose foco para este último caso en el estudio de la producción referida a las frutas tropicales. Se describe el área de estudio del presente trabajo detallándose las vías de acceso, las características ambientales del lugar y el contexto productivo local. Finalmente se describe la agrupación objeto del estudio de caso de la presente tesis.

- Capítulo 4: Descripción del cultivo seleccionado. Banana (*Musa* sp.)

Se realiza la justificación de por qué ha sido seleccionada la banana para el desarrollo tecnológico del deshidratador solar describiéndose las principales fortalezas, oportunidades, debilidades y amenazas del sector productivo de banana. A lo largo de este capítulo se realiza el estudio de la cinética de secado de la banana bajo distintas condiciones, pretratamientos y presentaciones del producto.

- Capítulo 5: Secador solar híbrido propuesto.

Se desarrolla a lo largo del capítulo la descripción del proceso de diseño del equipo dividido en diferentes instancias. En la primera se expone el diseño y evaluación experimental del colector solar de aire. En la segunda se describe el dimensionamiento de la cámara de secado y la chimenea. La evaluación experimental del equipo en su totalidad fue a su vez dividida en diferentes etapas realizándose primero la misma con el equipo vacío, luego el equipo cargado a diferentes capacidades de carga con agua libre y en última instancia realizándose el secado de banana.

- Capítulo 6: Análisis de calidad.

En este capítulo se describe el desarrollo experimental del proceso de secado con el equipo directo el cual se realizó a la par del secado de banana en el equipo indirecto. Se exponen los resultados obtenidos a partir de la encuesta organoléptica, el análisis sensorial realizado y el análisis de color para los productos obtenidos a partir de ambos sistemas (directo e indirecto) así como los diferentes pretratamientos.

- Capítulo 7: Simulación numérica computacional.

A lo largo de este capítulo se describe el desarrollo de la simulación numérica computacional realizada en el programa Simusol. La misma fue desglosada en secciones siendo la primera parte referida al modelo del colector solar cuya validación experimental es empleada para estudiar la influencia sobre el rendimiento del equipo de la incorporación de modificaciones geométricas y materiales de cambio de fase como sistemas de acumulación térmica. Posteriormente se realiza la

simulación de la cámara de secado sin carga y con carga realizándose las respectivas validaciones experimentales.

- Capítulo 8: Transferencia tecnológica.

En este capítulo se describe el proceso de transferencia tecnología en si junto a las actividades realizadas en el marco de la misma con las mujeres de la agrupación “Ypa Ivi”.

- Capítulo 9: Conclusiones.

Capítulo de cierre y conclusiones finales.

1.7 Publicaciones asociadas a la presente tesis doctoral

Salvo A., Franco J. y Pais A. (2017). Incorporación de valor agregado a la producción frutícola de la región subtropical de la provincia de Salta y Jujuy con utilización de energías renovables. Acta de la XL Reunión de trabajo de la Asociación de Energías Renovables y Medio Ambiente. Vol 5., pp. 02.47 - 02.53. Impreso en la Argentina. ISBN 978-987-29873-0-5

Salvo A., Dellicompagni P., Sarmiento N., Franco J. y Echazú R. (2018). Simulación y validación de un secadero solar directo pasivo mediante simusol. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente Vol. 22, pp 02.73-02.83, 2018. Impreso en la Argentina. ISSN 2314-1433 - Trabajo seleccionado de Actas ASADES2018.

Salvo A., Dellicompagni P. y Franco J. (2020). Diseño, construcción y ensayo de un colector de aire trapezoidal para deshidratado de frutas. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente Vol. 24, pp 100-108, 2020 ISSN 2314-1433. ASADES 2020 EDICIÓN ESPECIAL

Salvo A., Dellicompagni P. y Franco J. (2022). Estudio numérico del performance térmico de un colector solar de aire con material de cambio de fase. Aceptada para AVERMA.

Salvo A. y Franco J. (2022). Actualización del estado de arte del secado solar de alimentos a partir de una revisión bibliográfica latinoamericana. Revista Iberoamericana de Tecnología Postcosecha, vol. 23, núm. 2, 2022. Asociación Iberoamericana de Tecnología Postcosecha, S.C., México

Salvo A., Dellicompagni P., Franco J. y Sarmiento N. (sf). Numeric simulation using simusol software and experimental validation for a novel trapezoidal solar collector. Enviado a la revista ACI Avances en Ciencias e Ingenierías.

- CAPITULO 2 -

CONSERVACIÓN DE FRUTAS Y HORTALIZAS.

ESTADO DE ARTE DEL SECADO SOLAR DE ALIMENTOS: REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA LATINOAMERICANA

1.1 Métodos existentes de conservación de frutas tropicales

Los alimentos pueden sufrir a lo largo de su ciclo productivo (cosecha, empaque, transporte, selección, etc.), modificaciones en los valores nutritivos, en la composición química, en las propiedades organolépticas, etc. En algunas situaciones, producto de su deficiente manipulación, puede verse afectada la inocuidad de los mismos por agentes físicos, químicos y/o biológicos de manera tal, que el consumo de los mismos sea dañino para la salud (García Muñoz, año 2010). Todas estas alteraciones que se dan, impactan de manera directa en su aceptabilidad, tanto por parte de los mercados, como de los consumidores.

Lo mencionado anteriormente, determina grandes pérdidas a lo largo de todo el proceso productivo, desde su obtención hasta su consumición, las cuales a la par de la necesidad creciente de alimentos, que sean a su vez saludables e inocuos, genera el apremio de encontrar alternativas para una manipulación y preservación lo más eficiente y respetuosa con el ambiente posible. En el caso de aquellos alimentos perecederos como los hortofrutícolas, cuyo deterioro se sucede de manera veloz, es necesario encontrar formas de extender su vida útil, alterando al mínimo sus propiedades nutricionales, organolépticas y de calidad, y que en lo posible puedan ser aplicadas en su lugar de producción.

La búsqueda de alternativas de conservación, además de repercutir directamente en la sustentabilidad de los sistemas agro-productivos, permite formas de regulación de la comercialización de los mismos, equilibrando la oferta y la demanda (Coronado, año 2007) en un tipo de mercado donde la producción y productividad son reducidas o limitadas (Yahia et al., año 2001), sobre todo a la hora de hablar de productos frutihortícolas los cuales están sujetos por lo general a una marcada estacionalidad y cuya producción es fuertemente dependientes de las variaciones climáticas.

Dentro de los métodos de conservación existen *“restricciones sobre el uso de agentes químicos (fungicidas, pesticidas, bactericidas, etc.) para la preservación de alimentos, los cuales comúnmente dejan residuos que pueden ser dañinos para la salud humana”*, (Coronado, 2007, pp. 99) tomando cada vez mayor importancia la utilización de métodos físicos. En la actualidad *“las tecnologías más comunes para conservación de frutas son el secado o deshidratación (secado convectivo, liofilización, deshidratación osmótica, entre otras) concentración, irradiación, atmósferas modificadas, tecnología de obstáculos, conservantes, congelación, entre otros”* (Bermudez et al. 2013, pp. 24). En la tabla 2.1 se describen brevemente los mecanismos de preservación de mayor aplicación existiendo sin embargo una gama mucho más amplia de los que aquí se detallan.

Tabla 2.1. Tecnologías de mayor aplicación para la conservación de alimentos

Tecnología de Conservación	Descripción General.
<i>Atmósfera controlada</i>	Es la combinación de refrigeración junto con el control de la concentración de oxígeno (disminución), y de anhídrido carbónico (aumento), de esta manera aumenta la conservación de los productos por periodos aproximados de 4 meses (Orjuela Castro et al., 2002)
<i>Atmósfera modificada</i>	<i>“Tiene como objetivo principal cambiar el microambiente del producto almacenado y debe considerarse como una técnica complementaria a un adecuado manejo de la temperatura y humedad relativa de almacenamiento del producto”</i> (Coronado 2007, pp. 103). Consiste en el empaque de los productos en materiales con barreras a la difusión de gases de forma tal que el ambiente gaseoso se modifique para disminuir la respiración de las frutas y hortalizas. El proceso puede ser activo o pasivo. (Ospina Meneses et al., 2008).
<i>Secado/ Deshidratación</i>	<i>“La deshidratación es un método térmico basado en la reducción del contenido de agua en alimentos, con el fin de suprimir su actividad bacteriana para su conservación durante un periodo prolongando sus propiedades nutritivas”</i> (Rodríguez Villamil et al. 2016, pp. 33) Existen múltiples tecnologías de secado entre las que se pueden mencionar deshidratación osmótica y deshidratación solar entre otras.
<i>Envasado</i>	Independientemente de la tecnología de conservación a aplicar, el envase es un elemento imprescindible, siendo en algunas situaciones la tecnología de conservación en sí. Los mismos actúan interponiéndose entre el alimento y el entorno reduciendo la incidencia de factores externos protegiendo la integridad del producto retrasando el deterioro del mismo (Catalá et al., año 2001).
<i>Irradiación</i>	Sistema físico de conservación. Proceso que se sucede en plantas de irradiación y que consiste básicamente en irradiar los alimentos con el fin de esterilizarlos eliminando los microorganismos que posean. (Coronado, año 2007).
<i>Tratamiento de calentamiento</i>	Actúan disminuyendo el ataque de microorganismos
<i>Frigoconservación</i>	Consiste en aplicar temperaturas constantes que estén por encima del punto crítico de manera tal de conservar las cualidades organolépticas, nutritivas, etc. de los productos hortofrutícolas (Cáceres et al., 2007)
<i>Sistemas físicos</i>	Aquellos que reducen o eliminan la presencia de microorganismos afectando mínimamente las características organolépticas y nutritivas de los alimentos (Herrero et al., 2006) entre los cuales se pueden mencionar irradiación, ya descrita previamente, altas presiones, ultrasonidos, pulsos de campos

	eléctricos de alta intensidad, campos magnéticos oscilantes, luz blanca de alta intensidad, entre otros (Herrero et al., op. Cit.).
<i>Liofilización</i>	<i>“Eliminación de agua de un producto por sublimación, que ocurre cuando la presión de vapor y la temperatura de la superficie de hielo se encuentran por debajo del punto triple del agua”</i> (Song et al. 2005 citado en Leiton- Ramirez et al. 2016, pp. 340).
<i>Tecnologías combinadas</i>	<i>“Conservación de alimentos mediante la aplicación de factores de estrés en combinación. La combinación deliberada e inteligente de los tratamientos para asegurar la estabilidad, inocuidad y calidad de los alimentos es un método muy efectivo para vencer las respuestas homeostáticas microbianas y al mismo tiempo retener las características nutricionales y sensoriales deseadas”. “Tecnologías relativamente simples que permiten la reutilización posterior de frutas u hortalizas semiprocadas por métodos de procesamiento convencionales para producir jugos, mermeladas, dulces, néctares y otros productos”</i> (FAO 2004, pp. 5).
<i>Recubrimientos comestibles</i>	La utilización de este tipo de tecnología comienza a tomar cada vez mayor centralismo en cuanto a la conservación de frutas puntualmente. Consiste tal como lo dice el nombre, en aplicar recubrimientos a partir de fuentes renovables en pos de disminuir la tasa de respiración y la pérdida de peso por deshidratación. (Vázquez – Briones y Guerrero – Beltrán, 2013)
<i>Aplicación de ozono</i>	El ozono aplicado en cantidades y condiciones adecuadas, permite mediante la inactivación del etileno al transformarlo en dióxido de carbono, evitar la proliferación de mohos y bacterias al ser un potente oxidante y germicida. El mismo también sirve para retardar la maduración en un 20 a 30% de las frutas. (Seminario et al., 2014; Bataller-Venta et al., 2010)

Fuente: Tabla de elaboración propia a partir de los trabajos de los autores Orjuela Castro et al. 2002; Coronado 2007; Catalá et al., 2001; Cáceres et al. 2006; Herrero et al., 2006; Leiton- Ramirez et al., 2016 y FAO, 2004; Ospina Menses et al., 2008; Vázquez – Briones y Guerrero – Beltrán, 2013; Seminario et al., 2014; Bataller – Venta et al., 2010).

Dependiendo del contexto en el cual se pretenda la conservación de productos alimenticios es que la aplicación de uno u otro método supondrá una ventaja sobre los demás. Dicho contexto estará influenciado entre otras cuestiones por el tipo de alimento, el nivel de capacitación necesario por parte de los operarios, la zona de producción, la zona climática donde se produce, el acceso a fuentes convencionales de energía, la posibilidad de contar con asesoramiento técnico y tecnológico, el destino de los productos finales, entre otras.

1.2 Estado de arte del secado solar de alimentos, revisión bibliográfica latinoamericana.

La aplicación de fuentes de energías renovables dentro del sector agro-productivo viene siendo ampliamente estudiada, principalmente como una posible alternativa, económica y accesible, que

permita solucionar el gran porcentaje de pérdidas que ha sido reportado por múltiples autores a nivel latinoamericano en dicho sector (Almeida et al., 2016; Araújo et al., 2021; Miranda y dos Santos, 2020; Guevara Blanco y Sabas Segura, 2017). Dichas pérdidas surgen como preocupación al implicar, además del desperdicio de los alimentos producidos, un mal aprovechamiento de los recursos implicados en dicha producción con los consiguientes gastos innecesarios durante el proceso, tanto económicos como ambientales y la generación de gases de efectos invernadero (Valencia Alonso, año 2014).

Entre el 25% y el 50% de los productos hortofrutícolas se pierden después de la cosecha (Yahia et al., 2001) dicho porcentaje puede estar determinado por las elecciones que se toman al momento de producir en cuanto a la selección de cultivos y sus patrones, por las cadenas comerciales y los canales de distribución, por las prácticas de compras y uso de los alimentos por parte de los consumidores (FAO, 2011). Influye también la inadecuada y/o ausente existencia de infraestructura para el manipuleo, almacenamiento y elaboración competente de la producción agrícola a la par del alto costo de las tecnologías de procesamiento y la falta de información o de un apropiado conocimiento técnico de los procesos (FAO, 2004). Las pérdidas pos-cosecha suelen ser mayores en zonas tropicales y subtropicales por las condiciones climáticas prevalecientes (Yahia et al., 2001).

Esta problemática reportada evidencia la necesidad de ampliar y profundizar el campo investigativo. En países en vía de desarrollo, la gran parte de las pérdidas se presentan en las etapas más tempranas del proceso agroindustrial como ser almacenamiento, refrigeración, y/o transporte (Barret et al. 2012 citado en García et al, 2018). El estudio de métodos para la conservación resulta una alternativa viable para reducir los porcentajes de pérdidas, evitar la degradación de dichos productos, la generación de valor agregado, la diversificación en la oferta y la independización de las variaciones estacionales en el mercado.

La conservación de alimentos tiene una implicancia directa sobre la seguridad alimentaria. (Miranda y dos Santos, 2020), dentro de los múltiples métodos que existen en la actualidad, el proceso de secado es uno de los métodos comercialmente más utilizados (Almeida et al., 2016) pudiendo aportar un valor agregado cercano al 30% (Pontin et al., 2005). Su aplicación mediante el uso de energía solar es uno de los procesos más antiguos que permite mantener las propiedades nutritivas de los alimentos. Surge como una alternativa interesante en especial para lugares aislados o sin acceso a la energía (Iriarte y Bistoni, 2016), siendo a su vez una de las formas más económicas para su realización al operar a partir de una fuente gratuita de energía como es el sol (Pontin, op.cit.).

Por otro lado, los altos precios y escasez de los combustibles fósiles han incrementado la necesidad del uso de energía solar como una fuente alternativa en los procesos de secado agrícola, especialmente en los países en desarrollo (Triphathy y Kumar, 2009 citado en Alves et al., 2019; Hernández et al., 2010; Moreno et al., 2008). Este proceso es a su vez reportado como en ascenso con un gran potencial de crecimiento, sin embargo, algunos inconvenientes que aún se suceden en la actualidad, continúa estimulando la investigación y la mejora en su aplicación (García et al., 2015).

1.1.1. Metodología: Relevamiento bibliográfico.

Se realizó un relevamiento bibliográfico, en los principales motores de búsqueda de artículos científicos, de trabajos de investigación de origen latinoamericano, referidos a la aplicación del secado solar en el sector agrícola, principalmente frutas y hortalizas. La búsqueda fue limitada para el periodo 2012-2022. Las palabras claves utilizadas para el relevamiento, así como los buscadores utilizados se encuentran detallados en la figura 2.1.

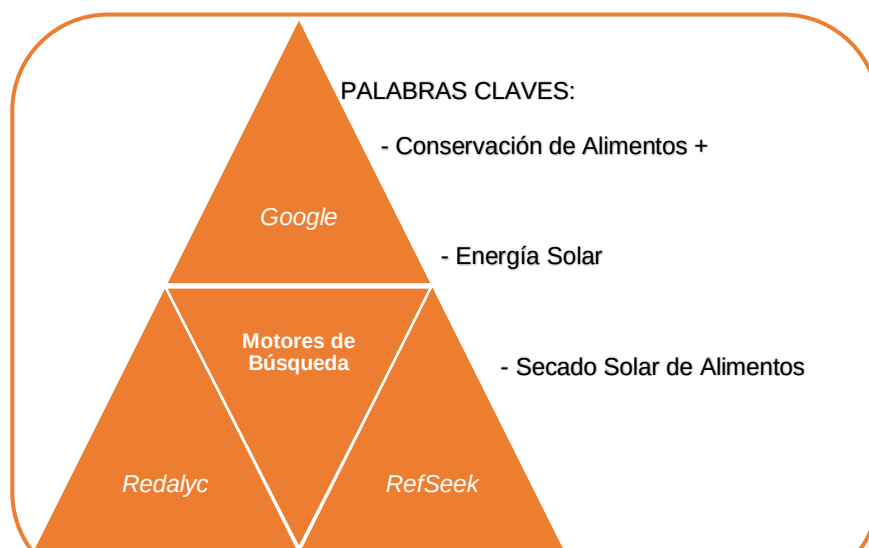


Figura 2.1. Motores de búsqueda académicos consultados y filtros aplicados.

Tanto el periodo de tiempo definido, así como las palabras claves utilizadas fueron elegidas en función de definir criterios de selección que permita acotar el gran caudal de trabajos presentes en el área; pero también en pos de que la búsqueda se encuentre restringida a los últimos avances en el área. Se incluyeron en la revisión solo artículos científicos completos excluyéndose tesis o trabajos de graduación.

Se realizó una clasificación de los artículos según el país de origen y la línea temática. Finalmente se realizó la sistematización y comparación de los principales parámetros constructivos y de rendimiento de los equipos desarrollados y probados, especificándose el autor, año, lugar del trabajo y equipo estudiado con la idea de brindar información sintetizada, ordenada y de fácil lectura.

1.1.2. Distribución y tipos de artículos

Se encontraron 51 artículos correspondientes a 7 países, ver gráfico 2.1. Si sólo se considera el número de trabajos publicados, Brasil, México y Argentina, evidencian ser los más activos en el tema, sin embargo, el trabajo de secado con energía solar es claramente materia de interés en un gran número de países y desarrollado para múltiples aplicaciones, muchas de las cuales no han sido contempladas en la presente tesis. Resalta dentro del relevamiento realizado su importancia como

alternativa de conservación para pequeños y medianos productores, especialmente aquellos que se encuentran en áreas rurales sin acceso a fuentes convencionales de energía.

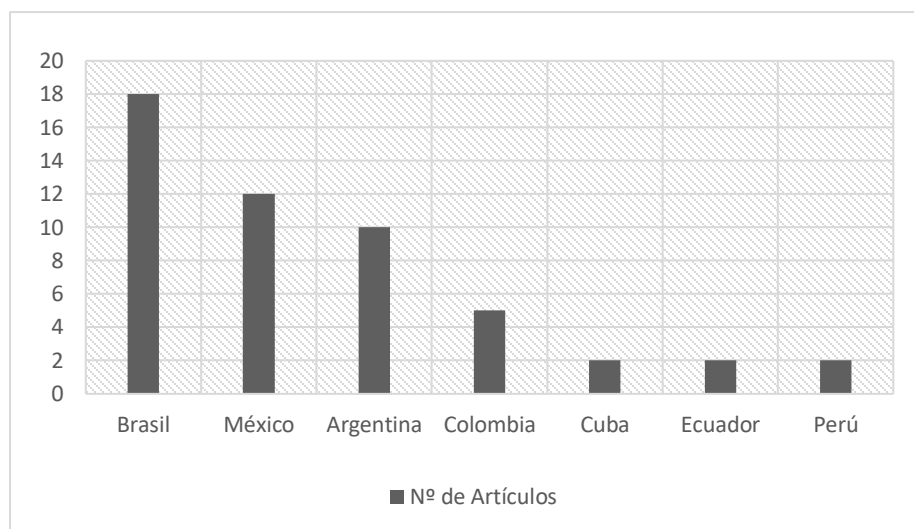


Gráfico 2.1. Distribución de artículos por país.

Distintos autores han logrado identificar una serie de ventajas, tabla 2.2, a partir de la aplicación de la deshidratación utilizando energía solar. Éstas, no son sólo comparativas respecto al método tradicional, que consiste en la exposición de los productos en canchones al aire libre, sino también respecto a otros métodos de conservación, algunos de los cuales utilizan fuentes convencionales de energía. Más allá de dichas ventajas, el aprovechamiento térmico de la energía solar para secado, también ha presentado una serie de inconvenientes, eje de trabajo para muchos investigadores que buscan mejorar la eficiencia y eficacia del proceso, así como la calidad del producto final.

Tabla 2.2. Ventajas y desventajas del secado solar reportadas en los distintos trabajos.

Ventajas	Desventajas
- Concentración de los nutrientes en los alimentos por más tiempo, mayor vida de anaquel, conservación del sabor casi inalterado por más tiempo, disminución de la probabilidad de proliferación de microorganismos, elaboración de productos diferenciados (Almeida et al, 2016). - Permite conservar los alimentos por períodos más largos de lo que habitualmente se dispone en fresco (Iriarte y Bistoni, 2016) - Propuesta adecuada de conservación para sectores rurales sin acceso a la energía, proceso de bajo costo, los equipos pueden ser contruidos	- En el método tradicional de secado los productos pueden deteriorarse debido a las condiciones climáticas adversas, también pueden contaminarse con polvo, insectos y excrementos de animales. El área y el tiempo que se requiere es grande, el secado no es uniforme lo que implica que una parte del producto puede reabsorber humedad, reduciendo su calidad y acelerando el proceso de descomposición. - Durante días nublados y frente a grandes volúmenes de producto, los sistemas de convección natural presentan limitaciones frente a los de convección forzada. (Iriarte y Bistoni, 2016).

localmente y no requieren energía fósil (Sharma et al., 1995 citado en Iriarte y Bistoni 2016). • Economía en el transporte al reducir el peso y volumen de los alimentos, método efectivo para prolongar la vida útil. Demanda de los productos secos en crecimiento. Los equipos presentan la posibilidad de ser contruoidos a diferentes escalas. (Miranda y dos Santos, 2020) • Elevada cantidad de energía por unidad de tiempo disponible para evaporación, dependiendo del equipo, posibilidad de control en el proceso de deshidratación, resguardo de los alimentos de la intemperie, incremento en la productividad en comparación al sistema tradicional, posibilidad de usarse en distintos productos según destino (Mealla-Sanchez y Morales-Olaciregui, 2017). • Favorece el transporte y la manipulación (Machado et al., 2012). • Creación de nuevos productos (Nascimento et al., 2015) • Incentivo de la promoción social mediante el desenvolvimiento tecnológico (Nunes et al., 2018) • Alternativa para incorporación de valor agregado a los residuos agrícolas (Andión - Torres et al., 2012). • Método respetuoso con las propiedades y el contenido nutricional de los alimentos (Guevara Blanco y Sabas Segura, 2017) • El proceso de secado mediante fuente de energías convencionales representa entre el 35 - 40% del costo (Guevara Blanco y Sabas Segura, 2017), al incorporar energías alternativas contribuimos a disminuir emisiones y minimizar costos. • Permite la protección contra la degradación oxidativa y enzimática, reducir el peso y el tamaño, evitar requerimientos de refrigeración durante el transporte y almacenamiento y a disponibilidad del alimento todo el año (Aspurz Tabar, 2004).	• El recurso solar es intermitente (Alves et al., 2020). • Interrupción del proceso durante la noche. • Extremadamente dependiente de las condiciones climáticas. • Alto costo inicial para su construcción, necesidad de equipo auxiliar y personal de operación capacitad. (Mealla-Sanchez y Morales-Olaciregui, 2017) • Mayor duración del proceso en comparación a equipos convencionales.
--	--

El trabajo de desarrollo tecnológico para el secado solar de alimentos, es de larga data. Si bien muchos autores presentan resultados obtenidos de su aplicación por primera vez para determinados productos y/o condiciones ambientales, en general muchos se concentran en tratar de mejorar los

aspectos negativos identificados, de forma tal de lograr un proceso lo más viables posible. Es por esto que las líneas de investigación abordadas en los diferentes artículos, son amplias, pudiendo en términos generales agruparse como se detalla en la tabla 2.3.

Tabla 2.3. Líneas generales de trabajo sobre secado solar.

Línea de trabajo	Autores
Utilización de materiales reciclable/ bajo costo	Alemeida 2016; Araujo, 2021; da Silva Bontempo et al. 2020.
Mejoras + Simulación numérica/computacional	Iriarte y Bistoni 2016, Mealla-Sanchez y Morales-Olaciregui, 2017; Soglia y Sales, 2018; Torres-Gallo et al., 2017; Mendoza et al., 2019.
Mejoras + sistemas de acumulación	Alves et al., 2019; Alves et al., 2020; Da Costa Santos et al., 2014 (1); Torres-Gallo et al., 2017; Peinado Martínez et al., 2013
Equipos híbridos	Camacho-Martinez et al., 2019; Kerkhoff et al., 2012; García et al., 2015;
Mejoras varias	Da Andrade Gomes et al., 2018; Nacimiento et al., 2015; Vieira et al., 2016, Torres et al., 2016; Mezquitillo -Bocanegra et al., 2014; Martínez y Condorí, 2017; Taco et al., 2019.
Estudio de aplicación solar	Miranda y dos Santos, 2020; Oliveros Tascón, et al. 2017; Rodríguez et al., 2015; Bistoni et al., 2015; Cruz et al., 2012; Souza Coelho et al., 2018; Finck-Pastrana 2014; Castillo Téllez et al., 2019; Recio Colmenares et al., 2019; Andión - Torres et al., 2012; Fonseca-Fonseca et al., 2019; Cabrera Escobar, et al., 2019; García et al., 2012; Gutiérrez et al., 2012; Guevara Blanco y Sabas Segura, 2017; Hernández-Gómez et al., 2017; Hernández-Rodríguez et al., 2019; Hernández Rodríguez et al., 2017; Oré García et al., 2019.
Simulación numérica	García et al., 2018; Machado et al., 2012; Salvo et al. 2018, Ramírez Sandoval, 2014.
Combinación solar + otro proceso	Campañone et al. 2013.
Secado solar con pre tratamiento	da Silveira et al., 2015, Iriarte y Bistoni, 2018; Da Costa Santos et al., 2014 (2); Nunes y Pellegrino, 2017; Nunes et al., 2018; da Silva Bontempo et al. 2020.

1.1.2.1. Estudios sobre aplicación solar

El proceso de secado solar es sumamente variable en función de las condiciones medio ambientales del lugar, del tipo de secador y del tipo de producto. Numerosos autores se dedican al estudio de las tecnologías ya desarrolladas con el fin de evaluar formas de mejorar la eficiencia, la posibilidad de aplicarse en un determinado lugar o para un producto determinado, la viabilidad a una determinada escala y producción, o simplemente con el fin de encontrar dentro de las múltiples maneras de realizar el proceso, cuas sería la más efectiva. (Finck-Pastrana, 2013; Cabrera Escobar, et al., 2019; Gutiérrez et al., 2012; Guevara Blanco y Sabas Segura, 2017; Hernández-Gómez et al., 2017; Hernández-Rodríguez et al., 2019; Hernández Rodríguez et al., 2017; Oré García et al., 2019).

Souza Coelho et al., 2018 estudiaron la viabilidad del secado de mango variedad tommy aktins en un prototipo de secador solar directo con circulación forzada de aire. En el trabajo no especifican la fuente de energía para el sistema de forzado de aire. Obtuvieron que las temperaturas dentro de los equipos de secado siempre fueron mayores que la temperatura del aire ambiente y se basaron en este parámetro para concluir que se justifica la construcción de este tipo de prototipos. Por otro lado, Fonseca-Fonseca et al., 2019, dimensionaron, construyeron y evaluaron en vacío un deshidratador para anamú (*Petiveria alliacea*). Tuvieron en cuenta las condiciones del material a secar y del ambiente obteniendo un prototipo de tipo indirecto el cual cumplió con los requisitos necesarios para el secado de esta hierba medicinal.

Bistoni et al., 2017 evaluaron un diseño de equipo directo compuesto con estantes, para esto estudiaron su desempeño sin carga y con manzanas. Realizaron la simulación térmica del equipo utilizando el software Simusol mediante la construcción del circuito análogo eléctrico y su validación. Obtuvieron un equipo de escala familiar que cumple con las expectativas permitiendo secar gran variedad de productos. La configuración del mismo con 3 compartimientos individuales, determina 3 temperaturas promedio diferentes en cada uno de ellos, pudiendo de esta manera secarse una mayor cantidad de productos.

En muchos lugares, el uso del secado solar empieza a proponerse como una manera económica de darles algún tipo de uso a los residuos agrícolas. Andión - Torres et al., 2012 estudian la aplicación del secado solar para la revalorización de algunos residuos agrícolas que de lo contrario se convierten en un problema en cuanto a cómo eliminarlos. Estos autores trabajaron con los hollejos de naranja, secándolos mediante un secador solar directo tipo gabinete compuesto por dos bandejas. Si bien hubo pequeñas variaciones en el tiempo de secado entre la bandeja de abajo respecto a la de arriba, obtuvieron de igual manera un secado idóneo, según la evaluación que realizaron en laboratorio con el fin de determinar su aprovechamiento por la industria farmacéutica.

Rodríguez et al., 2015, interesados en el aprovechamiento de los residuos de castaña de cajú (*Anacardium Occidentale*) para ser enriquecidos con el fin de ser utilizados como suplemento para ovinos, realizaron la comparación del secado de estos residuos en dos equipos solares. Utilizaron para este fin un biorreactor de secado solar (BSS) y un secador solar por convección natural (SSCN). Si bien ambos sistemas demostraron ser óptimos para el secado demostrando la viabilidad del secado solar en sí, el BSS fue el que presentó un mejor desempeño.

La comparación de sistemas es tema de interés para autores como Miranda y dos Santos, 2020, interesados en el cultivo de cebolla, el cual identificaron como una de las hortalizas de mayor importancia en el área de su estudio, evaluaron dos tipos de configuraciones de secadores, uno de tipo indirecto y otro directo, ambos de flujo activo. Obtuvieron que este tipo de secado es de fácil operación y construcción además de una alternativa sustentable, especialmente para ser aplicada en propiedades rurales de mediana y pequeña escala sumado a su fácil operación y construcción.

Cruz et al., 2012 hicieron un estudio comparativo con frutos de algarroba (*Prosopis alba*) entre el proceso de secado tradicional, realizado de dos formas distintas, con un equipo de secado solar.

Realizaron entonces la deshidratación de los frutos extendiéndolos sobre una chapa cinc, sobre un plástico negro de 200 micrones, y en un equipo solar mixto de flujo activo cargando el mismo con fruto con y sin lavado previo. Para el control del proceso, realizaron mediciones a tiempos regulares de radiación, temperaturas, variación del peso de las muestras, humedad ambiente y de cámara (únicamente para el caso del equipo solar). Como resultado obtuvieron que el sistema que mayor eficiencia tuvo fue el de secado solar no observándose diferencias significativas para las muestras que fueron previamente lavadas.

Siguiendo esta misma línea de evaluar distintos tipos de proceso de secado es que Castillo Téllez et al., 2019 realizaron la deshidratación de nuez de la india (*Anacardium occidentale*) en un equipo solar directo tipo gabinete, de manera tradicional al aire libre y en un secador convencional eléctrico. Registraron las temperaturas, humedad relativa dentro de la cámara y pérdida de peso. Como era de esperarse, el secador tipo gabinete tuvo un rendimiento mejor que a cielo abierto con tiempos de secado más cortos. Lo interesante es que el proceso en el secador tipo gabinete fueron muy cercano al horno convencional. Recio Colmenares et al, 2019, hicieron un trabajo muy similar, pero esta vez trabajando con tomate verde.

García et al. 2012 realizaron el diseño y construcción de un secador solar indirecto de flujo forzado cuyo ventilador funciona mediante energía convencional. Compararon el mismo con un equipo de similares características pero que funciona en su totalidad mediante combustibles convencionales. Para la comparación realizaron el secado de 10 kg de Uchuva (*Physalis peruviana*). Si bien el proceso en el secador solar tarda ligeramente un poco más (5 horas extras) la utilización de este tipo de equipo resultó en un ahorro energético de 250 kWh.

Algunos trabajos como el de Oliveros Tascón, et al. 2017 están más orientados a evaluar cuestiones de tipo constructivas. Estos autores estudiaron el desempeño utilizando dos tipos diferentes de plásticos para ser empleada como cubierta en secadores solares tipo túnel para el secado de café en Colombia. El motivo de su trabajo fue debido a que identificaron que muchos productores empezaron a migrar hacia la utilización de secadores mecánicos dado que las cubiertas plásticas de los equipos solares se deterioran muy rápido. De esta manera la investigación se orientó a buscar alternativas para aumentar la vida útil de los equipos e incrementar la posibilidad de ser utilizados. Obtuvieron que la utilización de plásticos reforzados no altera el tiempo de secado y es una alternativa de mejor resistencia y mayor vida útil que los plásticos tradicionales.

Si bien dentro del secado solar existen alternativas que son económicas como el caso de los secadores directos tipo gabinete; hay muchos autores que investigan la construcción de alternativas tratando de optimizar la reducción de los costos, muchos por ejemplo centrándose en el uso de materiales reciclados y/o recuperados. De esta manera logran generar alternativas orientadas principalmente al trabajo con pequeños y medianos productores, que funcionen bien y que a su vez son amigables con el medio al no utilizar combustibles fósiles durante el proceso de deshidratación, sino que también las emisiones durante el proceso de construcción de los prototipos se reduzcan lo máximo posible. Almeida et al., 2016 presentan la construcción de un equipo de tipo directo

compuesto en su totalidad por materiales reutilizados. La estructura del equipo se conforma por la carcasa de una lámpara fluorescente cuyo volumen interno es de 15 L, la cubierta se compone por vidrios de ventanas en desuso. Realizaron el testeó del secador mediante la deshidratación de uvas, si bien la capacidad es chica, los resultados fueron positivos.

Araujo et al., 2021 realizaron en base a trabajos anteriores (Pereira (2015), Góis (2016) y Lima (2018) citado por Araujo et al., 2021) la construcción y evaluación de un deshidratador directo de bajo costo, compuesto nuevamente por materiales recuperados, en este caso utilizaron para la estructura el perfil de una ventana de acero galvanizada. Construyeron dos prototipos, uno con la estructura pintada de negro y el otro sin pintar para realizar la comparación entre ambos. Secaron frutas de piña, plátano, manzana y tomate de manera exitosa observándose un mejor rendimiento en el equipo pintado de negro, probablemente debido al aumento de la absorptividad de la radiación solar.

Da Silva Bontempo et al. 2020 realizaron el estudio del rendimiento de un equipo solar convectivo tipo caja construido con materiales reutilizados para el secado de cáscara de mandarina pre tratada con etanol. Estudiaron la influencia del uso de dicho compuesto sobre la cinética de secado mediante el empleo del equipo en dos tipos de configuraciones distintas variando a su vez la cantidad de muestra y la rotación de los coolers. Entre sus conclusiones está la alta dependencia entre el tiempo de secado y la temperatura de operación del secado solar convectivo. El proceso resultó eficiente para el secado de cáscaras de mandarina siendo una opción viable para aprovechar dichos residuos. El uso de etanol en la cantidad de 4 gramos para 20 gramos de muestras permitió disminuir muy poco el tiempo de secado y solo para algunas temperaturas de secado.

Al igual que Da Silva Bontempo et al., 2020, muchos autores realizan el uso de diferentes pretratamientos estudiando su influencia sobre el secado solar. Los pretratamientos pueden estar orientado a reducir los tiempos de secado, aunque en general se piensan para mejorar la calidad del alimento después de su deshidratación, como su apariencia, aroma, sabor, etc. buscando un producto final más atractivo para la venta. da Silveira et al., 2015 estudiaron cómo influye en la cinética del secado del *Coriandrum sativum* distintos pretratamientos de blanqueamiento. Secaron muestras sin pre-tratamiento, con tratamiento de blanqueamiento por inmersión directa y tratamiento de blanqueamiento por inmersión en saco de polietileno de alta densidad. Cada prueba fue repetida tres veces durante días de diferentes condiciones. Obtuvieron las curvas de secado mediante el pesaje en intervalos constantes para los tres tipos de pretratamientos. Entre sus conclusiones estuvo el hecho de que la realización de procesos de blanqueamiento no afecta la velocidad de secado solar del coriandro siendo efectivos de todos modos para disminuir en el tenor de ácido ascórbico.

Iriarte y Bistoni, 2018 realizaron la comparación del secado de manzana sin ser pretratadas con manzanas pretratadas con solución de metabisulfito de sodio al 0.5% y con jugo de limón al 10%. Caracterizaron la cinética de secado y realizaron la construcción de modelos matemáticos que permitan predecir con buen ajuste el proceso y el comportamiento de las muestras. Para el secado emplearon el equipo ensayado en Bistoni et al., 2017, entre sus resultados estuvo que el uso de

pretratamientos mejora la calidad final del producto recomendando el uso de ácido cítrico (jugo de limón) por sobre metabisulfito de sodio debido a la toxicidad de este último.

Da Costa Santos et al., 2014 (2) trabajaron con el secado de granos residuales de *Bixa orellana* L. en forma de granos y harina. Separaron la muestra en dos, realizando por un lado el lavado del aceite residual característico de esta especie y por otro lado sin dicho lavado. El secado lo llevaron a cabo en un equipo de secado solar de tipo directo con muestras de 15 gr con el objetivo de ajustar distintos modelos matemáticos a datos experimentales en pos de obtener la difusividad efectiva durante el proceso de secado. Si bien la deshidratación fue efectiva en todos los casos, los granos sin lavar presentaron un mayor tiempo de deshidratación. Encontraron a su vez que todos los modelos estudiados representaron satisfactoriamente la cinética de secado.

Nunes y Pellegrino, 2017 y Nunes et al, 2018 secaron muestras banana plateado (*Musa spp.*). Para esto realizaron la construcción y empleo de un equipo solar indirecto forzado cuyos ventiladores funcionan mediante paneles fotovoltaicos. Las muestras de banana fueron cortadas de manera longitudinal y tratadas con jugo de limón para evitar el pardeamiento. Estudiaron la cinética del secado mediante el empleo de los modelos Page y Mata. El secado fue exitoso y el modelo Page el que mejor explicó la cinética.

1.1.2.2. Procesos de mejora de equipos solares.

Mediante la identificación de las distintas limitaciones y/o desventajas registradas a partir de la aplicación de la deshidratación solar de alimentos, es que diversos autores han incursionado en la investigación y realización de propuestas que busquen mejorar tanto el proceso en sí, como a las tecnologías ya existentes. El principal aspecto abordado es el hecho de que el proceso dependa de manera exclusiva de la radiación solar incidente, siendo de este intermitente y variable, es por esto que numerosos autores se encuentran investigando sistemas de acumulación que permitan almacenar el excedente de energía térmica durante el día para poder ser utilizada cuando la radiación incidente es insuficiente. Alves et al. (2019) realizaron en Campina Grande comparaciones en el proceso de secado de *Vigna unguiculata* L. Walp. combinando el sistema de secado de manera directa al sol en bandejas, con la colocación durante la noche de la mitad de la muestra en un acumulador de calor, y la otra mitad mantenida en laboratorio a condiciones ambiente como control. El acumulador de calor construido para el secado nocturno consistió en un sistema de tubos evacuados, la circulación del agua se realiza con una bomba conectada a un panel fotovoltaico. Si bien el proceso de secado se cumplió de manera exitosa en ambos casos, encontraron que el complemento con un sistema nocturno mejora el mismo evitando la rehidratación nocturna manteniendo buenas temperaturas en el transcurso de la misma.

En una línea muy similar, Da Costas Santos et al. (2014) (1) realizaron el secado de granos residuales de *Bixa orellana* L. combinando en este caso un secador directo durante el día y durante la noche utilizando un sistema de calentamiento auxiliar el cual acumula energía térmica durante el día. Para la prueba realizaron el pretratamiento expuesto en Da Costa Santos et al., 2014 (2). Se

comparó el secado con muestras control, las cuales durante la noche se mantuvieron en laboratorio. El sistema de acumulación consistió en un tanque de agua, la circulación del agua durante el día es mediante una bomba alimentada por un panel fotovoltaico y durante la noche por termosifón. En las muestras colocadas durante la noche en el sistema de acumulación lograron alcanzar menores rangos de temperatura y presentaron valores más altos de difusividad de humedad efectiva. Lograron construir modelos matemáticos que represente el secado de los granos de manera exitosa.

Peinado Martínez et al., 2013 diseñaron un equipo para secado de frutas y verduras compuesto por un colector solar de aire plano, un intercambiador de calor, 2 paneles solares fotovoltaicos, una batería de descarga, una bomba de agua, un solenoide para control de rejilla y la cámara de deshidratado. El funcionamiento del equipo estuvo pensado para que, durante el día, cuando hay buenas condiciones, el secado sea directamente mediante el aire caliente proveniente del colector solar plano. Cuando las temperaturas de la cámara caen, el termostato activa una bomba de agua para la circulación del agua caliente por el intercambiador de calor que provee de energía térmica al proceso. El agua es calentada mediante un termotanque de tubos evacuados. Los paneles proveen de la energía eléctrica para todos los procesos que la requieran. El sistema, si bien es complejo y de apariencia cara, lograron el secado de varios productos de manera exitosa reduciendo el tiempo de manera notable en comparación a sistemas convencionales, pudiendo ser una buena alternativa para un nivel semi industrial.

Dentro de los sistemas de acumulación, los materiales de cambio de fase despiertan un fuerte interés en distintos sistemas de aprovechamiento solar (Torres - Gallo, 2017) por lo que hay cada vez más trabajos de investigación orientados a evaluar el funcionamiento de los mismos. Torres - Gallo et al., 2017 decidieron realizar el estudio de un equipo híbrido solar - biomasa compuesto por dos colectores cuyo combustible fue cascarillas de arroz. El colector solar se construyó incorporando parafina en el mismo. Utilizaron Yuca previamente caracterizada para la experiencia realizando la simulación del proceso térmico en Matlab en función de determinar la variación de las temperaturas según la cantidad de latas con parafina incorporadas en el equipo. El sistema se validó para 5 kg de yuca y una temperatura de secado de 70 °C. Determinaron como número óptimo de latas de PCM un total de 50 para cada colector. Cuando la radiación no fue suficiente, el aire de secado se mantuvo mediante el aporte del sistema de acumulación, en $52\text{ °C} \pm 3\text{ °C}$. La temperatura del aire se mantuvo durante 45 minutos adicionales. El intercambiado de calor con el sistema auxiliar de biomasa se diseñó con un área de 0.07 m² con una capacidad de 900 gramos de cascarilla consumiéndose 4.5 kg para todo el proceso de secado.

Alves et al. (2020) realizaron en la universidad federal de Mato Grosso, Brasil la comparación entre dos equipos de secado indirectos pasivos, uno con almacenamiento térmico mediante el empleo de PCM (Phase Change Materials – por sus siglas en inglés) y otro sin almacenamiento. Secaron durante tres días banana y manzana para estudiar el comportamiento de ambos. Entre sus resultados, el uso de PCM determinó mayores temperaturas, menores humedades y mejores eficiencias de secado.

Hay muchos sitios donde el recurso solar resulta insuficiente para el secado, es por esto que son necesarios sistemas auxiliares de calor. Kerkhoff et al., 2012 determinaron y compararon la eficiencia de 3 equipos indirectos con diferentes parámetros de colección solar, sistema auxiliar y circulación pasiva de aire para la provincia de Misiones, Argentina, para el secado de cebolla de verdeo. García et al., 2015 presentaron una primera etapa de evaluación de un equipo indirecto forzado preparado para ser utilizado con un sistema auxiliar a base de biomasa. La primera etapa de evaluación realizada sólo mediante energía solar fue exitosa, siendo los resultados prometedores para el estudio del mismo equipo mediante la utilización del sistema auxiliar.

Camacho-Martinez et al. 2019 construyeron un sistema híbrido solar forzado compuesto por un colector térmico, un sistema de almacenamiento pasivo integrado por rocas pintadas de negro alojadas dentro del colector, un sistema de control de temperaturas y resistencias eléctricas para brindar estabilidad térmica alimentadas por un panel fotovoltaico de 90 vatios. Obtuvieron un prototipo con la capacidad de extender hasta 2 horas el aprovechamiento de energía solar.

Gomes et al., 2018 realizaron el estudio comparativo de dos equipos de secado indirectos forzados con algunas diferencias entre ellos en cuanto a dimensiones, cantidad de coolers para la extracción del aire y uno de ellos equipado con un condensador térmico con el fin de almacenar energía para cuando la radiación disminuya. Hicieron la evaluación experimental secando en uno piña y en el otro plátano. Aunque con el equipo con condensador térmico el tiempo de secado fue menor, 840 min versus 1200 min, la eficiencia de masa del proceso de secado y el coeficiente de correlación de los ajustes del modelo de Page a las curvas de secado fueron mejores para el equipo sin acumulación. Ambos equipos resultan económicos y viables para su construcción sobre todo pensando en productores rurales.

Nascimento et al, 2015 introdujeron el uso de arduino para el seguimiento y adquisición de datos durante el proceso de secado en un deshidratador solar. Realizaron entonces la construcción de un equipo solar indirecto de secado en el cual instalaron sensores de temperatura LM35 y sensores de humedad y temperatura DHT03 controlados por una placa Arduino Uno tomando y almacenando datos cada 30 minutos. Realizaron la evaluación en una jornada entre las 10 y las 14 obteniendo de esta manera un equipo con un sistema que permita un mejor control del proceso de secado. El equipo de bajo costo demostró buena eficiencia para el secado de productos. Siguiendo esta misma línea Vieira et al. 2016 utilizaron un Arduino para lograr condiciones de temperatura constante durante el proceso de secado en un equipo indirecto de bajo costo.

Torres et al. 2016, estudiaron el secado de nopal (*Opuntia ficus*) en un equipo de deshidratado indirecto al cual le incorporaron reflectores solares en la zona del colector. Durante el proceso de secado que se realizó durante una jornada de 8 horas obtuvieron una humedad promedio retirada del 70.97% y una temperatura promedio a la salida del colector de 36.6 °C. Realizaron a su vez el planteo matemático del proceso de secado obteniendo una correlación de $R^2 = 0.976$.

Un trabajo similar fue realizado para tomate saladette por Mezquitillo -Bocanegra et al., 2014. Compararon el secado en un equipo directo de tipo gabinete de bajo costo con y sin reflectores.

Fueron jugando con la posición angular de estos buscando maximizar el aprovechamiento de la radiación. Cuando el equipo se valoró sin el uso de los reflectores obtuvieron una variación de las temperaturas en la cámara de secado mayor encontrando que el uso de los reflectores ayuda a homogeneizar la temperatura y obtener un secado más parejo dentro de la cámara.

Martínez y Condorí, 2017 presentaron un prototipo de secador indirecto cuya estructura es muy similar a un equipo directo tipo caja. El mismo está conformado por dos colectores de matriz porosa, uno colocado en el techo del equipo con una inclinación de 22° y el otro de manera vertical al frente del mismo a 90°. El aire circula de manera forzada por ambos antes de ingresar a la cámara de secado. Realizaron mediciones de radiación, temperaturas, humedad, flujo para el cálculo de la eficiencia, obteniendo una opción viable para el secado de alimento mucho más compacta que un equipo indirecto convencional.

Taco et al., 2019 construyeron un equipo de secado cuyo sistema de colección se conformó por 15 tubos de vacío. El mismo fue pensado para el secado de ají panca en Perú. La circulación de aire es por flujo forzado accionado por una turbina cuyo suministro eléctrico se realiza mediante paneles fotovoltaicos. Luego de las evaluaciones, obtuvieron un equipo óptimo para el secado del mencionado ají logrando una reducción importante en el tiempo del proceso de secado en comparación al sistema tradicional.

Algunos investigadores se interesaron por evaluar cómo afecta en la calidad y el tiempo del secado, la combinación del sistema solar con otros tipos de procesos. Campañone et al. 2012 evaluaron el secado de manzanas y espinaca, secadas exclusivamente de manera solar, exclusivamente por microondas y mediante la combinación de ambos sistemas, este último únicamente para la manzana. La manera mixta de secado (solar – microonda) se realizó mediante una jornada de secado de 8 horas. El secado con microondas se realizó empleando distintos ciclos de potencia intermitente (50% - 30 %- 10 %). Durante la realización de los experimentos registraron temperaturas y peso de las muestras. Los productos finales se sometieron a la evaluación de la calidad sensorial mediante la determinación del color y textura. Observaron las mayores velocidades de pérdida de peso para las muestras deshidratadas en microondas 50% de potencia y la menor para las secadas solarmente. Los métodos en secado solar y/o microondas con las menores potencias resultaron ser los mejores para obtener una mejor textura; a mayores potencias en microondas más duros fueron los productos finales. Desde el punto de vista de la mejor relación proceso-calidad-costos, los métodos más recomendables resultaron ser exclusivamente solar, solar - microondas a bajas potencias y microondas solo a bajas potencias. En la tabla 2.4 se puede ver de manera sintetizada los principales parámetros característicos de las distintas experimentaciones realizadas por los autores hasta aquí citados.

1.1.2.3. Simulación computacional de sistemas solares térmicos.

El estudio de incorporación de mejoras a los equipos de secado se realiza de diversas formas entre las cuales múltiples autores optan por la utilización de modelos de simulación numérica que permita optimizar el uso de materiales y tiempo, ver tabla 2.5. Entre estos están quienes realizan

validaciones experimentales de los modelos numéricos, o quienes se limitan únicamente al estudio teórico. García et al., 2018 realizaron un modelo exclusivamente numérico de un equipo mixto para el secado de manzanas en el municipio de Nuevo Colón Boyacá, Colombia. Dicho modelo se basó en la reproducción de fenómenos de transferencia tanto de calor como de masa.

Machado et al., 2012 mediante la elaboración de un modelo numérico realizaron la simulación del secado del pseudofruto de cajú (*Anacardium occidentale* L.) en un equipo solar indirecto forzado. El modelo computacional se conformó por un sistema de ecuaciones diferenciales parciales referentes a dos fases cuya resolución numérica se hizo con el paquete DASSL (Petzold, 1989 citado por Machado et al., 2012). Realizaron a su vez la validación mediante experimentación, obteniendo un muy buen ajuste para las curvas de secado y la distribución de temperaturas dentro del equipo.

Salvo et al., 2018 presentaron la simulación y validación experimental de un secador directo tipo caja de bajo costo. Para la validación del modelo automatizaron la adquisición de datos mediante un microcontrolador Raspberry Pi. Obtuvieron un coeficiente de correlación del 0.98 entre los valores medidos y simulados. Para la validación utilizaron datos de radiación y temperatura.

Ramírez Sandoval et al., 2014 realizaron la simulación y validación experimental de un equipo solar indirecto de convección natural. La validación fue realizada en condiciones de laboratorio mediante la utilización de lámparas en vez de radiación solar para el funcionamiento del equipo. Lo interesante de este trabajo es que una de sus conclusiones fue el rediseño del colector acortando su longitud a 1.60 metros ya que el uso del modelo computacional les permitió determinar que hacerlo más largo no implicaba mejoras en la eficiencia, pero si mayores costos.

Tabla 2.4. Síntesis de los principales parámetros para los trabajos citados.

Autor	Tipo de tecnología	Lugar	Producto	Cantidad	Tiempo de secado	Parámetros de desempeño*	Dimensiones colector **
Almeida et al., 2016	Secador directo	Estado de Rio Grande del Norte, Brasil	Uva	960 gr	4 días	-	Vol. interno= 15 L Ac: 0.25m ²
Alves et al., 2020	Deshidratador indirecto de circulación pasiva. A: Con PCM como sistema de acumulación. B: Sin PCM	Cerrado Brasileño	Banana (<i>Musa spp.</i>) y manzana	-	3 días, cada día fue un experimento separado	T máx: -A: 71.7 °C y -B: 71 °C I máx: 900 W/m ² η cámara máx.: - A: 91.9 -B: 88.28	Ac: 1.15 x 1 m Vol. cámara= 0.3 x 0.3 x 0.48 m
Alves et al., 2019	Secado directo combinado con secador nocturno (intercambiador de calor con tubos evacuados)	Campina Grande, Brasil	<i>Vigna unguiculata</i> (L.) Walp.	50 gr	Control: 54.5 hs Hand: 42.5 hs	Amb.: 26.92 $\pm$ 2.9 °C and 67.87 $\pm$ 12.3% Acumulador de calor (HAND): T máx: 43 $\pm$ 3.3° C Hum Max 56.44 $\pm$ 12.6% $\bar{T}$ arriba de 40°	-
Andión – Torres et al., 2012	Secador solar directo tipo caja	Centro de investigaciones de Energía Solar, Santiago de Cuba, Cuba	Hollejos de naranja	Muestras de 0.8 Kg	Bandeja superior: 21 hs Bandeja inferior 24 hs	T máx.: 52 °C I máx.: 771.4 W/m ²	-
Araujo et al. 2021	Secador solar directo tipo caja de bajo costo	Estado de Rio Grande del Norte, Brasil	Piña, plátano pacovan, plátano plateado, manzana, tomate	106 – 264 gr	2 jornadas de secado de 7 horas cada una	T max.: 60 °C I máx.: 1619 W/m ²	Ac: 0.6 m ²
Camacho-Martínez et al., 2019	Secador solar híbrido forzado compuesto por colector térmico, sistema de almacenamiento pasivo integrado por rocas, sistema de control de temperatura y resistencias eléctricas.	Suchiapa, Chiapas, México	Frutas, verduras o semillas.	15 kg	-	T máx. colector: 65°C T máx. cámara: 50 - 55 °C	Ac: 0.89 m ² Potencia panel FV 90 W
Campañone et al., 2012	Secador solar tipo caja combinado con secado por microondas (Mw) a distintos ciclos de potencia intermitente: 50 – 30 y 10 %	La Plata, Argentina	Manzana var. Red delicious espinaca	-	Manzana: Solar 1200 min Mw10%: 170 min Mw30%: 31.5 min Mw50%: 22.5 min	T máx.: Solar: 57.6 °C Mw10%: 82.3 °C Mw30%: 123.26 °C Mw50%: 129.48 °C	Ac: 0.6 x 0.4m Microondas: equipo comercial

					Solar (480 min) + Mw10%: 50 min Mw30%: 25 min Mw50%: 10min Espinaca: Solar 180 min Mw10%: 65min Mw30%: 15 min Mw50%: 8 min	Solar + Mw10%: 45.7(solar)/106.86 °C Solar + Mw30%: 45.7(solar)/117.92 °C Solar + Mw50%: 45.7(solar)/121.06 °C	
Da Costa Santos et al., 2014 (1)	Deshidratador directo tipo caja combinado durante la noche con un sistema de acumulación de calor compuesto por un tanque de agua para continuar el proceso de secado.	Sergipe Brasil	<i>Bixa orellana L.</i> Tratamiento 1: Sin lavar Tratamiento 2: lavado	Muestras de 15 gr	840 min	$\bar{T}$ acumulador térmico: - Tratamiento 1: 49.94 °C - Tratamiento 2: 64 °C	Ac secador directo: 0.5041 m ²
Da Costa Santos et al., 2014 (2)	Secador solar directo tipo caja.	Sergipe Brasil	Granos y harinas de <i>Bixa orellana L.</i> -Tratamiento 1: Sin lavar -Tratamiento 2: lavado	Muestras de 15 gr	El tiempo de secado oscilo según las muestras y tratamientos entre 1.25 hs – 4 hs	I máx= 2620 Kj/m ² $\bar{T}$: 52.03 – 80.08 °C	Ac=0.5041 m ²
Da Silva Bontempo et al. 2020	Secador solar directo de circulación forzada. 1. Usaron la caja como bandeja 2. Utilizaron una cesta metálica como bandeja.	Brasil	Cáscara de mandarina.	1. Muestras 210 – 310 g 2. Muestras de 410 gr.	6 hs	η proceso de secado: 93.45%	Ac: 1.5 x 0.3 m
da Silveira et al., 2015	Secador solar mixto.	Universidad Federal de Campiña Grande, Brasil	Coriandro var. verdão (<i>Coriandrum sativum</i>)	-	Jornada de secado: 6:30 – 17 hs Tiempo medio de secado: 10 hs	-	Ac= 0.24 m ²
Fonseca-Fonseca et al., 2019	Secador indirecto tipo caja	Centro de investigacione s de Energía Solar,	Anamú (<i>Petiveria alliacea</i>)	-	-	T máx.: 40 – 45 °C	Ac: 3.88m ²

		Santiago de Cuba, Cuba					
García et al., 2015	Secador Indirecto con sistema auxiliar y circulación forzada	Valle Viejo, Catamarca, Argentina	Papa cortada en bastones	36 kg	18 hs	I: 200 - 800 W/m ² T. Amb.: 19 - 30 °C H. Amb.: 55 - 39% T. máx. colector: 45°C $\bar{T}$: 40°C H min. salida del colector: 2%	Ac: 7.5 m ² Dimensión cámara de secado: 7 m ³
García et al., 2012	Deshidratador solar indirecto de flujo forzado.	Cundimarca, Bogotá	Uchuva (<i>Physalis peruviana</i>)	10 kg	30 hs	η = 80% $\bar{T}$: 55 °C V aire: 3 m/s	Ac: 1.17m ²
Gomes et al., 2018	1. Secador indirecto forzado 2. Secador indirecto forzado con sistema de acumulación	Brasil	1. Piña tipo perla 2. Plátano tipo plata.	-	1. 1200 min 2. 840 min	Potencia Útil media: 1. 170.7 W 2. 171.9 W η proceso: 1. 95.1% 2. 85.21%	1. AC= 0.830 x 0.30 m 2. -
Gutiérrez et al., 2012	Secador solar indirecto de convección natural.	Santa Cruz, Argentina	Lavanda, perejil	-	Lavanda: 17 hs Perejil: 17 hs	-	Ac:1.15 x 0.46 m
Guevara Blanco y Sabas Segura, 2017	Secador solar directo	México	Fresa	-	Fresas cortadas 4 - 5 mm: 3 - 4 hs Fresas cortadas 1.5 - 2 cm: 6 - 7 hs	$\bar{T}$: 56.2 °C	-
Hernández-Gómez et al., 2017	Secador solar indirecto.	Universidad Nacional Autónoma de México, México	Mango, Manzana, Piña, Papa, Zanahoria, Pepino, Naranja, Plátano	Mango: 2 Kg Manzana: 1 kg Piña: 2 kg Papa: 349 gr Zanahoria: 66 gr Pepino: 409 gr Naranja: 365 gr Plátano: 194 gr	Mango: 10 hs Manzana: 4 hs Piña: 1 hs Papa: 6 hs Zanahoria: 6 hs Pepino: 5 hs Naranja: 6 hs Plátano: 5 hs	ΔT : 40 - 50 °C	Ac: 2 m x 1.14 m
Hernández-Rodríguez et al., 2019.	Secador solar indirecto de tipo forzado	Universidad de Quintana Roo, México.	Chicozapote (<i>Manilkara zapota</i>)	2 kg	700 - 800 min	T máx.: 59.3 °C	Ac: 1.4 m ²

Hernández Rodríguez et al., 2017	Secador solar indirecto	Universidad de Quintana Roo, México.	Zanahoria (<i>Daucus carota</i>) Pepino (<i>Cucumis sativus</i>) Pitaya (<i>Stenocereus thurberi</i>) Nopal (<i>Opuntia ficus-indica</i>) Papaya (<i>Carica papaya</i>).	1 - 1.2 kg	Nopal: 480 min. Papaya: 720 min Zanahoria: 780 min Pitaya: 610 min Pepino: 780 min	ΔT : 42 - 70 °C $\eta_{\text{máx}}$: 33.1%	Ac: 1.4 m ²
Kerkhoff et al., 2012	Secadores indirectos con horno de biomasa e intercambiador de calor: Tipo I con biomasa y extractor. Tipo II con biomasa Tipo III sin biomasa.	Misiones, Argentina	Cebollita de verdeo (<i>Allium fitolosun</i>)	3 kg/m ² de bandeja	Tipo I: 12 hs Tipo II: 10.3 hs Tipo III: 8 hs	- Sin biomasa: -Tipo I: $\eta_{\text{máx instáneo}} = 16.2\%$ $\Delta t = 11^\circ\text{C}$ -Tipo II: $\eta_{\text{máx instáneo}} = 14.1\%$ $\Delta t = 18.1$ -Tipo III: $\eta_{\text{máx instáneo}} = 19.5\%$ $\Delta t = 12.3$ - Con biomasa: -Tipo I: $\eta_{\text{máx instáneo}} = 17.3\%$ -Tipo II: $\eta_{\text{máx instáneo}} = 19.5\%$ -Tipo III: $\eta_{\text{máx instáneo}} = 25.9\%$ Flujo: Tipo I (con extractor eólico): 0.1 kg/seg Tipo II: 0.056 kg/seg Tipo III: 0.042 kg/seg	Ac: Tipo I: 2 x 4 m Tipo II: 2 x 8 m Tipo III: 1 x 5 m
Martínez y Condorí, 2017	Secador indirecto forzado compuesto por un sistema de dos colectores de material poroso	Salta, Argentina	Sin carga	-	-	$\bar{T}$ cámara: 52 °C $\bar{H}$: 21% η_{prom} : 35 % $\bar{V}$: 1.27 m/s Flujo: 0.015 m ³	Ac: 2.07 m ²
Mezquitillo - Bocanegra et al., 2014.	Secador solar indirecto tipo gabinete con y sin reflectores.	Universidad	Tomate Saladette	2 kg	Jornada de 8 a 17 hs	$I_{\text{máx.}}$: 940 W/m ² ΔT : 35 - 55°C	Ac: 0.42 x 0.41 m
Miranda y dos Santos, 2020	Secador convectivo forzado tipo bandeja, dos configuraciones.	Minas Gerais, Brasil	Cebolla	150 gr	-	T máx.: 40 - 60°C	Volumen colector: Configuración A: 1.5 x 0.3 x 0.3 m Configuración B: 1.45 x 0.1 x 0.75 m

Nascimento et al., 2015	Secador solar indirecto con microcontrolador arduino	Universidade Federal de Minas Gerais campus Montes Claros, Brasil.	Equipo vacío	-	Jornada entre 10 y 14 hs	T. máx: 78.69 °C Menor humedad relativa: 19.9%	-
Nunes et al., 2018	Secador solar indirecto forzado.	Universidade Federal de Campiã gande, Brasil	Banana plateada (<i>Musa spp.</i>)	-	840 min (14 hs)	ΔT : 40 – 60 °C $\bar{I}$: 635 W/m ²	-
Nunes y Pellegrino, 2017	Secador indirecto forzado	Campina Grande, Brasil.	Banana plata (<i>Musa spp.</i>)	Muestra: 60 – 70 gr	1200 – 1400 min	-	Ac= 1m ²
Oliveros Tascón, et al. 2017	Secador solar tipo túnel A: con plástico Agroplast N como cubierta B: con malla Europlast como cubierta.	Colombia	Café variedad castillo	14 kg/m ²	7 - 10 días	-	2 x 5 m por 0.9 altura máxima de la cámara de secado.
Oré García et al., 2019	Secador solar directo tipo caja con reflector usado como captador solar	Perú	Manzanas, Plátanos y piña	-	1 - 2 días	T max: 74 °C $\bar{I}$: 960 W/m ²	-
Rodriguez et al., 2015	1. Bioreactor secador solar (BSS) 2. Secador convectivo natural (SSCN)	Universidade Nacional de Sergipe, Brasil.	Residuos enriquecidos de Cajú (<i>Anacardium Occidentale</i>)	1: 107.69 gr 2: 53.10 gr	290 min	1. ΔT : 31.9 – 45.4 °C Hum. Relativa: 25 -61% 2. ΔT : 46 – 55.4 °C Hum. Relativa: 10 – 38% 1. V Aire: 6 m/s	-
Souza Coelho et al., 2018	Secador solar directo con circulación forzada	Brasil	Mango var. tommy aktins	-	14 hs	$\bar{T}$: 44.13 °C	-
Taco et al., 2019	Secador indirecto compuesto por 15 tubos de vacío y sistema forzado de circulación	Universidade Nacional de San Agustín de Arequipa.	Ají panca	-	10.5 hs	$\bar{T}$: 50 – 55 °C	Ac: 15 tubos de 1.80 m y diámetro 0.058 m
Téllez Margarita et al., 2019	1. Secador solar directo 2. Secado a cielo abierto.	Universidade autónoma de Campeche, México	Nuez de la india (<i>Anacardium occidentale</i>)	Muestras 12 gr	1. 17 hs 2. 25 hs	I máx = 980 W/m ² 1. T máx: 58 °C	1. Ac: 0.5 m ² 2. Plástico oscuro cubierto con malla transparente

Torres et al., 2016	Secador indirecto natural con reflectores solares en el colector	México	Nopal (<i>Opuntia ficus</i>)	-	8 hs	H retirada: 70.97 %/8 horas	-
* T: Temperatura; I: Radiación; η : eficiencia; Amb: Ambiente; Mw: microondas; η proceso de secado: humedad arrastrada; η cámara: eficiencia de masa; H: Humedad; V: Velocidad. ** Ac: Área colector							

Iriarte y Bistoni, 2016 buscaron desarrollar un secador tendalero de tipo indirecto, el cual consistió en dos módulos conectados entre sí. La parte superior cumple la función de placa absorbidora y la parte inferior es la cámara de secado conteniendo las bandejas de secado. Construyeron y validaron el modelo térmico en el programa Simusol lo que les permitió posteriormente realizar el ajuste y variación de algunos parámetros como ser la forma de circulación del aire, longitudes del colector y su correlación con temperaturas máximas y eficiencias instantáneas.

Mealla-Sánchez y Morales-Olaciregui, 2017 realizaron el balance térmico y comparación de la eficiencia térmica entre 3 configuraciones distintas de secaderos pasivos, directo, indirecto y mixto. Optaron por la construcción de los equipos en módulos acoplables para las etapas de colector, cámara de deshidratación y sistema de extracción de forma tal de poder ensamblar o desmontar las mismas dependiendo de cuál configuración de las 3 se quiera usar. Realizaron la evaluación experimental de los 3 sistemas junto a la validación computacional de los mismos a partir de mediciones de radiación y temperatura ambiente. Si bien las tres configuraciones mostraron condiciones óptimas en cuanto a temperatura y humedad para el secado de alimentos, el equipo mixto fue el que presentó un mejor comportamiento térmico, lo cual puede deberse a la gran diferencia en el área de colección.

Soglia y Sales, 2018 diseñaron mediante simulación computacional, un método de acumulación térmica solar para el secado de almendras de cacao en Brasil mediante el empleo de un sistema de concentración solar parabólica utilizando aceite mineral como fluido de transferencia, conformado por 6 espejos cuya área total fue de 0.3873 m². La energía térmica es transferida a un tanque de acumulación a partir del cual queda disponible para el secado de granos. Todos los parámetros utilizados en la simulación fueron generados por el mismo programa, COMSOL Multiphysics, el cual fue empleado para obtener medidas geométricas a partir de las cuales continuar trabajando en la mejora del sistema en general.

Mendoza et al., 2019 partieron del planteo de la reducción de la calidad de los productos secados de manera directa como problemática, proponiendo de esta manera un deshidratador mixto (solar – eléctrico) indirecto de flujo forzado para una capacidad de 50 Kg de frutas; principalmente frutilla, manzana y durazno. Mediante el empleo del programa SolidWorks realizaron el diseño del prototipo. La incorporación de resistencias eléctricas se hizo buscando que el secado pueda hacerse de manera continua, tanto durante el día como la noche, aumentando el rendimiento en cuanto a capacidad en la tasa de secado.

Tabla 2.5. Síntesis de los principales parámetros para trabajos que involucraron procesos de simulación computacional.

Autor	Tipo de tecnología	Lugar	Producto y cantidad	Software	Tiempo de simulación	Parámetros de rendimiento *	Flujo promedio**	Dimensiones colector***
Iriarte y Bistoni, 2016	Modelo térmico de un secador tendalero indirecto con acumulación y circulación forzada	Catamarca, Argentina	Pimiento para pimentón; 52.5 kg	Simusol	3 días de simulación	η instantánea máx.:58.2% I máx: 1039 W/m ² T máx: 75°C	0.17 – 0.18 Kg/s	Ac= 5.50 m x 1.80 m
Mealla-Sanchez y Morales-Olaciregui, 2017	Deshidratador solar: A. Mixto, B. Indirecto, C. Directo	Barranquilla, Colombia	-	Simusol	-	Mediciones: η_A :22% η_B :18% η_C :1.2% Simulaciones: η_A :44.3% η_B :32.5% η_C :25.5%	Mediciones: $\dot{m}_A$:0.29 $\frac{Kg}{s \cdot m^2}$ $\dot{m}_B$:0.17 $\frac{Kg}{s \cdot m^2}$ $\dot{m}_C$:0.05 $\frac{Kg}{s \cdot m^2}$ Simulaciones: $\dot{m}_A$:0.25 $\frac{Kg}{s \cdot m^2}$ $\dot{m}_B$:0.16 $\frac{Kg}{s \cdot m^2}$ $\dot{m}_C$:0.09 $\frac{Kg}{s \cdot m^2}$	$Ac_A = 2.5 \text{ m}^2$ $Ac_B = 2 \text{ m}^2$ $Ac_C = 0.5 \text{ m}^2$
Soglia y Sales, 2018	Sistema de concentración solar como forma de acumulación de energía solar térmica.	Universidad estatal de Santa Cruz - Brasil	Almendras de cacao	COMSOL Multiphysics	8 hs	I:235.72 W/m ² Tmáx aceite: 60.6 °C Volumen total de aceite minteral= 11.23 litros		Ac= 0.3873 m ²
García et al. 2018	Modelación de un secador solar mixto	Nuevo Colón, Boyacá, Colombia	Manzana	-	-	Qu= 250 W η_{col} =16.13%	-	Ac: 3 m ²
Torres – Gallo et al. 2017	Secador híbrido solar + biomasa con PCM como fuente de almacenamiento.	Montería, Colombia	Yuca, 5 kg	Matlab	Tiempo de secado: 16 hs y 11 min +- 18 min	T de secado: 70°C T aire con PCM: 52 ±3.46°C I= 116.22 ± 31.94 W/m ² η térmica del secador= 36.72%	V aire de secado= 2 m/s	Ac de cada colector= 1.12 m ²

Bistoni et al., 2017	Secador solar directo con estantes	Catamarca, Argentina	Manzana: 20kg	Simusol		T máx: 80°C I: 23.6 Mj/m ²	Q: 5 m ³ /min	Ac:2 m ²
Machado et al., 2012	Secador solar indirecto forzado	Universidad Federal de Rio Grande del Norte, Brasil.	Pseudofrutos de <i>Anacardium occidentale</i> L.	DASSL (Petzold, 1989 citado en Machado et al., 2012)	-	-	-	-
Salvo et al., 2018	Secador directo tipo caja	Salta, Argentina	Banana	SIMUSOL	38 horas	I max: 1154 W/m ² R ² : 0.9828	-	Ac: 0.6m ²
Ramírez Sandoval et al., 2014.	Secador indirecto	México	Equipo vacío	CFD		R ² : 0.9451		Longitud colector: 2 m
Peinado Martínez et al., 2013	Secador indirecto con sistema de acumulación e intercambiador de calor.	Universidad Tecnológica de Ciudad Juárez, México	Chile Morrón, Tomate, Cebolla, Ajo, Manzana, Mango, Plátano, Piña, Limón. Peso total. 2227.5 gr	Trnsys	-	-	-	Ac: 1.75 x 1.05 m
Mendoza et al., 2019	Deshidratador indirecto mixto con circulación de aire forzada	Riobamba, Provincia de Chimborazo, Ecuador	Frutilla, mazana, durazno. Capacidad máxima: 50 kg	Solid Works	-	$\bar{T}$: 50 °C	1.68 m ³ /s	Ac: 1m ²
* T: Temperatura; I: Radiación; η : eficiencia; Qu: Calor útil; PCM: Material de cambio de fase; R ² : Coeficiente de determinación ** $\dot{m}$: Flujo másico; V: Velocidad; Q: caudal *** Ac: Área colector								

- CAPITULO 3 -

CONTEXTO PRODUCTIVO

**DESDE UNA MIRADA GLOBAL HACIA UNA
MIRADA LOCAL**

3.1 Producción mundial y nacional de frutas tropicales

Si bien la producción a nivel mundial de frutas y verduras ha aumentado casi la mitad entre 2000 y 2018, la misma sigue siendo insuficiente si se compara la porción diaria recomendada por la organización mundial de la salud de 400 gr diario con la cantidad per cápita producida, la cual es actualmente de 390 gr diarios por persona (FAO, 2020-b).

Durante el año 2018 se produjeron globalmente 868 millones de toneladas de frutas representadas principalmente por las detalladas en la figura 3.1. Dentro del mercado mundial, Latinoamérica representa actualmente el 25% de la producción habiéndose reportado el banano como el principal fruto de producción global y de exportación en los países de América Latina y el Caribe; está última región identificada a su vez entre las principales consumidoras con una ingesta anual per cápita de 55 kg de frutas (FAO, 2019). En cuanto a las frutas de origen tropical, su producción mundial muestra las mismas tendencias mencionadas anteriormente, mostrando una rápida expansión que responde al aumento que se da en la demanda tanto de mercados nacionales como de exportación (FAO, 2020 - a).

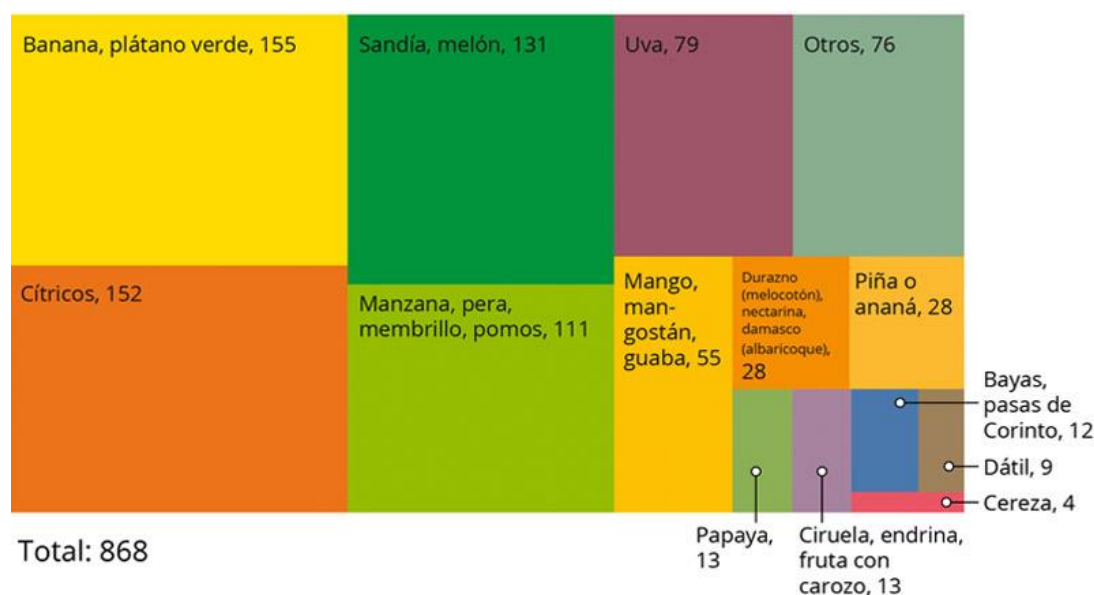


Figura 3.1. Producción mundial de frutas en millones de toneladas. Fuente: FAOSTAT citado en FAO, 2020-b.

El mercado internacional de frutas de origen tropical es relativamente reciente, adquiriendo importancia a partir del año 1970, impulsado por los avances en el transporte la tecnología, así como los cambios en la preferencia de los consumidores (Altendorf, 2017). Si bien las principales frutas citadas en el comercio internacional son el mango, la piña, la papaya y el aguacate (FAO, 2020 - a), se estima que las destinadas a dicho comercio representan solo el 5% del volumen total de producción, destinándose el resto al mercado interno. Del total de la producción se calcula que el 99% se da en los países en desarrollo, en su mayoría cultivadas por pequeños productores, en general de menos de 5 ha de tierra (Altendorf, op. cit.).

A nivel nacional, Argentina posibilitada por la gran diversidad climática y fitogeográfica que la caracteriza, presenta la capacidad de producir una amplia variedad de frutas y verduras, desde aquellas de climas tropicales hasta la de climas templados y fríos, abasteciendo mercados del MERCOSUR y el hemisferio norte (Paunero, 2012). Las regiones argentinas NOA y NEA se caracterizan por la producción de frutas tropicales, siendo las de mayor importancia la banana, palta, mango, mamón y ananá, ver figura 3.2.

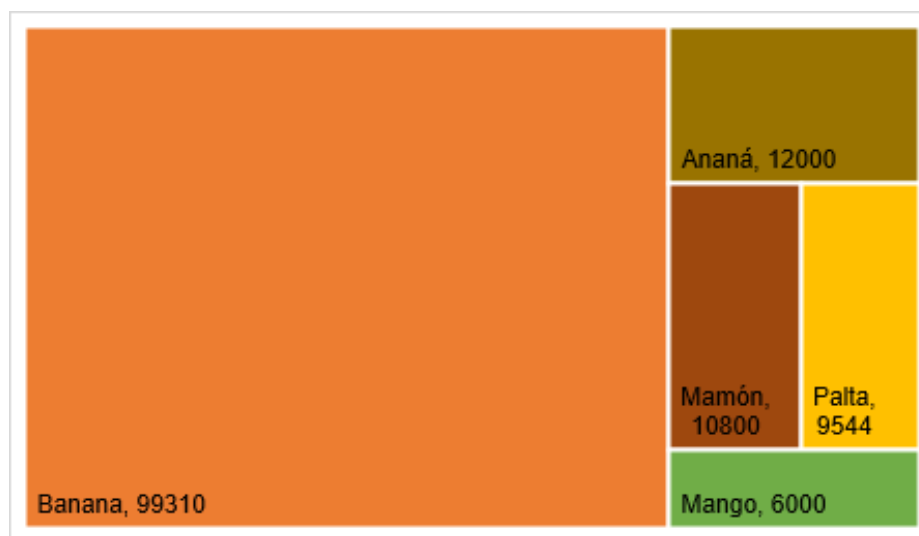


Figura 3.2. Producción nacional en toneladas de frutas tropicales. Fuente: Elaboración propia a partir de Molina, 2016.

Se registraron para el año 2016 una superficie de producción de 8026 hectáreas a nivel país de las cuales el 55.4% (Molina, 2016) se encuentran localizadas en Salta, ver tabla 3.1, provincia en la cual se obtienen 4 de las 5 frutas mayoritarias en producción, representando respectivamente la banana y el mango el 65% y el 67% de la producción total.

Tabla 3.1. Producción de las principales frutas tropicales de la provincia de Salta.

Fruta	Hectáreas destinadas a la producción en Salta	Productividad por hectárea (Tn)	Producción provincial (Tn)	Producción nacional (Tn)	Porcentaje aportado por Salta a la producción total
Banana	3600	18	64800	99310	65 %
Palta	186	8	1488	9544	16 %
Mango	310	13	4030	6000	67 %
Mamón	50	25	1250	10800	12 %
Ananá	0	40	-	12000	-
Total	40146	-	71568	125654	-

Fuente: Tabla tomada y adaptada de Molina, 2016.

Es importante mencionar que dentro de las estadísticas no se abarcan la totalidad de las frutas consumidas y producidas, habiendo proporciones de pequeños productores, como el caso de las producciones a nivel doméstico para consumo familiar, que muchas veces quedan fuera de los números oficiales (FAO, 2020 – b). Por otro lado, la selección de las frutas a ser producidas año a año depende de múltiples factores pudiendo variar los números aquí expresados.

Puntualmente, la elección de los cultivos por parte de medianos y pequeños productores está fuertemente condicionada por la estacionalidad y la demanda, respondiendo muchas veces a los pedidos del mercado central de Buenos Aires. Esta lógica productiva generalizada, ocasiona en ciertas situaciones que exista una alta competitividad ocasionada por la sobre oferta de determinadas frutas, desencadenando en la desvalorización de lo producido amenazando la rentabilidad².

3.2 Área de estudio

3.2.1 Departamento Orán

Como ya se ha mencionado anteriormente, el desarrollo de la presente tesis se realizó trabajando en conjunto con un grupo de mujeres productoras de la localidad de San Ramón de la nueva Orán al norte de la provincia de Salta, ver figura 3.3, cuyas coordenadas geográficas son entre los 63°24' y 65°04' de latitud y los 22°33' y 24°17' de longitud. La ciudad se encuentra a 276 km de la capital salteña accediéndose a la misma mediante la ruta N°50. La altitud media es de 336 m.s.n.m. y su superficie de 11.892 km² (Arroyo, 2004). San Ramón de la nueva Orán es cabecera del departamento, abarcando su área de influencia las localidades de Aguas Blancas, Hipólito Yrigoyen, Pichanal, Colonia Santa Rosa y Urundel.

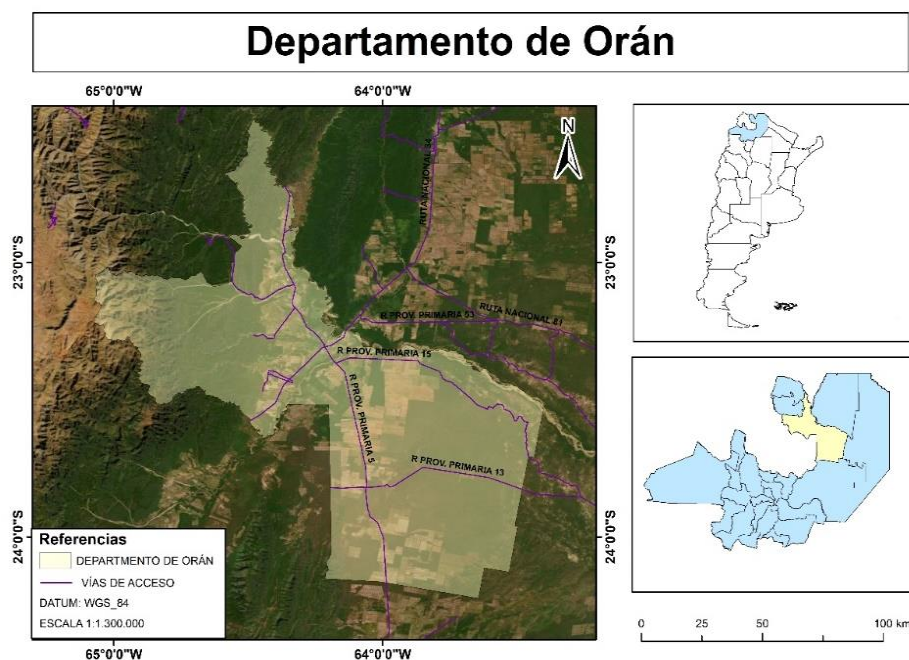


Figura 3.3. Ubicación del departamento de Orán y vías de acceso.

² Información obtenida a partir de charlas con pequeños productores de Salta.

Su fitogeografía perteneciente a las Yungas tiene representación de la selva de transición y selvas pedemontanas, el clima es subtropical con estación seca (Cwa) según la clasificación climática de Koeppen (1936). La zona tiene una baja frecuencia de heladas siendo sin embargo las mismas de gran intensidad, la temperatura media anual es de 21.4 °C y las humedades relativas promedios del 78%; los veranos son calurosos y húmedos cuyas temperaturas extremas pueden llegar hasta 45 °C, los inviernos son templados con temperaturas entre 8.3 °C a 24 °C (Arroyo, 2004). El recurso solar de la zona se detalla en la tabla 3.2.

Tabla 3.2. Recurso solar promedio del departamento Orán.

Mes	Recurso solar		Mes	Recurso Solar	
	kWh/m ²	Mj/m ²		kWh/m ²	Mj/m ²
<i>Enero</i>	182.27	656.17	<i>Agosto</i>	128.23	461.63
<i>Febrero</i>	166.91	600.88	<i>Setiembre</i>	148.3	533.88
<i>Marzo</i>	151.53	545.51	<i>Octubre</i>	154.13	554.87
<i>Abril</i>	116.22	418.39	<i>Noviembre</i>	160.55	577.98
<i>Mayo</i>	96.58	347.69	<i>Diciembre</i>	174.75	629.10
<i>Junio</i>	80.84	291.02	Anual	1664.55	5992.38
<i>Julio</i>	104.21	375.16			

Fuente: Elaboración propia a partir de Sarmiento et al. 2018.

3.2.2 Contexto productivo local

Los sistemas productivos predominantes del departamento son la caña de azúcar, concentrada en complejos agro-industriales, la producción de granos, citrus, hortalizas de primicia, frutales tropicales y forestales, distribuidos de manera porcentual como se ve en la figura 3.4 excluyendo de esta a la caña. La superficie de producción se observa fuertemente concentrada en estratos de productores medianos a grandes a excepción de la actividad hortícola que es más dispersa (Arroyo, op. cit).

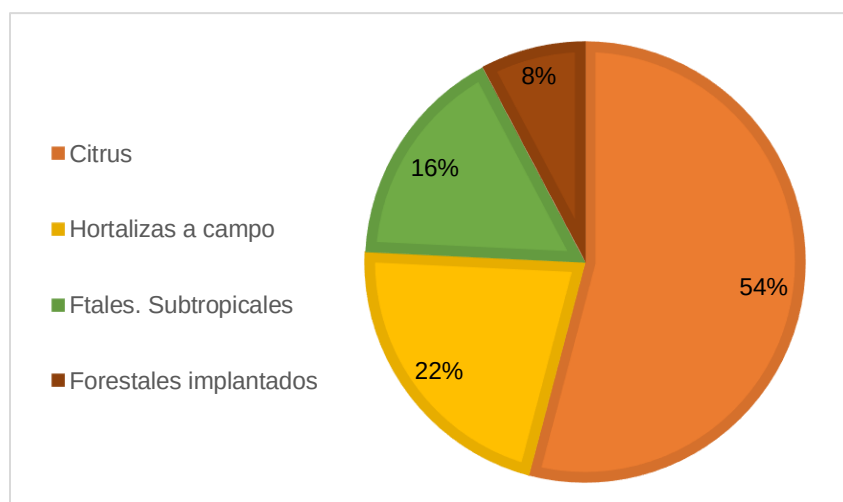


Figura 3.4. Distribución porcentual de los sistemas productivos predominantes del departamento de Orán exceptuando la caña de azúcar. Fuente: Elaboración propia a partir de Arroyo, 2004.

Dentro de la producción de frutas tropicales se consideran en esta categoría a aquellas que tienen en común que no soportan el frío, pudiendo el mismo ocasionarle daños o alteraciones en el desarrollo, especialmente cuando las temperaturas caen debajo de los 4 °C (Fagiani y Tapia, 2018). La producción de frutas tropicales en la zona se realiza principalmente entre estratos de medianos a grandes productores con un buen nivel tecnológico obteniéndose en orden decreciente de superficie productiva banana, palta y mango, ver tabla 3.3. siendo muy fuerte la presencia de banana, aunque muy variable su importancia año a año (Arroyo, op. cit.). El grueso de esta producción se destina a abastecer el mercado interno.

Tabla 3.3 Principales cultivos tropicales del departamento Orán citados para el año 2003/2004.

Cultivos Tropicales	Superficie en has.	Porcentaje
<i>Banana</i>	3200	90
<i>Palta</i>	300	8.4
<i>Mango</i>	50	1.4
<i>Total</i>	3550	100

Fuente: Briones, 2015.

3.2.3 Asociación productiva “Ypa Yvi”

La asociación productiva “Ypa Yvi”, destinataria del equipo diseñado y construido durante el desarrollo del presente trabajo, está compuesta íntegramente por mujeres de la localidad de Orán, algunas de ellas pertenecientes a la comunidad indígena “Iguopeigenda” ubicada a 5 km de la localidad. El grupo está compuesto actualmente por 6 integrantes activas siendo Francisca Cabeza la actual referente de la asociación.

“Ypa Yvi”, conocida antes como asociación civil “Ananda Marga”, depende mucho del apoyo y el acompañamiento del estado, especialmente para poder presentarse en distintas convocatorias que les permitan contar con financiamientos destinados a mejorar tanto su proceso productivo como la presentación y oferta del producto final. En su momento, el grupo de mujeres contaban con personería jurídica y espacio físico las cuales se perdieron, por un lado por la falta del mencionado acompañamiento, pero también por decisiones políticas de gobiernos de turno.

El proyecto “Ypa lvi” surge, según lo expresado por sus integrantes, buscando mejorar la situación particular de cada una de ellas luego de haber identificado, en especial las integrantes productoras, que invierten mucho tiempo y trabajo en la obtención de frutas y verduras las cuales a la hora de ser vendidas, terminan haciéndose a precios muy bajos, debido a la gran oferta/competencia que existe en el mercado. En consiguiente, identificaron algunos procesos productivos, que a partir de la generación de valor agregado a los alimentos obtenidos y/o adquiridos, les permiten diversificar la oferta, permitiéndoles vender sus producciones a precios más justos a partir de cierta

independización de las dinámicas del mercado, al ser dichos procesos de manufactura mecanismos de conservación en sí.

Es entonces que el grupo de mujeres, referenciadas en la actualidad por Francisca Cabezas, desarrollaron la marca “Ypa Ivi”, ver figura 3.5, comenzando a dedicarse a la producción de mermeladas, principalmente frutales, pero también verduras deshidratadas, las cuales son destinadas a mercados locales y provinciales, enviando algunas de sus producciones a la capital salteña.



Figura 3.5. Presentación de las frutas y verduras deshidratadas y ofertadas por YPA YVI. a) moringa b) mix de frutas de banana, papaya y mango c) mix de diversas verduras para sopa d) tomate y e) banana.

Al momento del desarrollo de este trabajo, el deshidratado de frutas tropicales y productos de estación lo realizan mediante dos hornos eléctricos, ver figura 3.6, cada uno de los cuales puede ser utilizado a media capacidad, mediante una divisoria, o capacidad completa. Los hornos llenados a su total capacidad les permiten secar 10 kg de fruta fresca a partir de los cuales, dependiendo del producto, obtienen aproximadamente 2 kg de frutos secos por horno, es decir un total de 4 kg de frutas seca por jornada de secado.

La deshidratación y producción de mermeladas, está abocada principalmente a la producción de temporada, dentro de las frutas tropicales, las que trabajan en la actualidad son banana, mango, ananá y papaya. La asociación se dedica previamente al acopio y frezado de las frutas dependiendo de si el destino final es para mermelada o para deshidratado. Solo algunas de las integrantes ponen la producción propia para el procesamiento, el resto se dedica al procesamiento de alimentos

adquiridos en mercados locales. Actualmente, la falta de espacio propio y la pandemia COVID-19, las ha llevado a trabajar en el domicilio particular de Francisca Cabezas, lo que les ha dificultado y disminuido el volumen de producción y de demanda.



Figura 3.6. Detalle de los hornos eléctricos utilizados por la agrupación “YPA IVI” para deshidratación de alimentos. a), b) y c) detalles del exterior, d) y e) detalles del interior.

Actualmente, la agrupación se mantiene optimista con la reactivación de los mercados encontrándose en búsqueda de un nuevo espacio físico en el cual poder ampliar la capacidad de secado apuntando a aumentar el actual volumen de producción a por lo menos 10 kg de producto seco por jornada. Un punto clave identificado por las integrantes, sin embargo, es la necesidad de diversificar la matriz energética utilizada por “YPA IVI” pues el secado eléctrico les genera costos muy elevados. Es en este contexto que surge la presente tesis doctoral, la cual apunta a proponer mejoras en el proceso productivo a partir de la incorporación de energía solar, que les permita por un lado disminuir los costos de producción, pero por otro desarrollar una alternativa de marketing, al comenzar a ofertar un producto obtenido a partir del empleo de energías renovables.

- CAPITULO 4 -

DESCRIPCIÓN DEL CULTIVO SELECCIONADO

BANANA (*Musa sp.*)

4.1 Justificación del cultivo seleccionado

Para el diseño, construcción y prueba del secadero híbrido de tipo indirecto propuesto, y que se desarrollará a lo largo del presente trabajo; se optó por la selección de un único alimento para ser caracterizado y deshidratado. Esto debido principalmente a que la cinética de secado es particular a cada producto y dependiente de sus características morfológicas, físicas y químicas, así como la forma de corte con la que se deshidratará y la realización o no de pretratamientos.

La determinación de trabajar con banana fue en función en primera instancia de tener en cuenta que productos trabajan la agrupación “Ypa Yvi”, que como ya se mencionó se dedican principalmente a darle valor agregado a frutas tropicales de la región. Se entendió entonces que la caracterización del secado de banana aportaría información útil para el grupo de mujeres.

Por otro lado, la banana es actualmente una de las frutas de mayor producción en la región, estando fácilmente disponible en los mercados para su estudio. Con la investigación de la aplicación de secado solar se busca aportar posibles mejoras en aspectos relacionados con la poscosecha del cultivo y el desarrollo de la agroindustria, lo cual contribuiría a la generación de un alto potencial para la zona productora de banana ubicada en el norte de nuestro país (Fagiani y Tapia, 2018).

La banana, originaria del Asia meridional tropical, se cultiva actualmente en casi todas las regiones tropicales del mundo (Molina, 2016), siendo las principales variedades introducidas en América la *Musa paradisiaca* y *Musa sapientum*. Actualmente, en las zonas tropicales de Argentina, se produce la variedad *Nanica* debido a su adaptación a las condiciones del medio (Colamarino, 2011). En Salta las principales plantaciones se ubican en los departamentos de Orán y San Martín, concentradas en estratos de medianos a grandes productores (Arroyo, op. cit.), siendo su ciclo productivo desde la floración hasta la cosecha, dependiendo de las condiciones climáticas, de entre 90 a 180 días (Fagiani y Tapia., op. cit.). Según diversos autores, la estimación de la mano de obra necesaria es de aproximadamente 1 peón cada 1 a 2 hectáreas productivas (Colamarino, op. cit.; Briones, 2015.). La producción de la zona se destina al mercado interno (Arroyo, op. cit.) cuyas principales fortalezas, oportunidades, debilidades y amenazas fueron identificadas mediante relevamiento de información secundaria (Colamarino, op cit y Fagiani op cit.) y sistematizadas en la tabla 4.1.

Tabla 4.1. Fortalezas, oportunidades, debilidades y amenazas del sector bananero de Salta.

Fortalezas	– Es la fruta más consumida en Argentina con un consumo promedio de 12 kg por habitante por año. – Las exportaciones mundiales de banano ocupan el primer lugar entre las frutas frescas, tanto en volumen como en valor. – En el último tiempo se ha generado un aumento de la competitividad del producto nacional frente a los productos importados. – La existencia de apoyo gubernamental permite la recuperación del área de producción.
-------------------	--

	- La zona productiva tiene condiciones agroclimáticas especiales que permiten la producción de banana. - La zona productora del NOA tiene un alto potencial productivo.
Oportunidades	- Existe un amplio espacio de mercado para desarrollar la producción bananera local. - En Salta existen fincas bananeras de superficies considerables con grandes posibilidades de incorporación de tecnología y muy buena capacidad de gerenciamiento. - Posibilidad de sustitución de importaciones por producción nacional, en 2009 Argentina importó 344.105 toneladas de bananas por un valor de 80 millones de dólares lo cual ejemplifica la magnitud de las mismas. - Posibilidad de mejoras notables en precios, actualmente el producto nacional tiene un valor económico 35-40% menor. - Incremento de la demanda lo que en consecuencia abre la posibilidad de aumentar la oferta. - Alto potencial productivo de la zona aún no alcanzado, mediante mejoras en la poscosecha es posible acercarse al mismo. - La introducción de mejoras tecnológicas en poscosecha puede a su vez permitir la mejora en el flujo de fondos del cultivo en hasta dos veces. - Posibilidad de incremento en los rendimientos con la incorporación de la debida innovación tecnológico. - Desarrollo de la agroindustria que permita generar valor agregado, económico y mejoramiento social con el desarrollo de emprendimientos familiares.
Debilidades	- Inexistencia de zonas productivas netamente tropicales en Argentina con ausencia de heladas. - La producción argentina de banana se realiza con menor nivel tecnológico y organización que regiones más consolidadas. - Elevadas pérdidas en poscosecha que generan a su vez la disminución del precio de venta
Amenazas	- Desventaja frente a la banana importada la cual es en general superior en calidad al producto nacional. - Probabilidad de ocurrencia de heladas o sequias. - Junto con la importación de bananas existe la probabilidad de ingreso de enfermedades inexistentes en el NOA argentino como ser la <i>Micoshparella fijiensis</i>, <i>Pesudomonas solanacearum</i>, <i>Stachylidium theobromoe</i> o la plaga Sigatoka negra. - Que se generen incrementos en los costos de producción. - Escasa disponibilidad de mano de obra calificada.

	- Competencia productiva por el avance de otros cultivos como es el caso de la caña. - Sobreoferta de banana con la consiguiente disminución de precios.
--	---

Fuente: Elaboración propia a partir de los autores Colamarino, 2011 y Fagiani y Tapia, 2018.

Las características tanto positivas como negativas, internas y externas al sector, fueron resumidas en la matriz FODA que se observar en la figura 3.1 la cual permite de manera sintética identificar lo descrito con mayor detalle en la tabla 4.1.

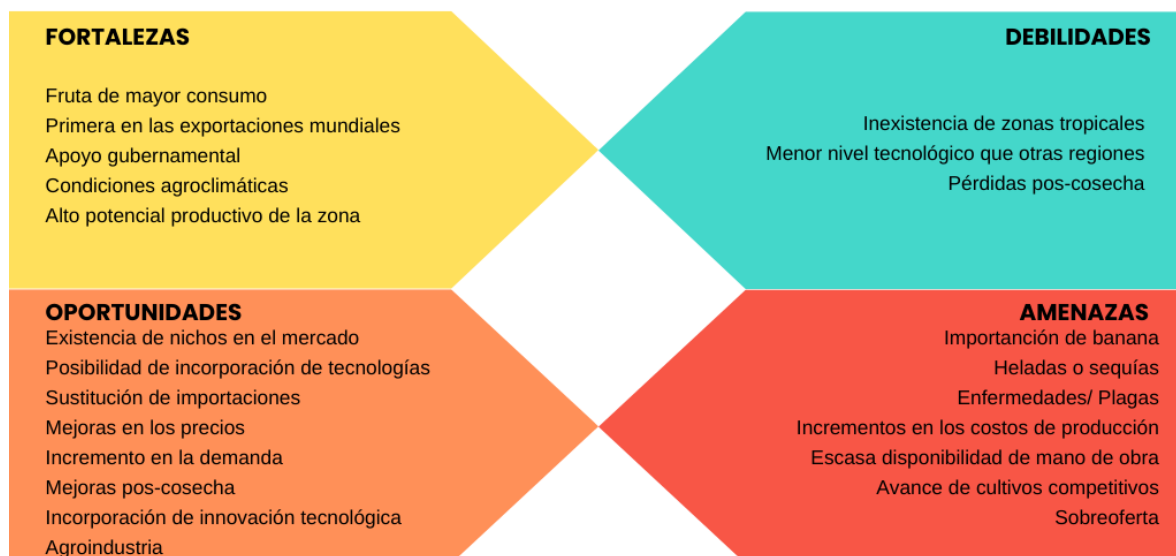


Figura 4.1. Matriz FODA. *Fuente: Elaboración propia a partir de los autores Colamarino, 2011 y Fagiani y Tapia, 2018.*

El proceso de caracterización del sector, sumado a la identificación del desarrollo de la agroindustria en torno a la producción bananera como clave en cuanto a la reducción de los desperdicios poscosecha, a la utilización integral del cultivo, y al incremento en el porcentaje aprovechado del total producido (Fagiani, op cit.), es que surgió la propuesta de la incorporación del secado solar como posible alternativa para el abordaje de la problemática, ver figura 4.2.

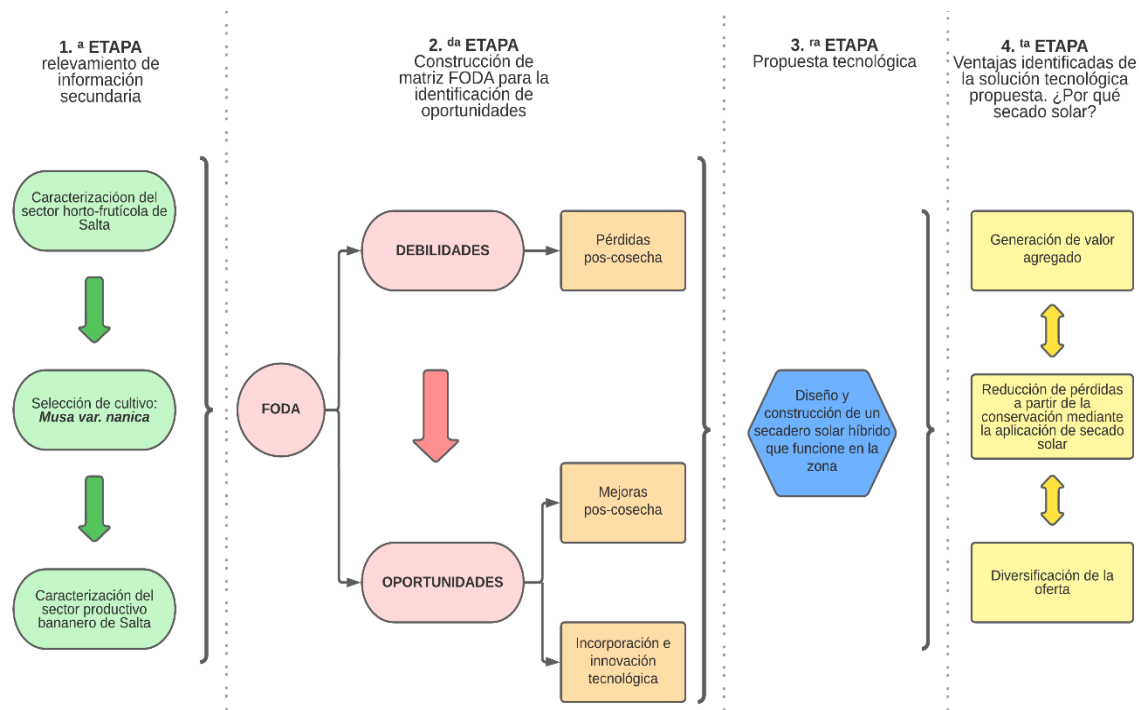


Figura 4.2. Proceso de planificación con las distintas etapas desde el relevamiento de información hasta la propuesta de incorporación de secado solar como posible alternativa orientada a la disminución de las pérdidas poscosecha. Fuente: Elaboración propia.

La agroindustria, definida por la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO por sus siglas en inglés) como las “actividades de manufacturación mediante las cuales se elaboran materias primas y productos intermedios derivados del sector agrícola” (FAO, 1997 citado en Quevedo Ramírez, 2013) implica la transformación de los productos y la generación de valor agregado para lo cual es necesario la inversión en innovación tecnológica, estando en consecuencia su desarrollo ligada a productores cuyo capitales les permita realizar dichas mejoras (Quevedo Ramírez, op cit.). La transferencia tecnológica por parte de entes públicos como las universidades permitiría democratizar la transferencia en sí, así como el acceso a la innovación tecnológica y a las oportunidades en desarrollo agroindustrial.

4.2. Estudio de la cinética de secado de *Musa var. nanica*

Es posible considerar al secado de alimento, en términos generales, como un proceso de desplazamiento y extracción de agua dentro del producto, la cual se encuentra dentro de los alimentos de dos formas principales. Por un lado, de manera higroscópica, dentro de los poros más pequeños donde las fuerzas de absorción son las que gobiernan la fijación, y por otro, de manera capilar, donde como ya el nombre lo indica, el agua es fijada por capilaridad, estando más libre y fácilmente disponible para la evaporación que la primera (Sandoval – Torres et al., 2006). Dicha capilaridad, es la que gobierna los procesos de deshidratación en sus inicios.

La descripción de los procesos de secado es compleja, debido a la multiplicidad de fenómenos, tanto externos como internos al producto, que se suceden durante los mismos entre los que se evidencian variaciones en el volumen y área de intercambio gaseoso como consecuencia de las distintas contracciones que se dan en los tejidos de los alimentos (Sandoval – Torres et al., 2006).

Cuando se trabaja con el secado de alimentos específicos, se pretende realizar simplificaciones del proceso, mediante el estudio y evaluación de su cinética en condiciones de laboratorio, buscando entender el comportamiento de dichos alimentos bajo determinados parámetros. Dicha caracterización, permite obtener información general sobre los productos en estudio, como ser la respuesta a determinadas temperaturas, el contenido de humedad inicial promedio del alimento en cuestión, la respuesta a diferentes pretratamientos, entre otros. En resumen, el estudio de la cinética de manera controlada nos da información para la caracterización general de la respuesta de dicho producto a las condiciones de secado, la cual será útil posteriormente, cuando se realice el secado a escalas y condiciones reales.

La caracterización de los productos es necesaria a su vez, para evitar afectar el contenido y la composición de las propiedades nutricionales y medicinales que muchos alimentos tienen, para lograr un secado exitoso dentro de los límites óptimos que requiere cada producto, de forma tal de aumentar el tiempo de conservación y vida útil, facilitando el transporte, manejo y almacenamiento, evitar la pérdida de productos debido a un inadecuado proceso de deshidratación que conduzca a un deterioro antes o durante el almacenamiento.

Finalmente, el estudio en condiciones específicas de secado, permite la construcción de ecuaciones matemáticas que permitan la simulación de la cinética de transferencia de agua en función de dichas condiciones. En el presente trabajo se realizó el estudio de la cinética de banana (*Musa var. nanica*) para distintas condiciones de velocidad y temperatura realizando la comparación entre distintos tipos de pretratamientos y presentaciones.

4.2.1 Metodología empleada para la construcción de las curvas de secado.

Se realizó la caracterización del proceso de deshidratación de banana en condiciones controladas para 6 casos distintos, 2 de los cuales se correspondieron con el estudio de espesores de rodajas distintos, y 4 de ellos con diferentes formas de pretratar las rodajas de banana previamente a la deshidratación. A su vez, cada caso fue estudiado a 3 velocidades de secado diferentes, ver los detalles en la tabla 4.2. Cada combinación de espesor, pretratamiento y velocidad de aire, se realizó con el único objetivo de estudiar su influencia en la cinética del secado descartándose en esta etapa la influencia de los pretratamientos sobre las características organolépticas.

La fruta estudiada fue adquirida en la localidad de Vaqueros – Salta priorizándose bananas frescas que no presenten indicios de deterioro o degradación como ser zonas que evidencien golpes, maduración excesiva, tejidos con necrosis, sobre maduración, etc. Se intentó adquirir frutas de tamaños similares siendo siempre de la variedad *nanica*.

Tabla 4.2. Tipos de pretratamientos y condiciones de secado realizadas para el estudio de la cinética de la banana var. *nanica*

Pretratamiento	Presentación	Velocidad de secado (m/s)	Propósito
Sin Pretratamiento	Rodajas de 0,5 cm de espesor cortadas transversalmente	0,6 0,8 1	-
Inmersión durante 2 - 3 minutos en solución de ácido cítrico de concentración 6 gr/litro			Ayuda a preservar el color del producto final evitando el pardeamiento, disminuye el ataque de insectos y bacterias.
Inmersión durante 5 - 10 minutos en solución de metabisulfito de Na de concentración 5 – 10 gr/litro			Se utiliza para neutralizar el oscurecimiento o pardeamiento por oxidación, minimizando por otro lado la pérdida de vitaminas A y C
Lavado del producto luego de su inmersión durante 15 minutos en vino tinto con sulfitos			La disponibilidad y accesibilidad al metabisulfito de Na de grado alimenticio resulto ser dificultosa por lo que se optó por el uso de un alimento, que contenga dicho componente en su composición y estudiarlo como forma de pretratamiento.
Inmersión durante 12 - 15 minutos en solución de bicarbonato de Na de concentración 20 gr/litro			Ampliamente utilizado como aditivo alimenticio para regular la acidez de los alimentos y como estabilizante del estado físico – químico de los mismos.
Sin Pretratamiento	Rodajas de 1 cm de espesor cortadas transversalmente		-

Las curvas de secado se realizaron en un laboratorio ubicado en la terraza del INENCO-UNSa en el cual no existe tránsito de gente que hubiera podido afectar las mediciones. Se construyó y utilizó una estufa para tal fin cuya estructura se realizó empleando una caja rectangular de Telgopor de 0,02 m de espesor que sirvió a su vez como aislación. Las dimensiones de la cámara se resumen en la figura 4.3 - a. Se equipó la estufa con una resistencia de 343 Ω y un cooler de computadora para forzar el aire, cuya velocidad fue regulada mediante el empleo de un variac, ver figura 4.3 - b.

La bandeja para la contención del producto se realizó con una malla plástica de 1 mm la cual se colgó de la balanza ubicada en una estructura por fuera y encima de la estufa.

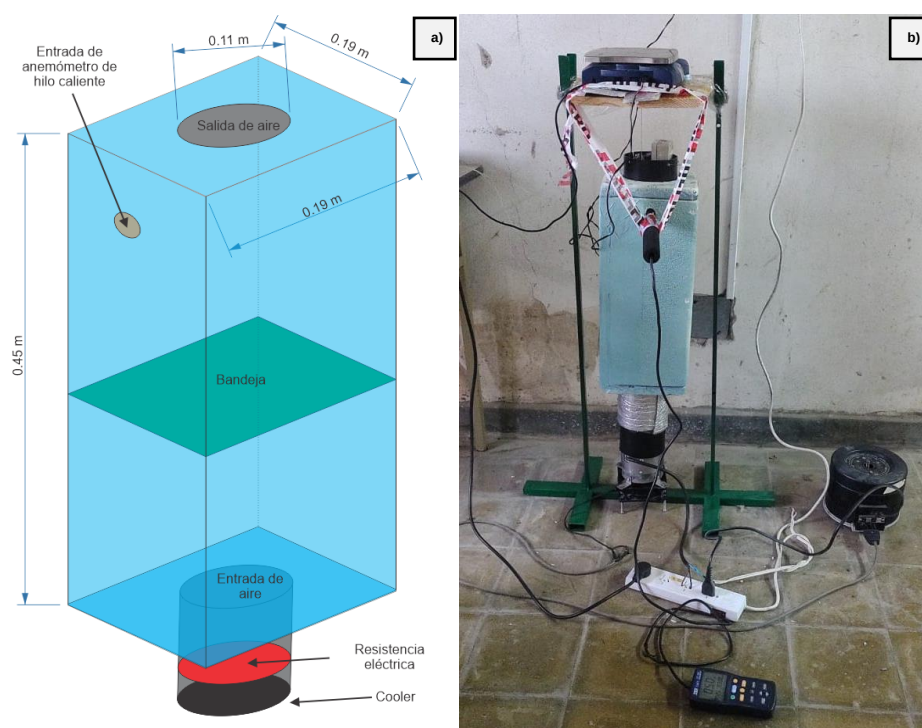


Figura 4.3. a) Esquema de la estufa de secado construida para realización de las curvas de secado. b) Foto de un experimento en proceso donde es posible ver el instrumental utilizado.

En todos los casos se empleó una muestra de 250 gr de banana registrándose la temperatura ambiente, de entrada y salida del aire a la cámara, y del producto, la humedad relativa en la cámara de secado y ambiente y el peso de la muestra. Para el registro de las variables se utilizó el instrumental detallado en la tabla 4.3.

Tabla 4.3. Instrumental utilizado para la realización de las curvas de secado

Magnitud	Instrumento de medición	Error
<i>Temperatura</i>	Data logger Pasco Capstone con sensores de temperatura	+/- 0.01 °C
<i>Humedad y temperatura</i>	Data logger Logbox-RHT con display novus.	Temperatura: +/- 0.1 °C Humedad: +/- 0.1 %
<i>Velocidad y Flujo de Aire</i>	Anemómetro de hilo caliente TES 1341	Velocidad +/- 0.01 m/s
<i>Peso</i>	Balanza Ohaus	+/- 0.1 gr
<i>Regulación de velocidad</i>	Variac	-
<i>Resistencia</i>	Multímetro	+/- 1 Ω
<i>Voltaje</i>		+/- 1 V

Cada caso de estudio se inició regulando la velocidad de aire al comienzo de las mediciones, manteniéndose constante hasta el final del proceso, el tiempo de cada ensayo fue en función de la variación del peso de la muestra, finalizándose al observarse la estabilización del mismo. Durante la construcción de las curvas se consideraron las siguientes hipótesis de trabajo:

- Se consideró un modelo difusivo en el cual se despreciaron las contracciones del fruto y la convección superficial (Sandoval-Torres, 2006).
- La superficie del material a ser secado se encuentra en equilibrio térmico con el aire circundante durante el proceso (Queiroz et al., 2001).
- La migración interna del agua ocurre por difusión líquida (Queiroz et al, 2001)
- El coeficiente de difusión se consideró constante y homogéneo durante todo el proceso de secado (Queiroz et al., 2001)
- El contenido de humedad inicial se distribuye dentro del producto de manera homogénea.
- Las bananas secadas son consideradas como un cilindro infinito.
- Se despreciaron las diferencias morfológicas y de madurez entre los frutos sobre el proceso de secado considerándose homogéneos.

4.2.2 Resultados obtenidos

En los gráficos 4.1, 4.2 y 4.3 es posible observar las curvas de secado para los distintos pretratamientos, a velocidades de secado de 0.6, 0.8 y 1 m/s respectivamente, obtenidas a partir de relacionar la variación del peso medido en gramos y la humedad en base húmeda (X_{wb}), calculada aplicando la ecuación 4.1, en función del tiempo.

$$X_{wb} = \frac{(M_o - M_d)}{M_o} = \frac{M_w}{M_o} \times 100 \quad \text{Ecuación 4.1}$$

Donde:

X_{wb} : Contenido de humedad en base húmeda (gr agua/gr producto húmedo)

M_o : Masa inicial de materia sin secar (gr)

M_d : Masa de la materia seca en el producto (gr)

M_w : Cantidad de humedad en el producto húmedo (gr)

Como ya se ha mencionado anteriormente, para todas las situaciones la masa inicial fue de 250 gr detallándose en la tabla 4.4 las humedades en base húmeda inicial para cada caso, así como el tiempo de secado que se requirió para llegar a un peso final estable. Es importante considerar que, al ser las condiciones de humedad circundantes al producto variables, también lo es la humedad de equilibrio, observándose en consecuencia constantemente variaciones en el peso final (Saravia Mathon, 2010), por lo que al realizar las curvas de secado en laboratorio se intentó considerar únicamente el agua que realmente puede ser eliminada durante el proceso.

En todos los casos, y teniendo en cuenta la configuración característica reportada en la bibliografía en general respecto a la “forma” que debe tener una curva de secado, es que se

obtuvieron las mismas de manera satisfactoria para los distintos pretratamiento y grosores de rodaja estudiados.

Tabla 4.4. Parámetros generales durante la realización de las curvas de secado.

	Sin pretratamiento	Ácido Cítrico	Metabisulfito de Na	Vino	Bicarbonato	Rodajas de 1 cm
0.6 m/s						
<i>Xwb inicial (%)</i>	50.3	64.8	49	54	68.2	48.4
<i>Tiempo de secado (horas)</i>	6.7	8.8	8	7.8	9.6	12.2
<i>Tiempo proporcional de secado (hr/hr)</i>	0.13	0.17	0.15	0.15	0.18	0.23
<i>Temperatura promedio de secado (°C)</i>	89.32	84.76	93.56	86.07	87.23	91.44
0.8 m/s						
<i>Xwb inicial (%)</i>	54.9	64.9	66.8	65	73.6	63.1
<i>Tiempo de secado (horas)</i>	7.7	8.6	8.6	10.5	8.5	9.5
<i>Tiempo proporcional de secado (hr/hr)</i>	0.14	0.16	0.16	0.20	0.16	0.18
<i>Temperatura promedio de secado (°C)</i>	66.67	71.94	67.84	67.06	72.97	85.36
1 m/s						
<i>Xwb inicial (%)</i>	52.8	53.8	56	54.9	56	60.5
<i>Tiempo de secado (horas)</i>	8.0	8.1	6.9	7.1	9.5	15.9
<i>Tiempo proporcional de secado (hr/hr)</i>	0.14	0.15	0.12	0.13	0.17	0.29
<i>Temperatura promedio de secado (°C)</i>	54.92	57.95	56.82	63.97	62.23	65.40

Como era de esperarse, independientemente de la velocidad de aire empleada, el proceso que más tiempo requirió fue aquel en el que se emplearon rodajas de mayor grosor (1cm). Esto puede deberse a que, a mayor espesor, mayor será la humedad que debe ser retirada por rodaja, a la vez que mayores serán las fuerzas de difusión que deberán vencer las partículas de agua para ser

vaporizadas al ser más grande el recorrido que las mismas deberán realizar desde el centro hacia la periferia de cada rodaja.

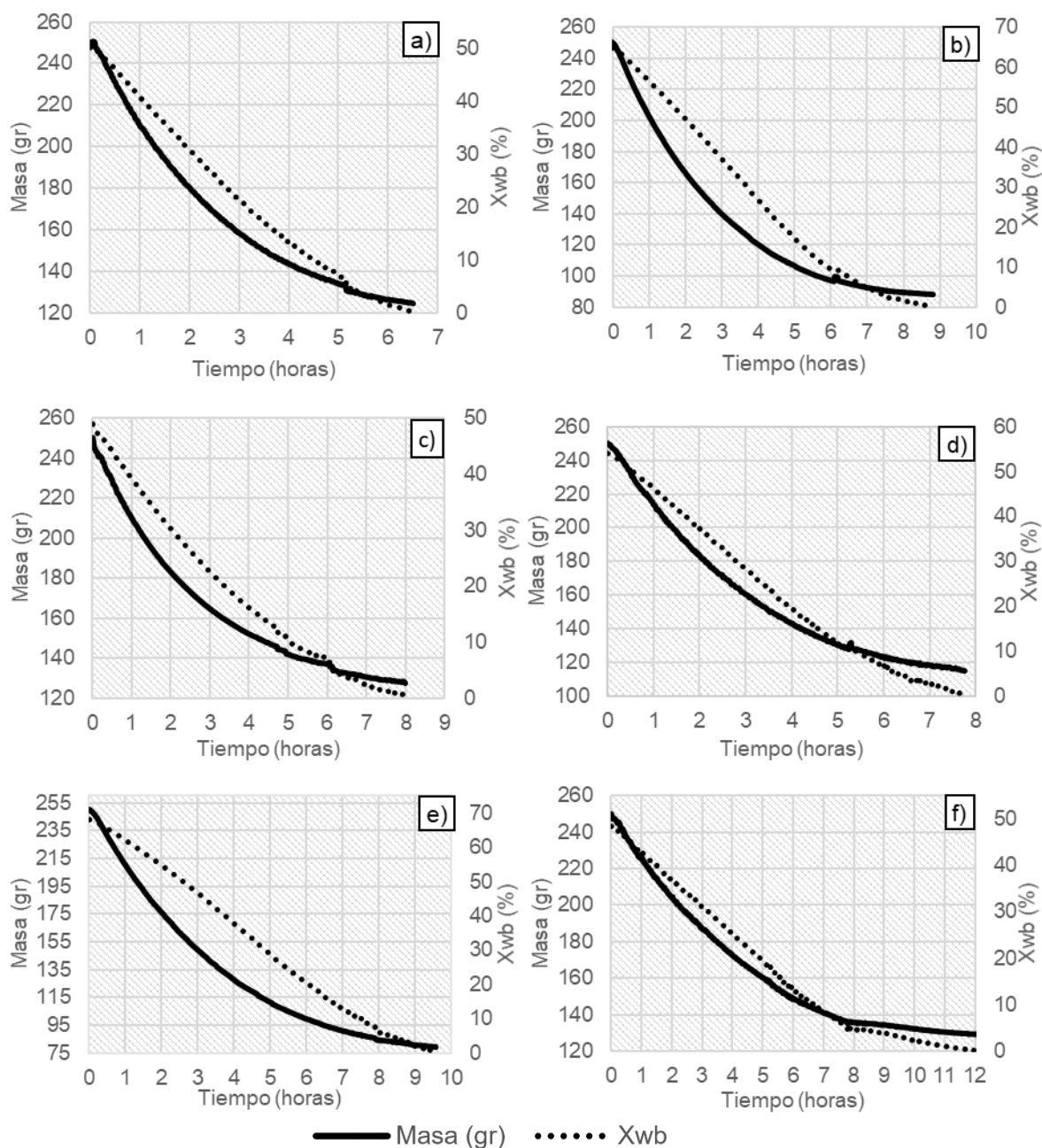


Gráfico 4.1. Curvas de secado (Masa vs tiempo; X_{wb} vs tiempo) para los distintos pretratamientos obtenidos a una velocidad de secado de 0.6 m/s. a) Sin Pretratamiento; b) Ácido Cítrico; c) Metabisulfito de Na; d) Vino; e) Bicarbonato de Na y f) Rodajas de 1 cm de espesor.

La humedad inicial calculada en base húmeda, fue en términos generales, mayor para las situaciones en las que se pretrataron las rodajas; esto debido a que, en todos los casos, los pretratamientos involucran la inmersión del fruto en un medio acuoso, con el consiguiente aporte de

humedad que esto implica, involucrando en términos generales, mayor tiempo de secado, siendo de todos modos prácticamente despreciables en términos relativos.

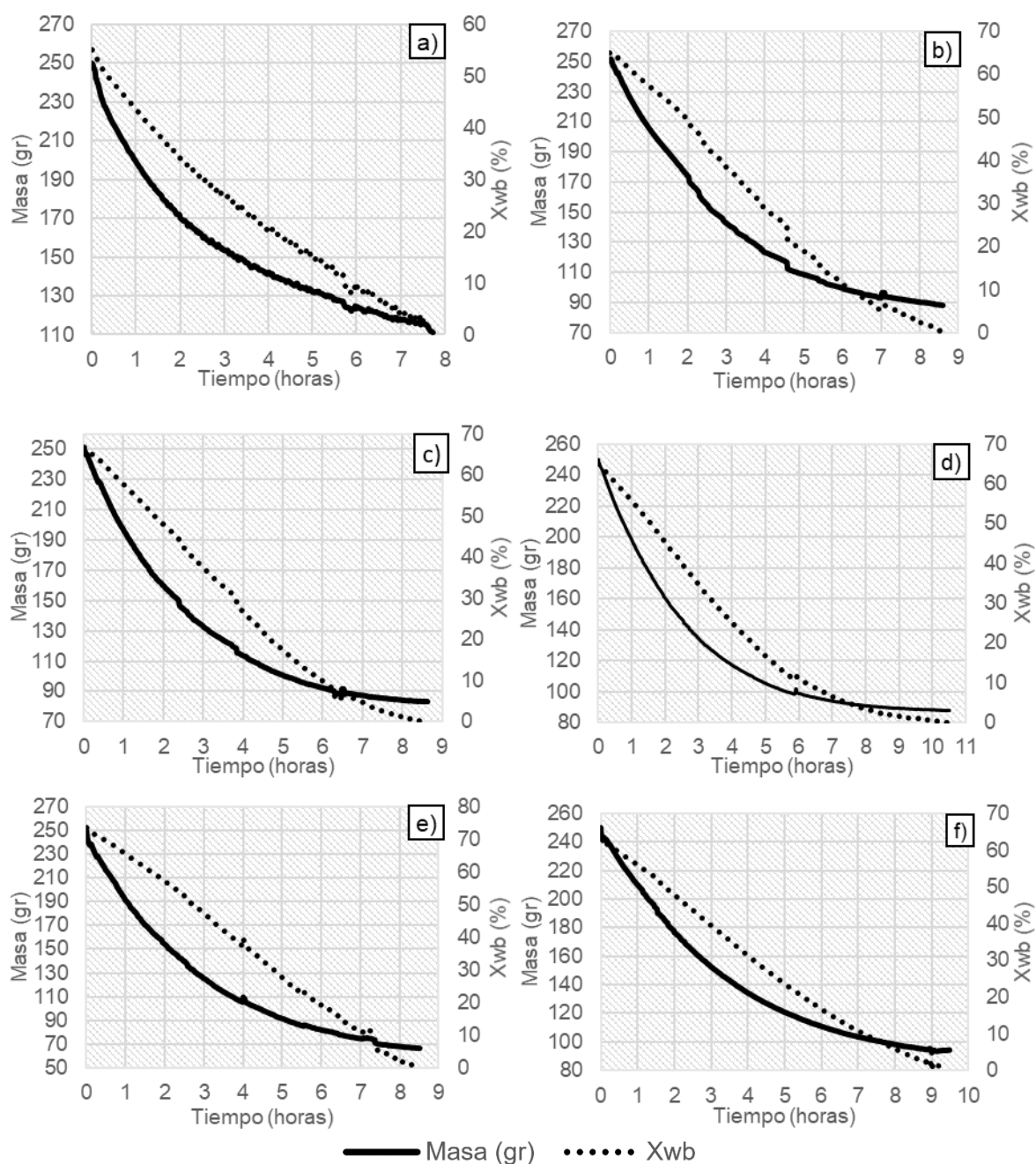


Gráfico 4.2. Curvas de secado (Masa vs tiempo; X_{wb} vs tiempo) para los distintos pretratamientos obtenidos a una velocidad de secado de 0.8 m/s. a) Sin Pretratamiento; b) Ácido Cítrico; c) Metabisulfito de Na; d) Vino; e) Bicarbonato de Na y f) Rodajas de 1 cm de espesor.

El tiempo de secado entre las distintas velocidades fue, al contrario de lo esperado, variable para las distintas situaciones, dándose para algunos casos de estudios que a mayor velocidad de secado menor el tiempo del proceso, como en el caso de ácido cítrico, pero para otros dándose esta

relación de manera inversa como se ve en el caso de las bananas sin pretratamiento, esto puede deberse a que al haber sido la velocidad el único parámetro controlado, para el caso de mayores velocidades, las temperaturas en la cámara de secado fueron en consecuencia menores afectando de manera inversa al tiempo total del proceso.

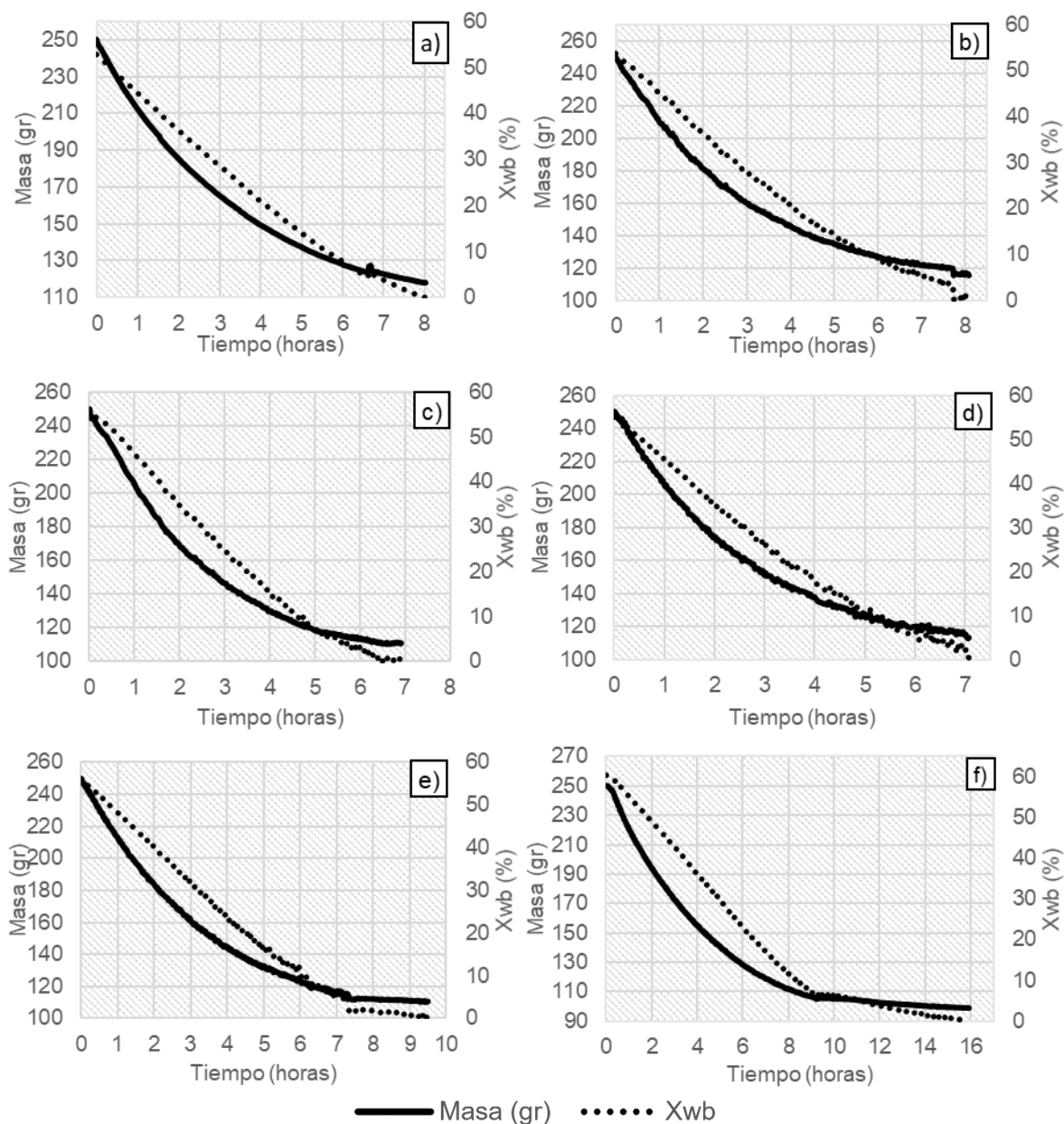


Gráfico 4.3. Curvas de secado (Masa vs tiempo; Xwb vs tiempo) para los distintos pretratamientos obtenidos a una velocidad de secado de 1 m/s. a) Sin Pretratamiento; b) Ácido Cítrico; c) Metabisulfito de Na; d) Vino; e) Bicarbonato de Na y f) Rodajas de 1 cm de espesor.

Mediante el empleo del programa estadístico Statgraphics Centurión XVI se realizó para cada curva obtenida una comparación de modelos alternativos de forma tal de determinar cuál es la

función de regresión que mejor predice la relación masa en función del tiempo, ver tabla 4.5. Se obtuvieron tres modelos que pronostican dicha relación con valores de R^2 en todos los casos mayores a 96% y valores de p menores a 0.005 indicándose para toda una correlación posible con niveles de confianza del 95%.

Tabla 4.5. Modelos de regresión obtenidos con sus estadísticos correspondientes.

	Modelo	Función*	R^2	Valor - P	MAE**
0.6 m/s					
<i>Sin Pretratamiento</i>	Raíz Cuadrada de Y	$M = (1.05435 - 0.140703 \times T)^2$	99.1	0.000	0.022
<i>Ácido Cítrico</i>	Raíz Cuadrada de Y	$M = (1.06511 - 0.112269 \times T)^2$	99.3	0.000	0.018
<i>Metabisulfito de Na</i>	Raíz Cuadrada de Y	$M = (1.01096 - 0.11275 \times T)^2$	99.7	0.000	0.009
<i>Vino</i>	Raíz Cuadrada de Y	$M = (1.0539 - 0.117572 \times T)^2$	99.3	0.000	0.016
<i>Bicarbonato</i>	Lineal	$M = 1.01389 - 0.113717 \times T$	99.4	0.000	0.020
<i>1 cm</i>	Raíz Cuadrada de Y	$M = (1.02872 - 0.0825646 \times T)^2$	99.3	0.000	0.021
0.8 m/s					
<i>Sin Pretratamiento</i>	Raíz Cuadrada de X	$M = 1.7705 - 0.400332 \times T^2$	99.2	0.000	0.017
<i>Ácido Cítrico</i>	Raíz Cuadrada de Y	$M = (1.06982 - 0.107998 \times T)^2$	98.9	0.000	0.021
<i>Metabisulfito de Na</i>	Raíz Cuadrada de Y	$M = (1.06665 - 0.115195 \times T)^2$	99.0	0.000	0.022
<i>Vino</i>	Raíz Cuadrada de X	$M = 1.21274 - 0.404051 \times T^2$	97.66	0.000	0.041
<i>Bicarbonato</i>	Lineal	$M = 1.00915 - 0.12372 \times T$	99.83	0.000	0.010
<i>1 cm</i>	Lineal	$M = 0.96358 - 0.11339 \times T$	98.71	0.000	0.030
1 m/s					
<i>Sin Pretratamiento</i>	Lineal	$M = 0.946815 - 0.128833 \times T$	98.78	0.000	0.029
<i>Ácido Cítrico</i>	Raíz Cuadrada de X	$M = 1.24628 - 0.435882 \times T^2$	98.71	0.000	0.024
<i>Metabisulfito de Na</i>	Raíz Cuadrada de X	$M = 1.24478 - 0.503216 \times T^2$	98.08	0.000	0.032
<i>Vino</i>	Raíz Cuadrada de Y	$M = (1.02982 - 0.120492 \times T)^2$	99.53	0.000	0.012

<i>Bicarbonato</i>	Raíz Cuadrada de Y	$M = (1.04873 - 0.104711 \times T)^2$	99.07	0.000	0.022
<i>1 cm</i>	Raíz Cuadrada de X	$M = 1.21576 - 0.331607 \times T^2$	96.51	0.000	0.0512

* Funciones de regresión obtenidos donde M es la masa en gramos y T el tiempo en horas

** Error absoluto medio, valor promedio de los residuos.

Según la bibliografía, las curvas de secado se caracterizan en términos generales por tres fases (Saravia Mathon, op. cit.) las cuales fueron delimitadas con mayor claridad en los gráficos 4.4, 4.5 y 4.6, en los cuales se relacionó la velocidad de secado calculada a partir de la ecuación 4.2, con respecto al tiempo en horas, para velocidades de aire de 0.6, 0.8 y 1 m/s respectivamente.

$$R = \frac{\Delta M}{\Delta t} = \frac{(M_t + \Delta t - M_i)}{\Delta t} \quad \text{Ecuación 4.2}$$

Donde:

Δt : Variación del tiempo (horas)

R: Velocidad de secado (kg_{agua}/kg_{seco}) /h.

La fase uno se caracteriza por una velocidad de secado creciente la cual, en algunos casos, debido a su corta duración puede depreciarse o es imperceptible (Saravia Mathon, op. cit) como en los casos sin tratamiento para velocidades de aire de 0.8 y 1 m/s. Durante dicha fase se produce el calentamiento del producto, comenzando a evaporarse las partículas de agua superficiales, las cuales se encuentran libres sobre la superficie de los productos, es por esto que es de esperarse que dicha fase se encuentre más marcada para los casos donde se han realizado pretratamientos.

En la fase 2, conocida como de velocidad de secado constante, comienza a evaporarse la humedad superficial, estando la misma determinada por las características del aire, siendo prácticamente independiente de las características del producto. Durante esta fase, características como el espesor de las rodajas del producto no tendrían gran influencia. El movimiento del agua es lo suficientemente rápido como para mantener las condiciones de saturación en la superficie del producto, manteniéndose durante este intervalo la temperatura prácticamente constante, en materiales no higroscópicos es esta la única fase que se observa durante el secado (Saravia Mathon, op cit).

La fase 3 y última, conocida como de velocidad decreciente, es durante la cual la resistencia interna del material comienza a hacerse más fuerte, empezando la evaporación del agua interna del producto dependiendo, a la inversa de la fase anterior, de las características interiores y de presentación del producto (por ejemplo, espesor de la rodaja). Cuando los materiales a ser secados son de tipo higroscópico, es imposible realizar un secado hasta obtener una humedad cero; lo que se pretende en estos casos, es lograr que la actividad del agua, la cual es responsable de la

proliferación de microorganismos y/o procesos degenerativos del producto, permanezca debajo de niveles donde los mismos puedan sucederse.

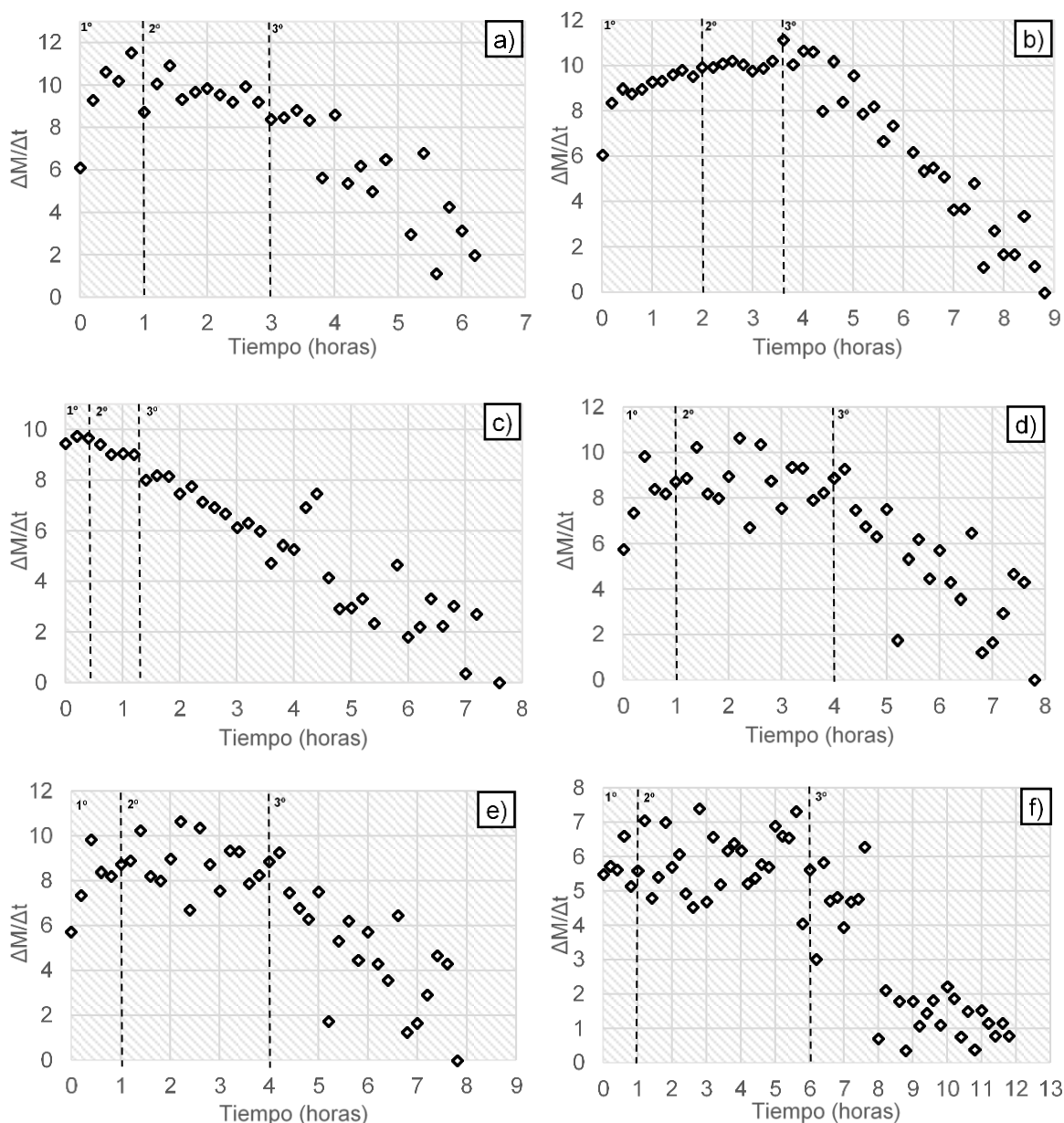


Gráfico 4.4. Delimitación de las 3 fases de secado para los distintos pretratamientos a una velocidad de secado de 0.6 m/s. a) Sin Pretratamiento; b) Ácido Cítrico; c) Metabisulfito de Na; d) Vino; e) Bicarbonato de Na y f) Rodajas de 1 cm de espesor.

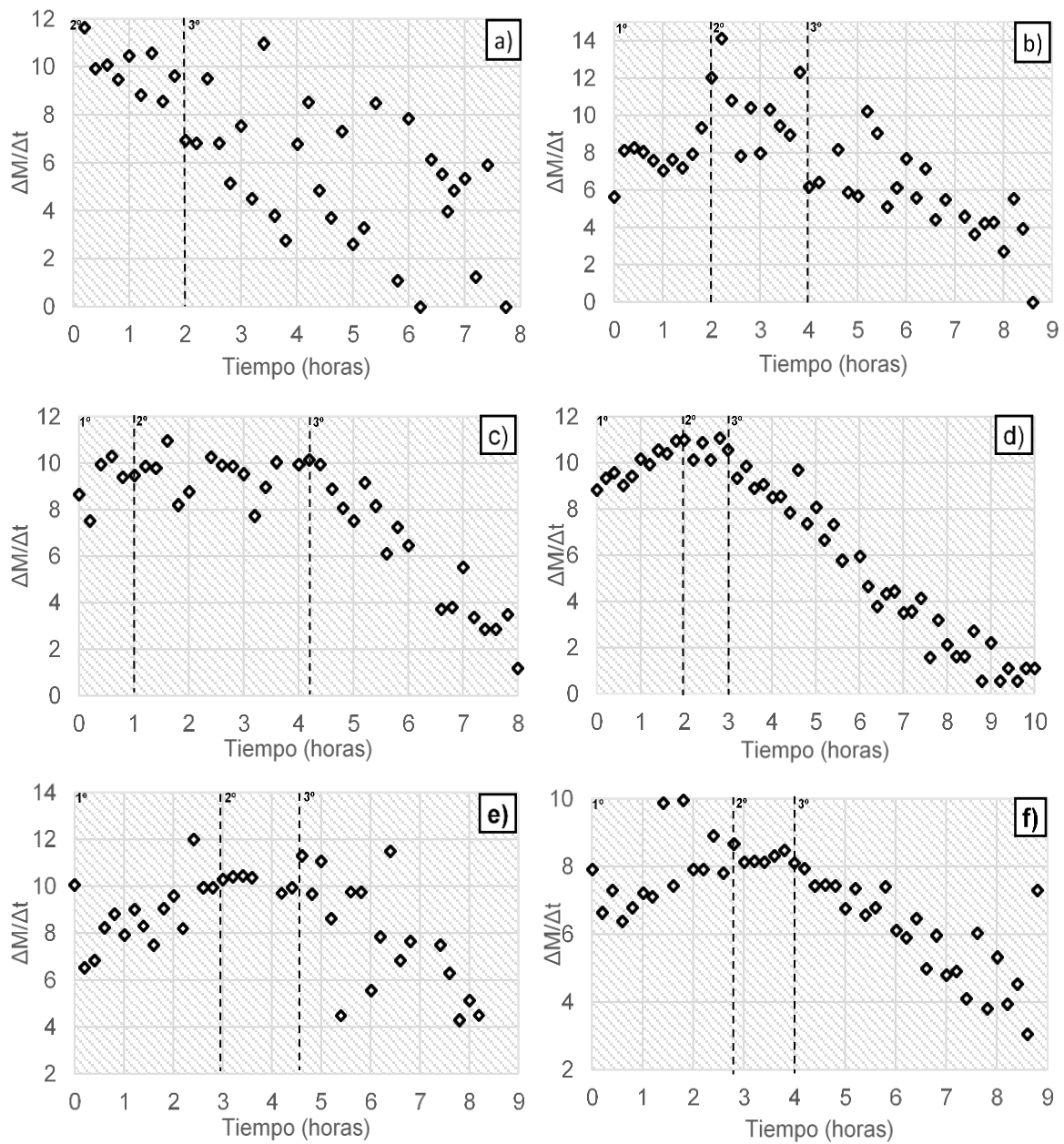


Gráfico 4.5. Delimitación de las 3 fases de secado para los distintos pretratamientos a una velocidad de secado de 0.8 m/s. a) Sin Pretratamiento; b) Ácido Cítrico; c) Metabisulfito de Na; d) Vino; e) Bicarbonato de Na y f) Rodajas de 1 cm de espesor.

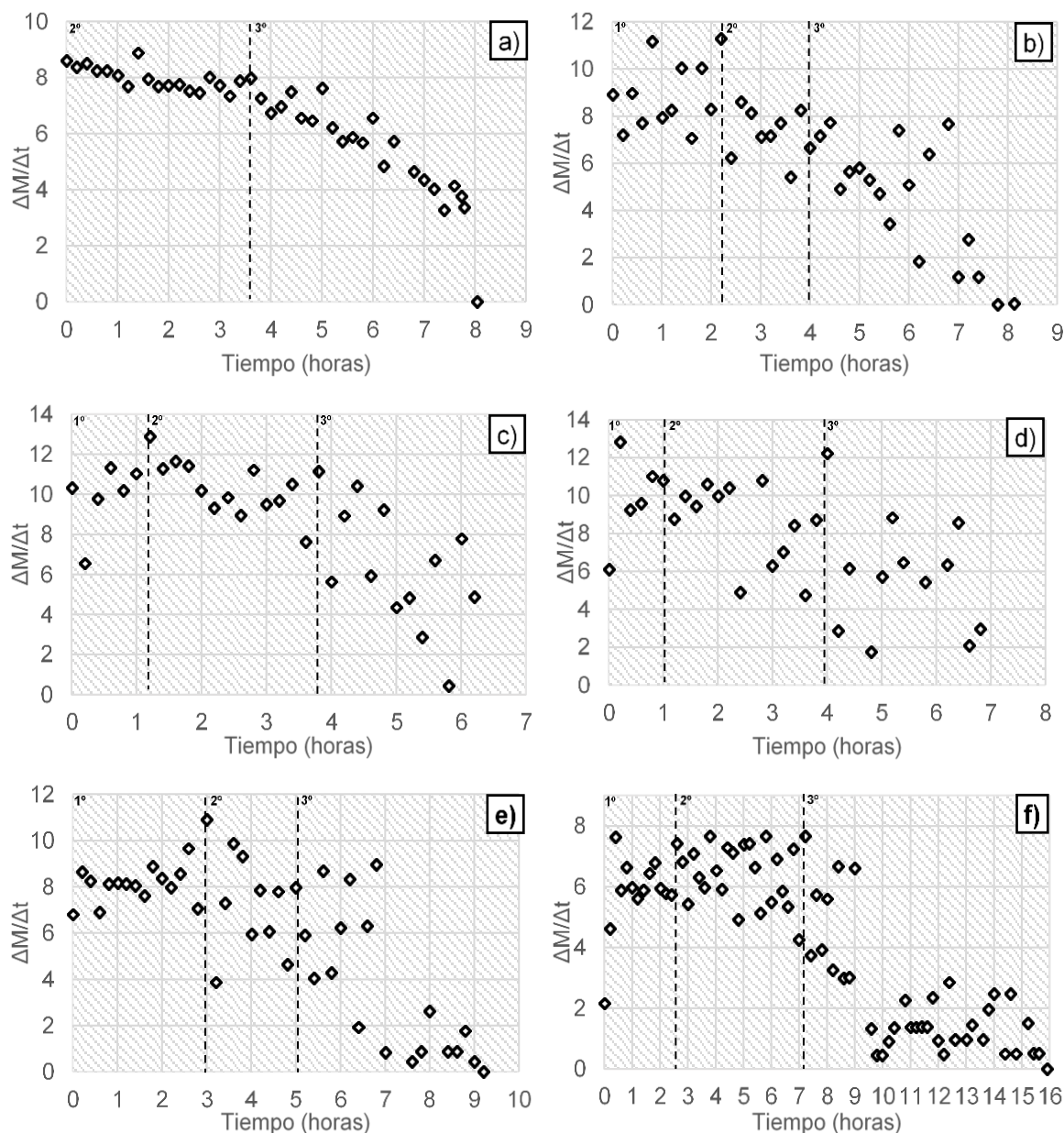


Gráfico 4.6. Delimitación de las 3 fases de secado para los distintos pretratamientos a una velocidad de secado de 1 m/s. a) Sin Pretratamiento; b) Ácido Cítrico; c) Metabisulfito de Na; d) Vino; e) Bicarbonato de Na y f) Rodajas de 1 cm de espesor.

Se realizó finalmente el balance energético de la construcción de las curvas de secado, ver tabla 4.6., para lo cual se determinó el total de la energía consumida (ETC) por parte de la resistencia eléctrica y del cooler durante las distintas caracterizaciones. Para esto, fue necesario determinar los ohm de la resistencia y el voltaje de la red mediante el empleo de un voltímetro, datos que luego se emplearon para aplicar la ecuación 4.3. Paso seguido, se calculó cuanta de esta energía total consumida durante la realización de cada una de las curvas, fue realmente aprovechada (Q_u) para

el secado de las bananas a partir de la aplicación de la ecuación 4.4., entendiendo al resto de la energía en términos de pérdidas.

$$ETC = \frac{V^2}{R} \times t \times 0.85 \quad \text{Ecuación 4.3}$$

Dónde:

ETC : Energía total consumida (MJ)

V : Voltaje (V)

R : Resistencia (Ω)

t : Tiempo (segundos)

0.85 : Constante de conversión termo – eléctrica (Carrier, 1980).

$$Q_u = \frac{\{\sum m_i \times (Cp_{ms} + Cp_{H_2O} \times P_x) \times \Delta T\} + L_w \times (m_o - m_f)}{1000000} \quad \text{Ecuación 4.4}$$

Dónde:

Q_u : Calor útil (MJ)

m_i : Masa en el tiempo i (kg)

m_o : Masa inicial (kg)

m_f : Masa final (kg)

ΔT : Diferencia de temperatura ($^{\circ}C$)

L_w : Calor latente de vaporización (j/Kg)

Cp_{ms} : Calor específico de la masa seca (j/kg $^{\circ}C$)

Cp_{H_2O} : Calor específico del agua (j/kg $^{\circ}C$)

P_x : Humedad en base seca (kg/kg) calculada según la ecuación 4.5

$$P_x = \frac{(m_o - m_f)}{m_f} \quad \text{Ecuación 4.5}$$

A partir de estas dos variables, ETU y Q_u , se determinó la energía residual calculada con la ecuación 4.6 y el calor utilizado de manera porcentual (%) mediante la ecuación 4.7.

$$ER = ETU - Q_u \quad \text{Ecuación 4.6}$$

Dónde:

ER : Energía residual (MJ)

$$Q_u \% = \frac{Q_u}{ETU} \times 100 \quad \text{Ecuación 4.7}$$

Dónde:

$Q_u \%$: Calor útil porcentual (%)

Tabla 4.6. Balance energético del proceso de construcción de curvas de secado

	Sin pretratamiento	Ácido Cítrico	Metabisulfito de Na	Vino	Bicarbonato	Rodajas de 1 cm
0.6 m/s						
<i>ETC (MJ)</i>	2.71	3.66	3.33	3.25	3.99	5.07
<i>Q_u (MJ)</i>	0.38	0.46	0.34	0.39	0.55	0.35
<i>ER (MJ)</i>	2.33	0.34	1.34	2.34	3.34	4.34
<i>Q_u %</i>	14	12	10	12	14	7
0.8 m/s						
<i>ETC (MJ)</i>	3.22	3.59	3.59	4.37	3.54	3.97
<i>Q_u (MJ)</i>	0.38	0.48	0.50	0.48	0.58	0.48
<i>ER (MJ)</i>	2.83	3.11	3.08	3.89	2.95	3.49
<i>Q_u %</i>	12	13	14	11	17	12
1 m/s						
<i>ETC (MJ)</i>	3.34	3.39	2.89	2.98	3.98	6.63
<i>Q_u (MJ)</i>	0.38	0.35	0.37	0.36	0.42	0.48
<i>ER (MJ)</i>	2.97	3.04	2.52	2.62	3.56	6.14
<i>Q_u %</i>	11	10	13	12	10	7

A partir del balance, se determinó una baja eficiencia del proceso en términos generales, esto puede haber sido debido principalmente a que es un sistema abierto a través del cual circula un flujo de aire de manera constante con las consiguientes pérdidas de tipo convectivo que esto implica.

La realización de las curvas de secado permitió determinar en primera instancia una humedad en base húmeda promedio para la banana del orden del 60%, en segunda instancia la conveniencia desde el punto de vista energético, de realizar el secado con rodajas de 0.5 cm de espesor permitiéndose de esta manera asegurar con menos aporte de energía un secado más exitoso y homogéneo, implicando posteriormente una mejor conservación. Al merecer la utilización de pretratamientos una evaluación en condiciones reales, fueron estudiados posteriormente desde el punto de vista organoléptico permitiendo realizar de esta manera una evaluación de si sus beneficios sobre las propiedades organolépticas del producto son mayores que el plus de energía que requiere el secado bajo dichas condiciones. Por último, los datos obtenidos en laboratorio permitieron el diseño y validación del modelo térmico computacional del equipo de secado propuesto a lo largo de esta tesis.

- CAPITULO 5 -

SECADOR SOLAR HÍBRIDO PROPUESTO

5. Diseño y construcción del equipo de deshidratación solar.

La propuesta del tipo de equipo a construirse fue realizada teniendo en cuenta las condiciones climáticas del lugar donde será aplicado, el presupuesto disponible, la cantidad y destino de los productos que seca por tanda actualmente la asociación, la cantidad de operarias que lo utilizarán y los diseños ya probados y aplicados en otras zonas de Salta.

Se propuso en primera instancia que la tecnología sea de tipo indirecto, teniendo en cuenta que este tipo de sistemas tienen una mayor capacidad de carga, siendo posible de esta manera mantenerse y/o mejorarse la tasa de secado que realizaban en la asociación al momento de plantearse el diseño. En segunda instancia, se tuvo en cuenta que la utilización de secaderos donde la radiación solar incide de manera directa sobre los alimentos puede tener efectos perjudiciales en los mismos (Saravia Mathon et al., 2010) ocasionando pérdidas de vitamina C (Corvalán et al., 1999) y disminuciones en la calidad final, siendo por esto recomendable que el secado se produzca principalmente por convección, especialmente si las frutas deshidratadas son para fines comerciales.

Se decidió adaptar un caloventor comercial al equipo obteniéndose un sistema híbrido ya que las condiciones meteorológicas en Orán pueden ser muy variables. Se buscó de esta manera lograr cierta independencia del recurso solar, asegurándose continuidad en el proceso de secado aún en días nublados, disminuyendo el consumo eléctrico actual de YPA YVI al secar exclusivamente con los hornos eléctricos. Se optó por una circulación de aire pasiva, (convección natural) disminuyendo de esta forma el consumo de energía al máximo posible.

Seleccionadas las características principales del equipo a construirse, se procedió al diseño. Tomando como base tecnologías indirectas ya probadas en Salta, e incorporando algunas modificaciones a las mismas, se dimensionó el equipo. Posteriormente se procedió a la construcción, la cual se ejecutó en tres etapas, primero se trabajó con el colector solar de aire al que luego se le adaptó la cámara de secado para finalmente incorporar el sistema de tiraje que asegure una circulación de aire óptima. Durante la etapa constructiva, se fue ejecutando de manera simultánea la evaluación experimental del desempeño de cada una de las partes, para finalmente proponerse posibles mejoras, evaluadas mediante un modelo térmico computacional.

5.1. Diseño del colector solar de aire.

Debido a que los colectores solares de aire son tecnologías ya desarrolladas y ampliamente probadas con múltiples propósitos, es que se decidió en primera instancia analizar diseños aplicados en zonas de monte, puna y chaco del norte argentino (Echazú et al., 2001, Watkins et al., 2012; Iriarte et al., 2014; Zurlo et al., 2005, Echazú y Condorí, 2006 y Condorí, 2002). Los diseños identificados fueron usados como referencia, proponiéndose un colector cuyo funcionamiento y estructura es en esencia igual a los modelos conocidos, pero al que se le introdujeron mejoras orientadas a optimizar la captación de radiación y la circulación pasiva de aire, ver figura 5.1, mediante la modificación en la configuración geométrica. Se propuso de esta manera un sistema

trapezoidal, el cual adiciona superficie de captación a la vez que acelera el flujo del aire a lo largo del mismo debido al estrechamiento en el área transversal a la dirección del aire.

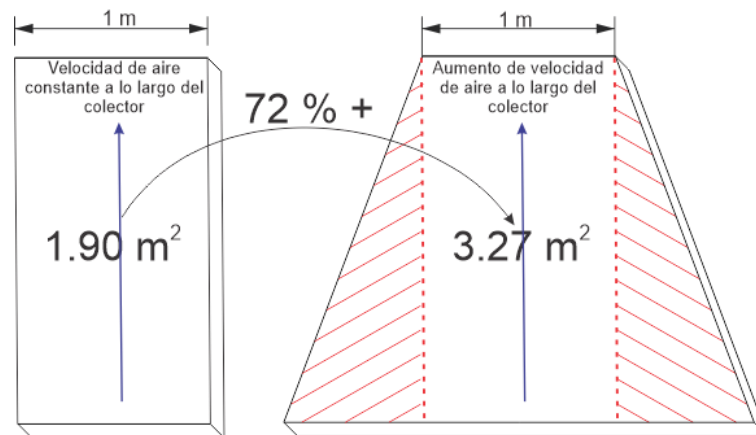


Figura 5.1. Comparación esquemática del sistema de colección entre un modelo rectangular frente al trapecoidal propuesto.

Para determinar las dimensiones finales del colector fue necesario fijar el ancho de la cámara de forma tal que tanto la operación de secado, así como la maniobrabilidad de las bandejas para la carga y descarga sea lo más sencilla posible. Dicho ancho determinó las dimensiones del área de salida del colector de aire. A partir de dicha área se construyó el resto de la geometría para finalmente obtener un colector de aire cuyas dimensiones se detallan en la figura 5.2. El área total de colección resultó en 3.27 m^2 , un 72 % más que si se hubiera construido con forma rectangular.

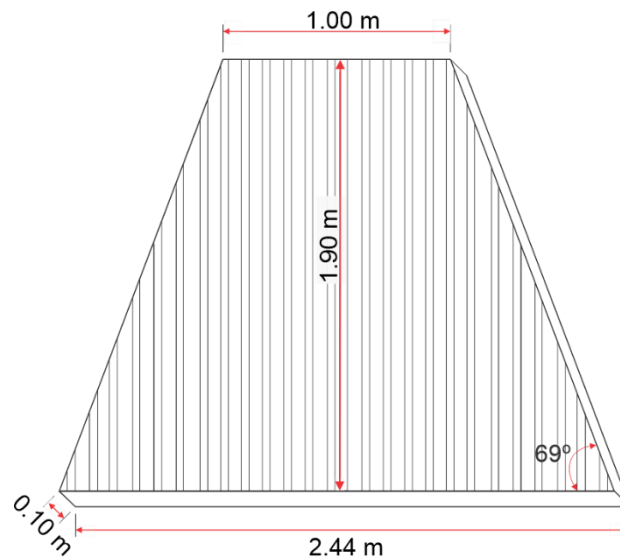


Figura 5.2. Dimensiones finales del colector solar de aire construido.

Los materiales utilizados en la construcción fueron, para la carcasa, chapa galvanizada aislada en los laterales y la base con lana de vidrio de 0.1 m de espesor, ver figura 5.3. La placa absorbedora fue de chapa galvanizada sinusoidal pintada de negro mate de alta temperatura, y en la cubierta se empleó policarbonato alveolar de 6 mm de espesor.

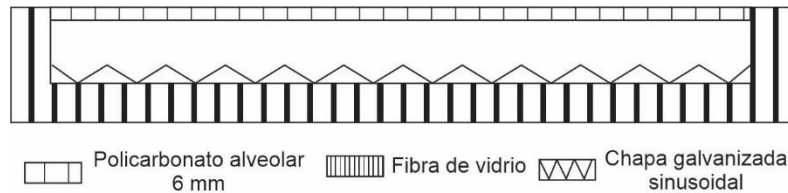


Figura 5.3. Detalle en un corte transversal del colector solar de aire de los materiales empleados para su construcción.

5.2. Evaluación experimental de colector solar de aire.

Previo al dimensionamiento de la cámara del secadero, se evaluó el colector en condiciones reales de funcionamiento con el objeto de determinar la potencia térmica entregada por el mismo, así como la potencia eléctrica equivalente. El ensayo experimental fue realizado en la localidad de Vaqueros, Salta ($24^{\circ}41'25''S$, $65^{\circ}23'49''O$, altitud 1237 msnm), ubicándose el colector de cara al norte con una inclinación de 36° .

Durante los ensayos se realizó el registro de la temperatura y humedad ambiente, así como la temperatura del aire circulante sobre la placa absorbente medida en 5 puntos distribuidos de manera longitudinal sobre la misma: tres en puntos intermedios, uno en la entrada y otra en la salida de aire (ver figura 5.4 - a). Se determinaron las velocidades y flujos de aire de entrada en cuatro puntos y a la salida de la cámara en un punto, ver figura 5.4 -b. Se construyeron, tanto al ingreso como al egreso del aire, ductos con cartón reciclado, buscando disminuir la turbulencia del fluido, y en consecuencia el error introducido en las mediciones por la misma.

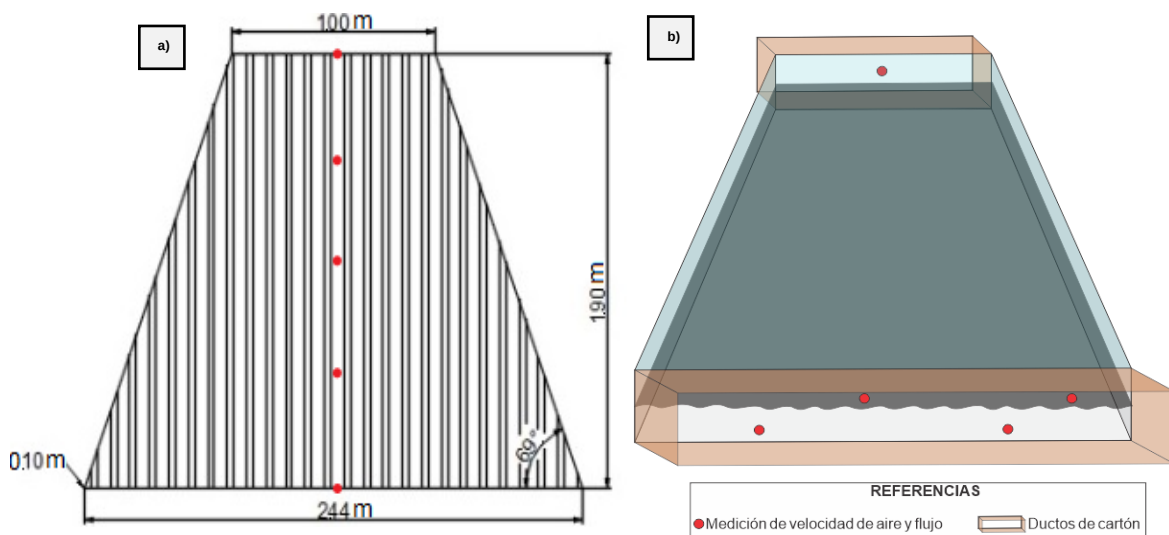


Figura 5.4. a) Puntos de medición de temperatura detallados en círculos rojos. b) Ubicación de ductos y cartón y puntos de medición de velocidad de aire y flujo volumétrico.

Fueron registradas también la velocidad del viento en los alrededores al equipo y la radiación solar global en el plano del colector. La ubicación de los puntos de medidas fue teniendo en cuenta

los nodos empleados en el modelo térmico computacional. El instrumental utilizado para las mediciones se detalla en la tabla 5.1.

Tabla 5.1. Instrumental utilizado para el ensayo experimental

Magnitud	Instrumento de medición	Error
<i>Temperatura</i>	Termómetro Fluke 54 II con termocuplas tipo K	+/- 0.1 °C
<i>Humedad</i>	Termohigrómetro TES-1364	+/- 0.1 %
<i>Velocidad y flujo de aire</i>	Anemómetro de hilo caliente TES 1341	Velocidad +/- 0.01 m/s
		Flujo +/- 0.001 m³/min
<i>Radiación solar global</i>	Solarímetro HT204	+/- 1 W/m²

Se realizaron un total de 6 ensayos, durante días de distintas condiciones ambientales, con el objetivo de determinar el funcionamiento del colector bajo situaciones diversas. Se iniciaron las mediciones en cuanto comenzó a incidir radiación sobre la superficie colectora, manteniéndose las mismas hasta que, las sombras sobre la superficie de colección debidas a los árboles aledaños, superaron aproximadamente el 20% de la misma. Los distintos parámetros mencionados anteriormente fueron registrados de manera manual en intervalos de 30 minutos procediéndose siempre de la misma manera para cada uno de ellos en función de reducir el error de medición lo máximo posible. A partir de los registros obtenidos para los distintos días fue calculada el calor útil o potencia térmica instantánea en watt según la ecuación 5.1:

$$Q_u = P_t = \dot{m} \times c_{p_{aire}} \times (T_{out} - T_{in}) \quad \text{Ecuación 5.1}$$

Dónde:

$\dot{m}$: Es el caudal másico (kg/s), determinado en función de la densidad del aire y del caudal volumétrico (V_e) el cual se obtuvo a partir del producto entre la velocidad de aire medida a la salida del colector y el área de salida transversal al flujo.

T_{out} : Temperatura del aire a la salida del colector.

T_{in} : Temperatura del aire al ingreso del colector.

Se obtuvo la eficiencia instantánea según la ecuación 5.2 y la media aritmética de las misma como eficiencia promedio.

$$\eta = \frac{Q_u}{A_c \times I_g} = \frac{\dot{m} \times c_{p_{aire}} \times (T_{out} - T_{in})}{A_c \times I_g} \quad \text{Ecuación 5.2}$$

Dónde:

Q_u : Es el calor útil en W

A_c : Es el área de colección en m²

I_g : Es la radiación global sobre el plano de colección en W/m²

Por último, se realizó la propuesta del sistema auxiliar, el cual se dimensionó suponiendo que sea capaz de suplir al colector solar de aire un día totalmente nublado asumiendo que el deshidratador deba funcionar de manera exclusivamente eléctrica. Para su diseño fue calculada la potencia eléctrica (N) utilizándose un coeficiente de conversión termo-eléctrico de 0.85 (Carrier, 1980), suponiendo que el 0.15 de pérdidas contempla la transformación energética en sí, así como las pérdidas de calor que se producen hacia el exterior durante la circulación del aire caliente desde el sistema auxiliar hacia la entrada de la cámara.

5.2.1. Resultados obtenidos a partir de la evaluación experimental del colector solar de aire.

Se resume en la tabla 5.2 – anexos, los valores obtenidos de las mediciones de los principales parámetros a partir de los cuales fueron calculados los ítems detallados en la tabla 5.3 - anexos. Se determinó una eficiencia promedio del 32% la cual incluye los primeros momentos de la mañana, las últimas horas de la tarde y los días nublados, momentos en los cuales la eficiencia instantánea disminuye. Se observó una eficiencia instantánea máxima del 85% lo cual es un resultado alentador considerando que en la bibliografía se reporta para los colectores solares de aire eficiencias en el rango de 1.2 – 58.2 % (información tomada de las tablas 2.4 y 2.5) citándose de manera excepcional para el equipo propuesto García et al. 2012 una eficiencia instantánea máxima del 80%.

La estimación del flujo másico en esta instancia fue dificultosa debido a que se evaluó el colector solar de aire sin estar conectado a la cámara de secado, quedando la salida del flujo abierta al exterior, produciéndose a veces contrapresiones que afectaron las mediciones. Sin embargo, la intención en esta etapa fue obtener una primera aproximación de su funcionamiento a partir de la cual continuar con el diseño del resto del equipo para posteriormente realizar una nueva evaluación ya en condiciones reales de funcionamiento e instalación.

Durante los días de evaluación, la potencia térmica promedio entregada fue de 21375 Wt equivalente a 25147 We de potencia eléctrica. Los valores obtenidos se observan ampliamente sobredimensionados según las estimaciones para un colector solar de aire (ver tablas 2.4 y 2.5), lo que puede deberse al error mencionado en las mediciones de velocidad del flujo. Es por esto que para determinar la potencia del caloventor se decidió utilizar en la realización de los cálculos una velocidad de 0.3 m/s teniendo en cuenta que para sistemas pasivos se reportan como normales velocidades comprendidas en el rango 0.2 – 0.4 m/s (Corvalán et al., 1999). Se obtuvo de esta manera una potencia eléctrica promedio (N) de 4937 We, comprándose finalmente debido a los costos, un equipo de 2000 wattios que logre cubrir el 50% de dicha demanda con la posibilidad de eventualmente poder ampliarlo al doble. El caloventor adquirido como sistema auxiliar fue modificado mediante la instalación de un regulador de tensión que permita controlar la temperatura y velocidad del aire.

Mediante el uso del programa Statgraphics Centurion®, se buscaron relaciones características de regresión entre las distintas variables que permitan estimar el funcionamiento del equipo. Para esto,

primero se corroboró la distribución normal de las variables, ver tabla 5.4, realizándose para el caso de aquellas que no cumplían los parámetros de normalidad como en el caso de la radiación, humedad relativa del aire a la salida, potencia térmica y eficiencia, la normalización mediante la aplicación del logaritmo de la variable y/o de la raíz cuadrada según cada caso.

Tabla 5.4. Descripción estadística de las diferentes variables.

	T _{in} (°C)	H _{in} (%)	T _{out} (°C)	H _{out} (%)	ṁ (kg/s)	Pot. Térmica (Wt)	η
Recuento	90	90	90	90	90	90	90
Promedio	24.1444	53.8911	55.7511	39.52	0.118111	22625.2	0.315
Desviación Estándar	5.25761	16.5412	22.0607	20.7526	0.0797876	32385.5	0.194597
Coefficiente de Variación	21.7757 %	30.6938 %	39.5699 %	52.5118 %	67.553%	143.139%	61.7768%
Mínimo	12.7	19.4	18.6	8.6	0	49.0	0.01
Máximo	38.6	84.6	103.3	83.0	0.3	153600.	0.85
Rango	25.9	65.2	84.7	74.4	0.3	153551.	0.84
Sesgo Estandarizado	1.3568	-1.7193	1.5771	0.75106	1.51639	6.96854	2.95734
Curtosis Estandarizada	0.930747	-1.45864	-1.61567	-2.42479	-1.71868	5.35631	-0.138806
	Radiación	Log H _{out}	Log Potencia Térmica	Raíz Rendimiento	Log Radiación		
Recuento	90	90	90	90	90		
Promedio	643.033	1.52422	3.837	0.532111	2.69511		
Desviación Estándar	409.109	0.269586	0.778264	0.178536	0.341915		
Coefficiente de Variación	63.6217%	17.6868 %	20.2831%	33.5525%	12.6865%		
Mínimo	64.0	0.93	1.69	0.1	1.81		
Máximo	1320.0	1.92	5.19	0.92	3.12		
Rango	1256.0	0.99	3.5	0.82	1.31		
Sesgo Estandarizado	1.12026	-1.87208	-1.65245	0.0744444	-1.82537		
Curtosis Estandarizada	-2.66806	-1.79486	0.266233	-0.649359	-1.59275		

Se estimaron, durante esta primera instancia de mediciones, relaciones entre variables con un R^2 razonable que permiten predecir la potencia térmica entregada por el colector mediante la aplicación de la ecuación 5.3, el caudal másico mediante la ecuación 5.4 y la temperatura del aire de salida mediante la ecuación 5.5.

$$\text{Log Pot. Ter.} = 0.319172 + 0.811929 * \text{Log Rad.} + 0.00666711 * T_{in} + 7.15709 * \dot{m} + 0.212097 * \text{Log } H_{out} \quad \text{Ecuación 5.3}$$

$$\dot{m} = -0.656357 + 0.00489465 * T_{in} - 0.000779517 * H_{in} + 0.00296497 * T_{out} + 0.35056 * \text{Log } H_{out} - 0.000494968 * \text{Log Rad.} \quad \text{Ecuación 5.4}$$

$$T_{out} = -92.7262 + 1.06877 * T_{in} + 0.00161553 * H_{in} + 45.4843 * \text{Log Rad.} \quad \text{Ecuación 5.5}$$

Dónde:

Log Pot. Ter: Es el logaritmo en base 10 de la potencia térmica en wattios.

Log Rad: Es el logaritmo en base 10 de la radiación en wattios por m².

Log H_{out} : Es el logaritmo en base 10 de la humedad relativa del aire de salida en %.

H_{in} : es la humedad relativa del aire de entrada en %.

T_{in} : Es la temperatura del aire de entrada en °C.

T_{out} : Es la temperatura del aire de salida en °C.

$\dot{m}$: Es el caudal másico en kg/s.

En la tabla 5.5 se detalla un resumen de los estadísticos descriptivos de cada una de las regresiones encontradas, se utilizó el R^2 ajustado para los grados de libertad al ser más apropiado para comparar modelos con diferentes números de variables independientes. Si bien se obtuvieron relaciones de correlación, las mismas se reevalúa en una etapa posterior cuando se analiza el colector con la cámara de secado y se mide el caudal en condiciones reales de uso, parámetro fundamental para describir y caracterizar su funcionamiento.

Tabla 5.5. Parámetros de las distintas regresiones obtenidas.

Ecuación	R^2 (ajustado para g.l)	Error absoluto medio (MAE)	Valor - p
4.3	80.84 %	0.250831	0.0000
4.4	71.18%	0.04228	0.0000
4.5	76.26	7.77	0.0000

4.3. Dimensionamiento de la cámara de secado.

Para determinar las dimensiones finales de la cámara, se tuvieron en cuenta una serie de parámetros. Se consideró como partida que el equipo pueda contener como mínimo 10 kg de fruta fresca de forma tal que la asociación de mujeres pueda mantener su tasa de secado por tanda. Para esto se realizó la determinación de cuanta cantidad en peso de banana cabe en una superficie determinada.

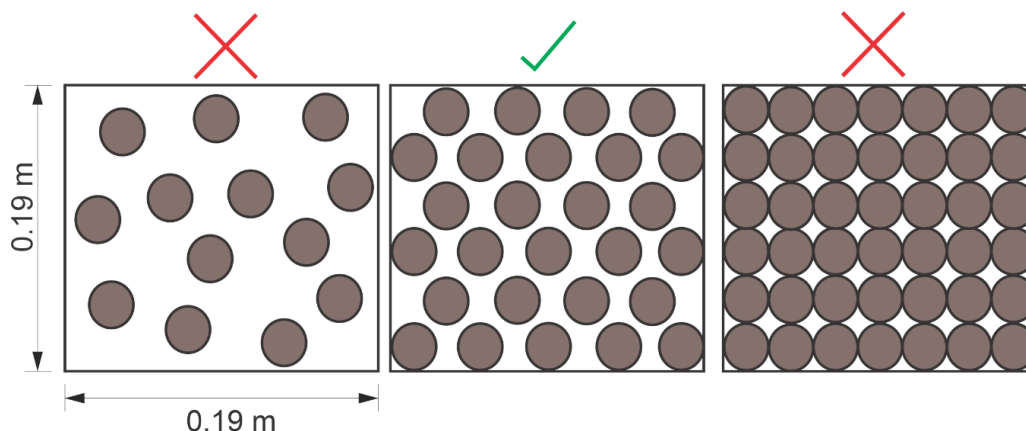


Figura 5.5. Análisis para relacionar el peso con el área. Se evitó superponer rodajas (imagen de la derecha) de forma tal que el aire pueda barrer de forma envolvente las rodajas al secarlas. Se evitó también dejar demasiado espacio entre las mismas haciendo un uso ineficiente del espacio (imagen de la izquierda).

Se usó una bandeja de 0.04332 m^2 sobre la que se dispuso la mayor cantidad de banana posible, siempre teniendo en cuenta que quede espacio entre rodajas que permita el pasaje de aire caliente

para un correcto secado y evitar grandes caídas de presión dentro de la cámara de deshidratación considerando que se trata de un sistema convectivo, ver figura 5.5. Se utilizaron únicamente rodajas de espesor de 0.5 cm debido a que luego de realizadas las curvas de secado en laboratorio se pudo determinar que es la mejor presentación desde el punto de vista de eficiencia energética y calidad de secado final del producto.

El ensayo de relación peso de producto – área de bandeja se repitió 3 veces para cada pretratamiento estudiado haciéndose un total de 15 repeticiones, obteniéndose que en promedio entran 0.23 kg de banana fresca cortada a 0.5 cm en la superficie mencionada. Con este dato se obtuvo que la superficie mínima de bandejas que debe tener el equipo para poder cargarlo con 10 kg debe ser 2 m².

Se tuvo en cuenta, en base a las curvas características y a los ensayos del colector de aire, un balance energético. De la tabla 4.6 se obtuvo cuanta energía en MJ es necesaria para secar 0.25 kg de banana, peso de la muestra utilizada en la realización de las curvas de secado, excluyendo los ensayos realizados para rodajas de 1 cm; a partir de dicha energía se estimó cuanta sería necesaria para secar 10 kg de fruta, ver figura 5.6. Se calculó posteriormente la energía promedio, también en MJ, que entrega durante un día de funcionamiento el colector solar de aire. Bajo la hipótesis de trabajo de que toda la energía entregada por el colector es utilizada para la evaporación de la humedad del producto, se estimó que el colector sería capaz de proporcionar en un día promedio, energía suficiente para secar 15.5 kg de producto el cual demandaría para su correcta distribución 3.1 m² de bandejas.

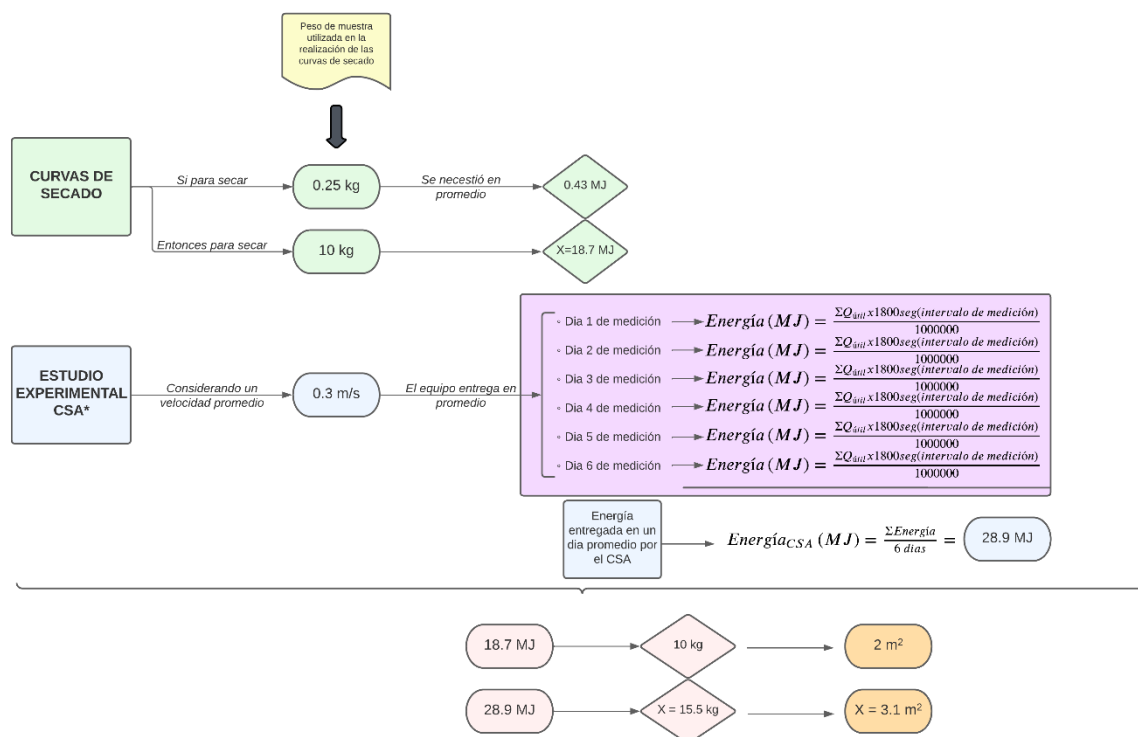


Figura 5.6. Detalle del proceso realizado para el cálculo del balance energético. *CSA: Colector solar de aire.

Finalmente, el diseño de la cámara se realizó teniendo en cuenta dicha área mínima de bandejas en función de aprovechar el sistema de calentamiento solar al máximo; se consideraron a su vez aspectos constructivos como el ancho de la cámara, el cual se definió en función de la de la salida del colector. Se consideró también el mejor aprovechamiento de los materiales de forma tal de optimizar el presupuesto disponible, así como la mejor operativización del equipo buscando que sea fácil cargar y descargar de forma tal que su uso demande la menor cantidad de operarios posibles. En base a todo lo anterior se propuso una cámara de forma cúbica cuyas dimensiones se detallan en la figura 5.7, la cual se equipó con una raquera de seis pisos, cada uno con dos bandejas de superficie real de 0.46 m x 0.96 m dando un total de 5.3 m² de espacio para la disposición del producto. Cada piso de bandejas se separó entre si 0.14 m.

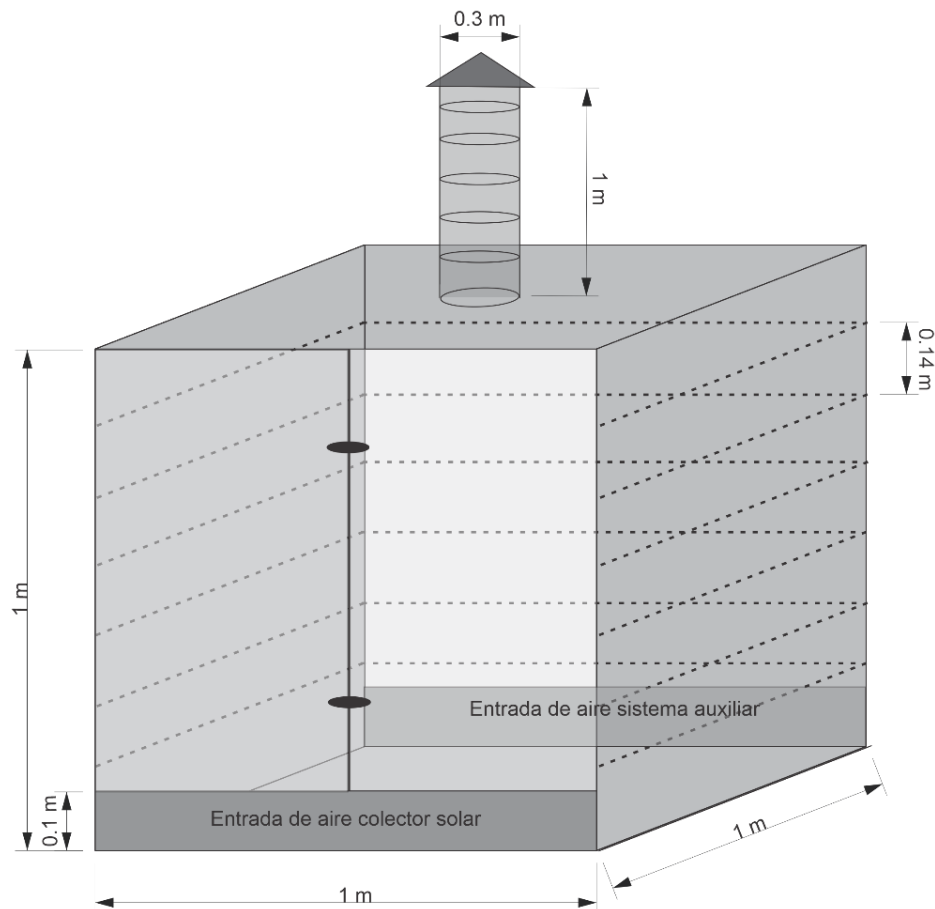


Figura 5.7. Dimensiones finales de la cámara de secado y chimenea.

5.3.1 Dimensionamiento de la chimenea.

Para el diseño del tiraje de salida del equipo se utilizó la ecuación 5.6 para dimensionamiento de chimeneas solares (Rochín, s.f.) suponiendo:

- Si la altura de la chimenea no es excesivamente alta, el aire caliente a lo largo de la misma mantiene la misma densidad.
- Al ser el área transversal al flujo constante a lo largo de toda la chimenea, y bajo el primer supuesto, se considera que la velocidad también es constante.

- A una distancia vertical medida desde la chimenea, el aire caliente se dispersa en el medio, siendo la presión en este punto aproximadamente igual a la presión del ambiente a la misma altura.

$$Q = CA^2 \sqrt{gH \frac{T_{entrada} - T_{salida}}{T_{salida}}} \rightarrow H = \frac{1}{2g} \left(\frac{Q^2}{C^2 A^2} \right) \frac{T_{salida}}{T_{entrada} - T_{salida}} \quad \text{Ecuación 5.6}$$

Dónde:

H= Altura de la chimenea

g=Constante de la gravedad

Q= Caudal

C= Coeficiente de descarga, relación entre el caudal real y el teórico (Whitaker, 1968)

A= Área transversal al flujo

T_{salida}= Temperatura del flujo a la salida de la chimenea

T_{entrada}=Temperatura del flujo a la entrada de la chimenea

El caudal se definió considerando la ya citada velocidad entre el rango de 0.2 m/s a 0.4 m/s (Corvalán et al., 1999) necesaria para que el secado sea óptimo en sistemas de circulación pasivos. Se obtuvo finalmente un diámetro óptimo del tubo de salida de 0.3 m de diámetro y una altura de 1 metro.

5.3.2. Construcción de la cámara de secado.

Al igual que para el colector, se utilizó chapa galvanizada para la construcción de la carcasa exterior de la cámara aislándola con fibra de vidrio en las paredes. Se revistió internamente con chapa de acero inoxidable, los perfiles de la raquera se realizaron con caño estructural. Las bandejas se realizaron con malla de hierro, cada una de ellas pintadas con epoxi grado alimenticio y con un perfil en la base de acero inoxidable que permita deslizarlas con mayor facilidad. En la base de la cámara se realizó una estructura, también con caño estructural, para poder colocar el caloventor con un ángulo que permita que el aire provisto por el mismo circule de manera perpendicular las bandejas.

La chimenea junto al sombrero de la misma se construyó con caño galvanizado. Las propiedades de los principales materiales empleados en la construcción de la totalidad del equipo, y luego utilizados para la simulación computacional, se resumen en la tabla 5.6.

Tabla 5.6. Propiedad de los materiales empleados para la construcción del equipo

Propiedad	Absorbedor	Cubierta	Carcaza	Aislación
Densidad ρ (kg/m ³)	7.850	1.200	-	14
Conductividad λ (W/m °C)	-	0.2	-	0.03
Absortividad α (-)	0.96	-	-	-
Transmitancia τ (-)	-	0.8	-	-
Emisividad ε (-)	0.8	0.9	0.1	-

En la figura 5.8 se ve el detalle de equipo luego de finalizada la construcción e instalado para su evaluación completa. Debido a que la construcción de esta parte se realizó en dos etapas, primero la cámara y luego la chimenea, se puede observar en la figura 5.8 - b el caño provisorio que se colocó a la salida el cual terminó siendo remplazado por la chimenea de la imagen 5.8 - a. En la figura 5.8 – e se puede observar el detalle de la manija destinada a abrir y cerrar una pequeña compuerta instalada para regular el paso del aire proveniente del colector solar de forma tal de por un lado evitar contrapresiones con el aire proveniente del caloventor cuando éste está en funcionamiento, y por otro, disminuir el ingreso de aire húmedo durante la noche que pueda producir rehidratación del producto durante las horas de no funcionamiento.



Figura 5.8. Equipo instalado para su evaluación experimental. a) Chimenea definitiva, b) Vista anterior de la cámara con detalle de la raquera y chimenea provisional, c) detalle de las bandejas, d) detalle del caloventor y e) detalle del sistema para abrir y cerrar entrada de aire.

5.4. Evaluación experimental del equipo de deshidratación completo.

La evaluación experimental del secador se realizó en 3 etapas a lo largo de las cuales se determinó su funcionamiento de manera exclusivamente solar, a excepción de la última instancia, en donde se trabajó bajo condiciones reales de funcionamiento, encendiendo el equipo eléctrico cuando las condiciones ambientales así lo requirieron, de forma tal de evitar que las temperaturas

dentro de la cámara disminuyan notablemente. Las etapas de evaluación consistieron: la primera en la caracterización del equipo con la cámara de secado completamente vacía; la segunda en pruebas con diferentes cantidades de bandejas de agua; y la tercera en el secado de banana pretratada con los componentes ya mencionados y estudiados a lo largo del capítulo 4. Para todos los casos, el equipo permaneció en el lugar mencionado en el apartado 5.2.

Durante la toma de datos se realizó la medición de la radiación en el plano horizontal y en el plano de inclinación del colector; se midió la temperatura ambiente, temperatura a la entrada y salida del colector, a la salida de la cámara y en 8 puntos ubicados dentro de esta de los cuales dos se destinaron a medir la temperatura del agua cuando se cargó con bandejas de agua y 3 sensores a la medición de la temperatura del producto cuando se cargó con banana. Se determinó la humedad relativa a la salida de la chimenea, sin embargo, debido a la falta de instrumental durante los primeros ensayos, la humedad relativa en diferentes puntos a lo largo del equipo de secado se determinó mediante la utilización de la carta psicrométrica, utilizando como parámetro de entrada la medición de la humedad relativa y temperatura ambiente. En etapas posteriores, gracias a la adquisición de dataloggers, la humedad pudo ser determinada directamente a partir de mediciones. En la figura 5.9 se detallan los diferentes puntos de medición de temperatura y humedad, así como los puntos donde se ubicaron eventualmente los equipos de registro de humedad y temperatura.

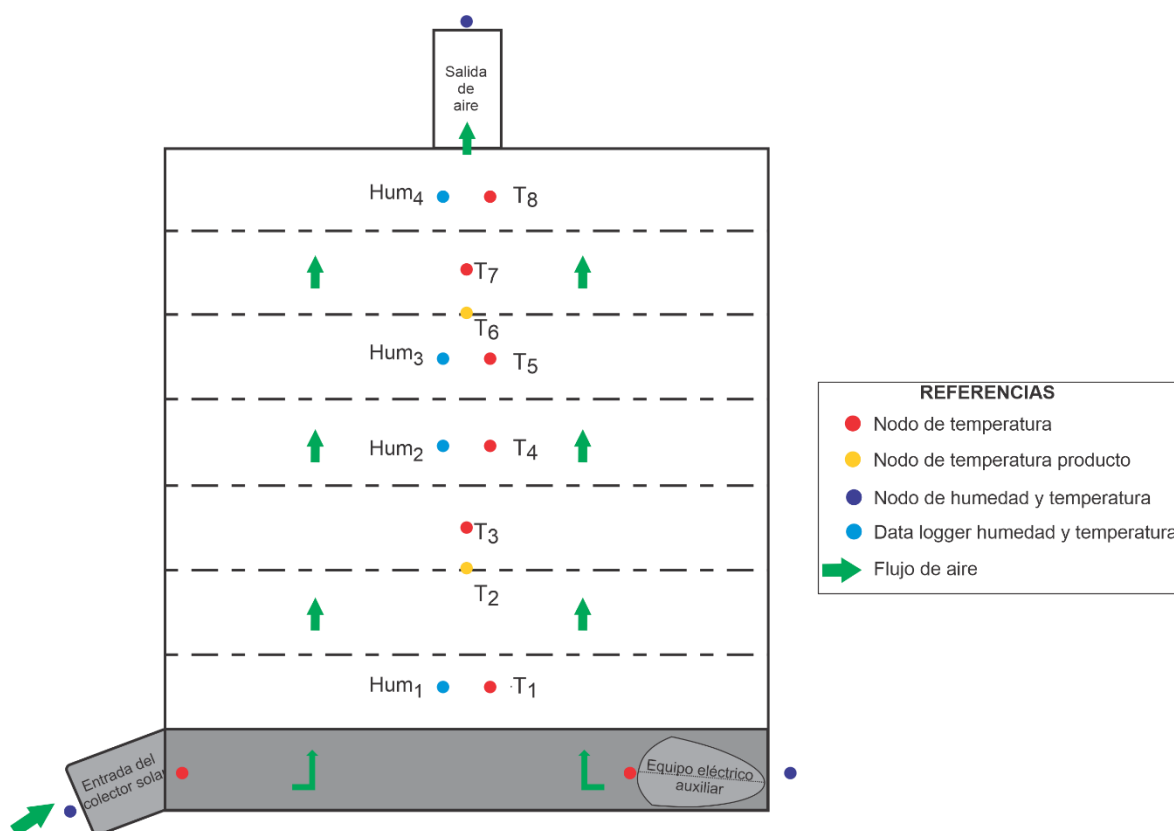


Figura 5.9. Corte transversal de la cámara de secado con el detalle de la ubicación aproximada de los distintos sensores de medición. Los nodos de temperatura del producto corresponden a la

experimentación con bandejas de agua dado que cuando se realizó la prueba con banana dichos nodos pasaron a ser 3 en total.

Se registró también la velocidad del viento circundante, así como a la salida del colector y a la salida de la cámara introduciéndose algunas mejoras en este punto para evitar el error identificado en las mediciones de velocidad en el apartado 5.2 debido a la interferencia del aire circundante. Para esto se realizaron a la salida del colector y de la chimenea, orificios del diámetro exacto de los anemómetros de hilo caliente los cuales se instalaron de manera permanente, ver figura 5.10. En los ensayos con carga fue registrado el peso de las muestras a intervalos determinados. Todo el instrumental utilizado en esta nueva etapa de mediciones queda detallado en la tabla 5.7.

Tabla 5.7. Detalles del instrumental utilizado para los ensayos de caracterización del equipo.

Magnitud	Instrumento de medición	Error
<i>Temperatura</i>	Termómetro Fluke 54 II con termocuplas tipo K	+/- 0.1 °C
	Data logger Pasco Capstone con sensores de temperatura	+/- 0.01 °C
<i>Temperatura y humedad</i>	Data logger Logbox-RHT con display novus.	Temperatura: +/- 0.1 °C Humedad: +/- 0.1 %
<i>Humedad</i>	Termohigrómetro TES-1364	+/- 0.1 %
<i>Velocidad y viento exterior.</i>	Anemómetro de hilo caliente TES 1341	+/- 0.01 m/s
<i>Radiación solar global</i>	Solarímetro HT204	+/- 1 W/m ²
<i>Peso</i>	Balanza libercam 2000 gr	+/- 0.1gr

Durante esta nueva instancia de evaluación experimental, a lo largo de la cual el equipo se instaló de manera completa, se realizaron un total de 15 sesiones las cuales abarcaron 17 días de mediciones. Durante los mismos se aprovechó para generar datos significativos sobre el colector solar de aire de manera independiente al circuito conectado a la cámara, que permitan complementar los datos generados en primera instancia, apostando a la mejora en la adquisición de datos de velocidad del aire dentro del colector.



Figura 5.10. Ubicación del anemómetro de hilo caliente para medición de velocidad exterior. Derecha: a la salida del colector solar de aire, Izquierda: a la salida de la cámara de secado.

5.4.1. Evaluación experimental del colector solar de aire instalado para su destino final.

En la tabla 5.8 – anexos es posible observar los datos obtenidos de las mediciones experimentales realizadas en esta nueva etapa a lo largo de la cual, como ya se mencionó, se fueron adquiriendo equipos que permitieron mejorar la toma de datos; es por esto que es posible ver que los parámetros medidos no son iguales para todas las experiencias, por ejemplo durante el primer día de medición los parámetros ambientales no pudieron ser determinados por lo que las propiedades psicrométricas del aire de secado no se pudieron estimar. A su vez a partir del 2 de febrero del 2022 se eliminó el punto central de temperatura en el colector registrándose únicamente la temperatura del aire a la entrada y salida siendo suficiente para luego realizar el cálculo de las potencias.

A partir de los datos recolectados fueron estimadas la potencia térmica instantánea, la potencia térmica promedio, la potencia eléctrica equivalente y la eficiencia promedio según las ecuaciones del apartado 5.2, ver tabla 5.9 - anexos. Se intentó nuevamente encontrar correlaciones significativas entre las diferentes variables, sin embargo, al ser el volumen de datos tan grandes en esta oportunidad, no fue posible normalizar la distribución de los diferentes parámetros estudiados para realizar las pruebas de correlación correspondiente. Se dibujaron por lo tanto diferentes relaciones gráficas priorizando aquellas entre distintas variables de entrada (ambientales) y de salidas (desempeño del equipo) de forma de analizar el comportamiento del equipo de colección.

Los cambios en la forma de estimar el caudal másico permitieron obtener valores de calor útil y eficiencia a partir de datos medidos. Se obtuvo en esta instancia una eficiencia promedio de 41% con picos próximos al 100%, eficiencias que en la práctica son imposibles de alcanzar y cuyos

valores se relacionan con la inercia térmica del equipo, como se puede observar en los gráficos 5.1 y 5.2 en los cuales se ha dibujado en el primero la relación entre la radiación y el calor útil a lo largo del tiempo de medición, y en el segundo la eficiencia (rendimiento) y radiación en función del tiempo.

La eficiencia y el calor útil tienen perfiles similares pues están intrínsecamente relacionados, siendo la primera una relación entre la cantidad de energía que realmente es aprovechada para calentamiento (Q_u) frente al total que llega al sistema. En ambos gráficos para el día 9/2/2022, el cual fue un día con mucha nubosidad, pueden observarse los mencionados picos tanto en rendimiento como en calor útil, que se condicen con mínimos registrados en la radiación para ese mismo día. Dicho comportamiento es debido a que el sistema aumenta su temperatura en función de cómo va incrementando la radiación, al caer de manera brusca esta última, el sistema en general y la placa absorbedora en particular, continúan teniendo la temperatura alcanzada hasta ese instante, antes de comenzar a enfriarse, entregándole calor al aire. Es por esto que, al realizar el cálculo de eficiencia y potencia entregada, dan valores instantáneos muy altos, ya que físicamente el colector está entregando mucha energía en relación a la radiación que recibe por m^2 .

Cuando, por el contrario, vemos la situación del día 23/3/2022, el cual se nubla y se mantiene en estas condiciones por un periodo de tiempo, el sistema comienza a enfriarse tendiendo a equipararse el perfil de Q_u y rendimiento con el de la radiación.

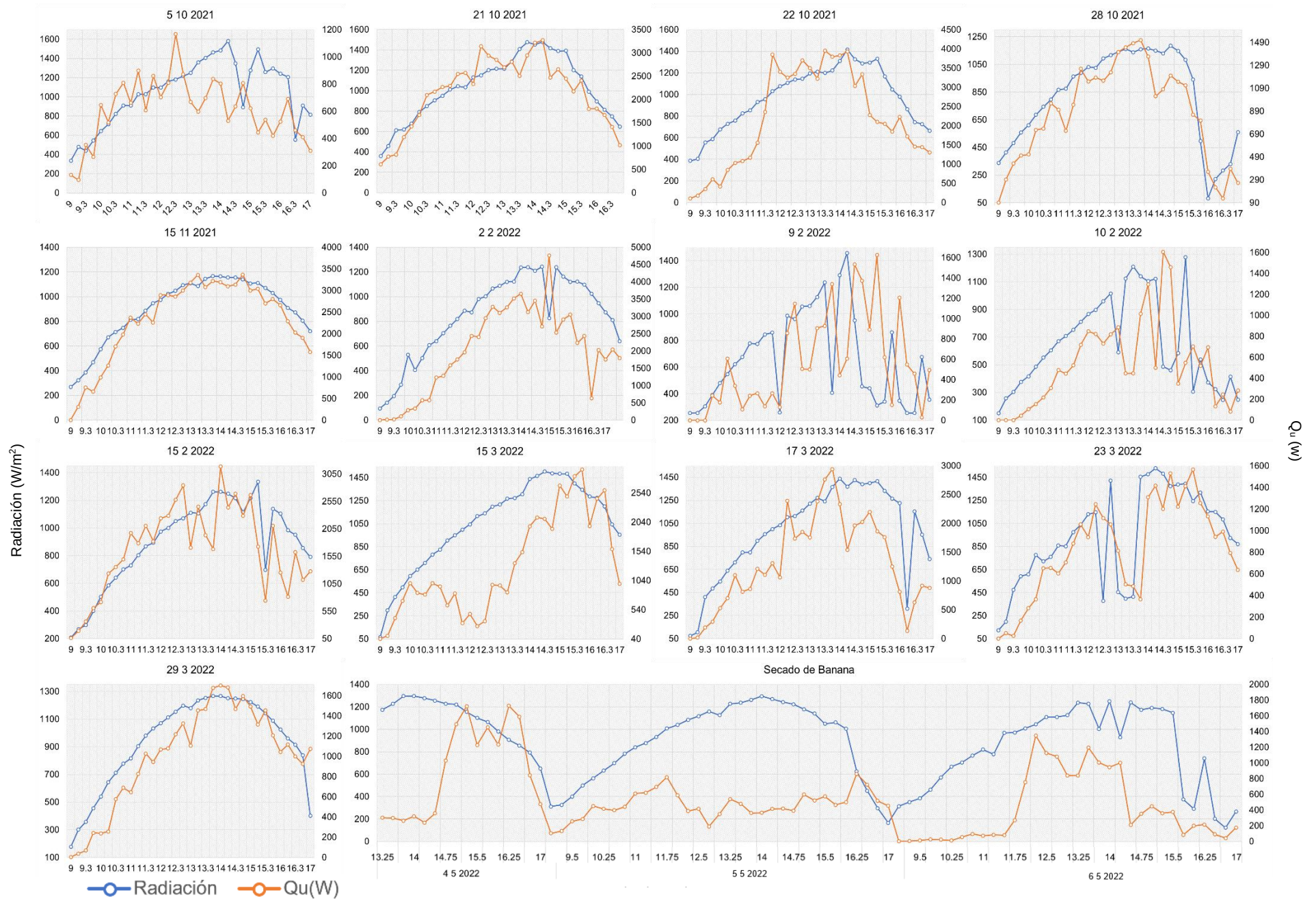


Gráfico 5.1. Relación de la radiación y calor útil en función del tiempo para cada uno de los días de medición.

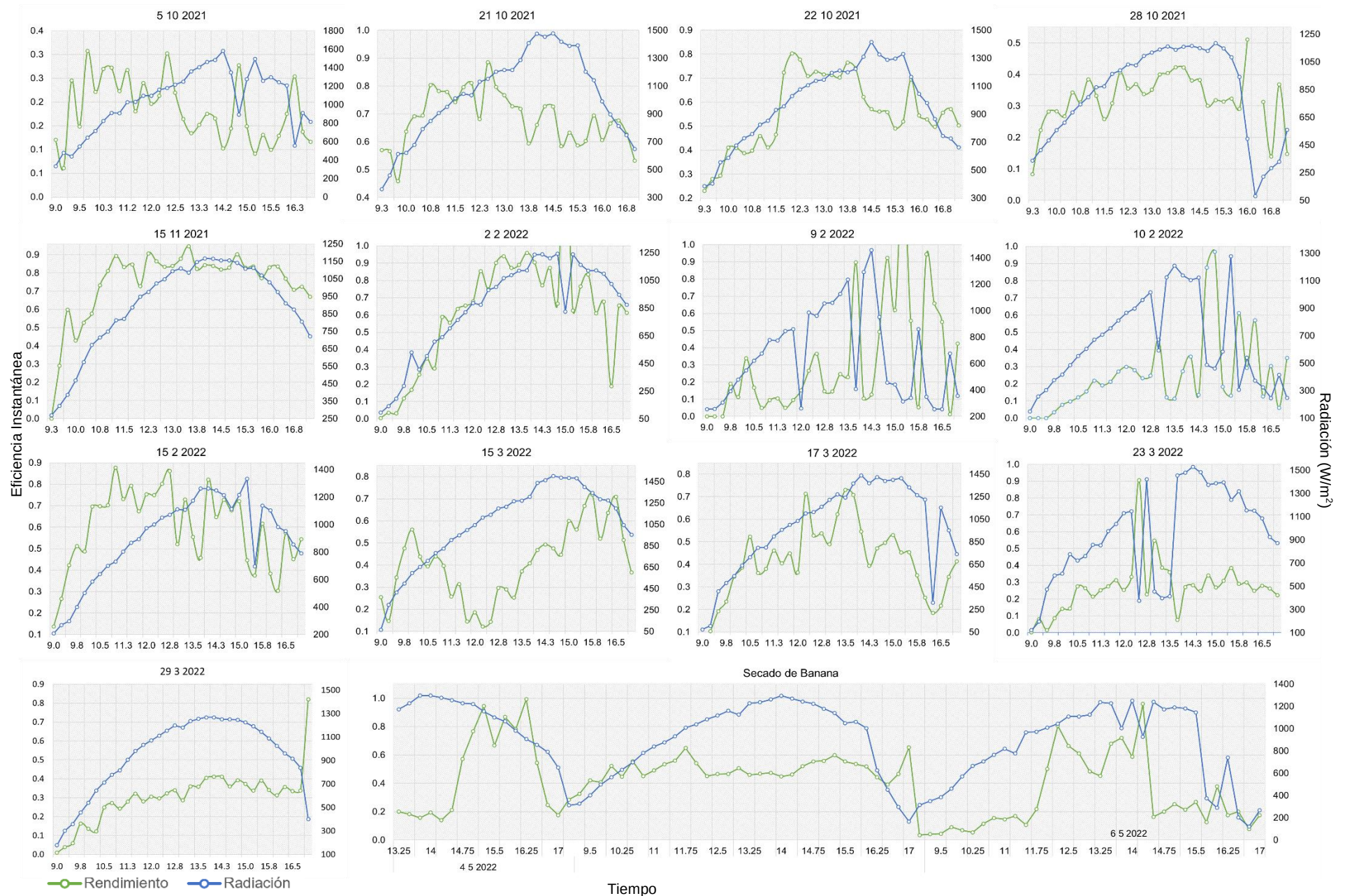


Gráfico 5.2. Rendimiento y radiación en función del tiempo para todos los días de medición.

En termino generales, al ver los perfiles dibujados, podemos determinar que el colector solar de aire tiene una buena respuesta a la incidencia de la radiación, comportándose como es de esperarse, en función de la cantidad de incidencia de ésta, a mayor radiación, mayor energía colectada y entregada. Podemos ver sin embargo situaciones como el día 5/10/2021 o 15/03/2022, durante los cuales los perfiles de calor útil y rendimiento no se condicen con la cantidad de recurso solar, esto determina que las influencias del entorno ambiental influyen fuertemente sobre la eficiencia del equipo determinando las pérdidas del mismo. Por ejemplo, a mayor viento exterior, menor será la energía entregada por el sistema.

Durante esta segunda etapa de medición el equipo entregó una potencia térmica promedio de 1205 Wt con un máximo de 4760 Wt cuya equivalencia eléctrica es de un promedio de 1417 We, confirmando que la compra de un sistema auxiliar de 2000 W es una buena decisión en cuanto a la relación potencia entregada versus precio del equipo.

En el gráfico 5.3 se observa la temperatura ambiente, la temperatura del aire en el colector solar medido en diferentes puntos y la radiación a lo largo del tiempo. En este caso se ve una inercia térmica más chica que para los gráficos 5.1 y 5.2, observándose perfiles de evolución de la temperatura más sincrónicos con respecto a la radiación. Esto es debido a que son puntos de medición de la temperatura del aire, el cual, al tener un calor específico relativamente bajo, aumenta y disminuye su temperatura rápidamente. Es por esto que vemos que al disminuir la radiación la temperatura en el perfil del colector lo hace rápidamente. Sobre este punto se trabaja más adelante a lo largo de esta tesis, en cuanto a la incorporación de nuevos materiales que puedan generar mayor inercia térmica al equipo buscando extender el tiempo de secado lo máximo posible luego de que se produzca una disminución en la radiación.

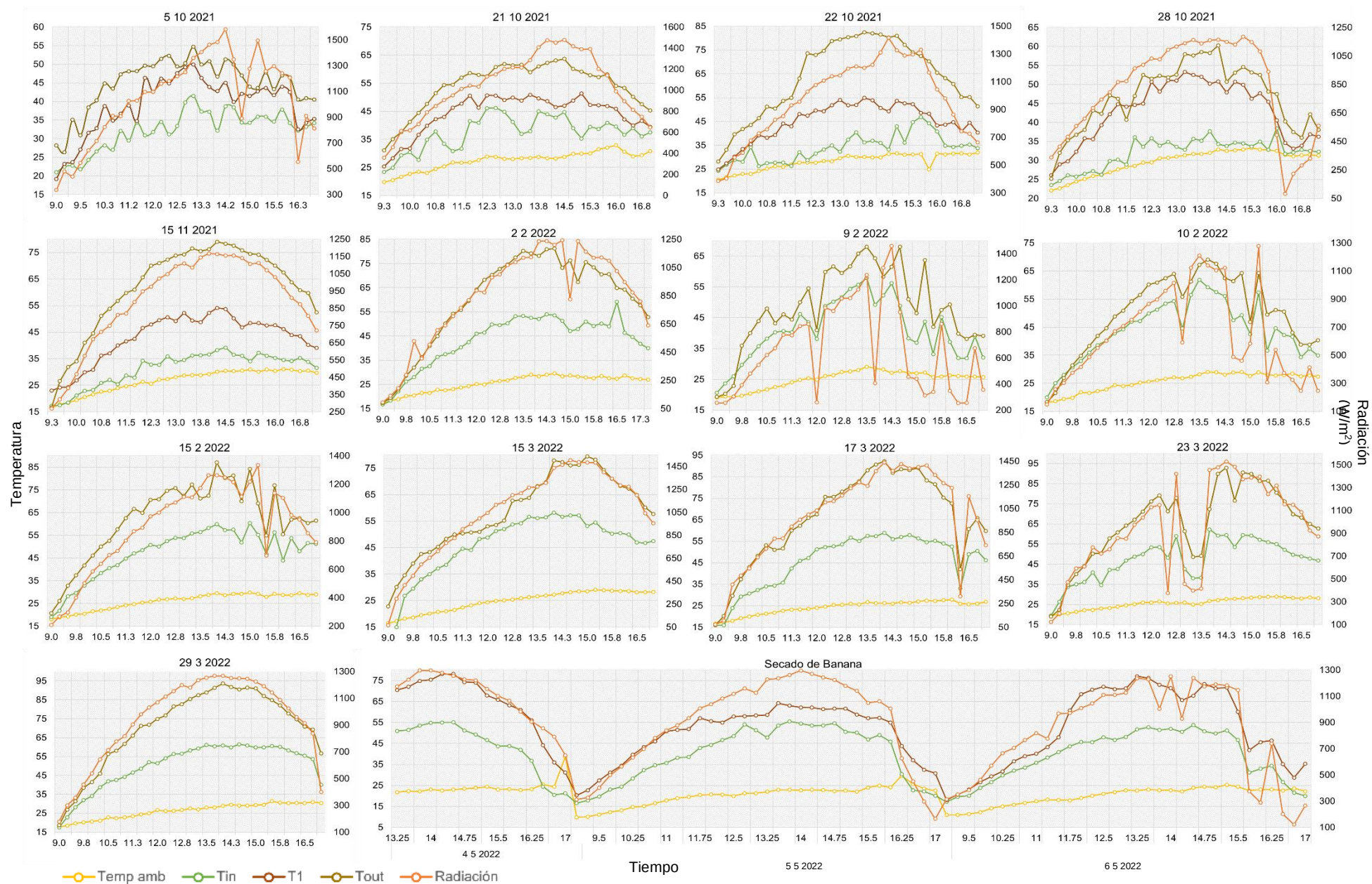


Gráfico 5.3. Radiación, temperatura ambiente, temperatura a la entrada, salida y punto medio del aire de secado graficados en función del tiempo.

A lo largo de los diferentes días de medición se observaron temperaturas máximas a la salida del colector solar del orden de los 94°C y temperaturas promedio de 60 °C, estando estas últimas dentro del rango apropiado para secar la banana correctamente. Sin embargo, estas mediciones de temperatura se complementan más adelante con las medidas dentro del equipo para saber si realmente son adecuadas o están por encima de lo permitido para que el producto final y el proceso de deshidratación sean de calidad.

En los gráficos 5.4 y 5.5 se muestra la relación entre el caudal másico y la humedad relativa del aire de salida en función de la radiación con el objetivo de determinar si existe una relación entre dichos parámetros, importantes a la hora de analizar la calidad del aire para el secado. En el gráfico 5.4 se observan únicamente los casos donde la correlación entre el caudal másico y la radiación fue significativa con R^2 iguales o mayores a 0.5.

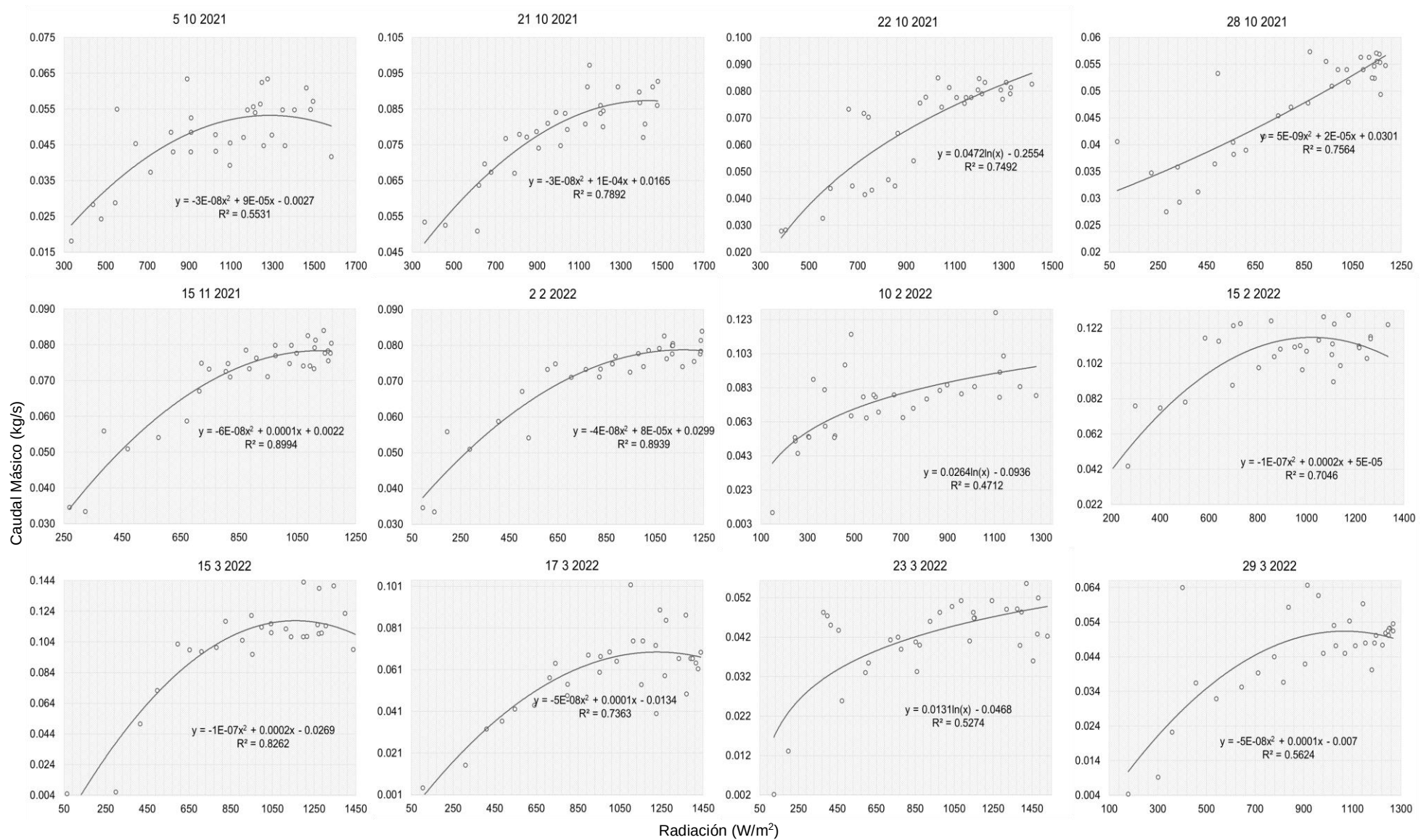


Gráfico 5.4. Regresión realizada entre la radiación (parámetro independiente) y el caudal másico (variable dependiente) para los diferentes días de medición con un R² igual o mayor a 0.5.

Del total de los días evaluados, se obtuvo una relación significativa para 12 de ellos, siendo en la mayoría de los casos, una relación cuadrática la que mejor explicó dicha dependencia. Los días que no reportaron dicha relación fue debido a que los datos tuvieron una gran dispersión la cual pudo haber sido ocasionada por distintos tipos de errores introducidos a la hora de medir la velocidad en el colector solar o por la inestabilidad de los parámetros ambientales como el viento circundante. A partir del gráfico 5.4, si bien no podemos concluir acerca de una relación que explique de manera global la dependencia del caudal másico en función de la radiación de forma tal de definir una ecuación general para el equipo; si podemos determinar que dicha relación existe siendo directamente dependiente: a mayor radiación, mayor caudal másico, respondiendo según lo esperado para equipos pasivos, ya que el aire al calentarse a mayores temperaturas debido a mayores radiaciones, genera diferencias de presión más grandes y en consecuencia flujos mayores.

El gráfico 5.5 muestra el mismo análisis que para la situación anterior, pero en este caso entre la humedad relativa del aire de salida y la radiación incidente en el colector. En este caso se encontró una relación significativa cuyo R^2 fue mayor o igual a 0.5 para 14 de los 15 días de medición. Durante el primer día de experimentación por diferentes deficiencias en el proceso de medición no se pudieron registrar parámetros ambientales por lo que no se pudo determinar la dependencia aquí estudiada. En este caso la mayoría de las regresiones son una relación polinómica de segundo grado. Esto permitió la determinación de una ecuación global (ecuación 5.6), a partir de todos los días de medición, con un $R^2=0.71$ que relaciona la humedad relativa del aire de salida del colector y la radiación.

$$H_{out} = 4 \times 10^{-0.5} \times I_g^2 - 0.0995 \times I_g + 64.045 \quad \text{Ecuación 5.6}$$

Dónde:

H_{out} = Humedad relativa del aire a la salida del colector (%)

I_g = Radiación global medida en la superficie de colección (W/m^2)

La humedad relativa medida a la salida del colector fue en promedio del 14% siendo esto muy importante desde el punto de vista de secado, la misma tuvo una gran fluctuación entre 3 % y el 87%, los máximos registrados se observaron durante la mañana o momentos de baja radiación.

A partir de los análisis hasta aquí realizados se pudo determinar el buen funcionamiento de colector solar diseñado y construido, verificando que el aire entregado tiene las propiedades psicrométricas básicas para aplicaciones de secado. En la sección del análisis de la cámara (sección 5.4.2.) se estudia el balance global del sistema a partir del cual se puede determinar si la energía que el equipo entrega es suficiente para secar el producto alojado en la cámara cuando la misma se carga a diferentes capacidades.

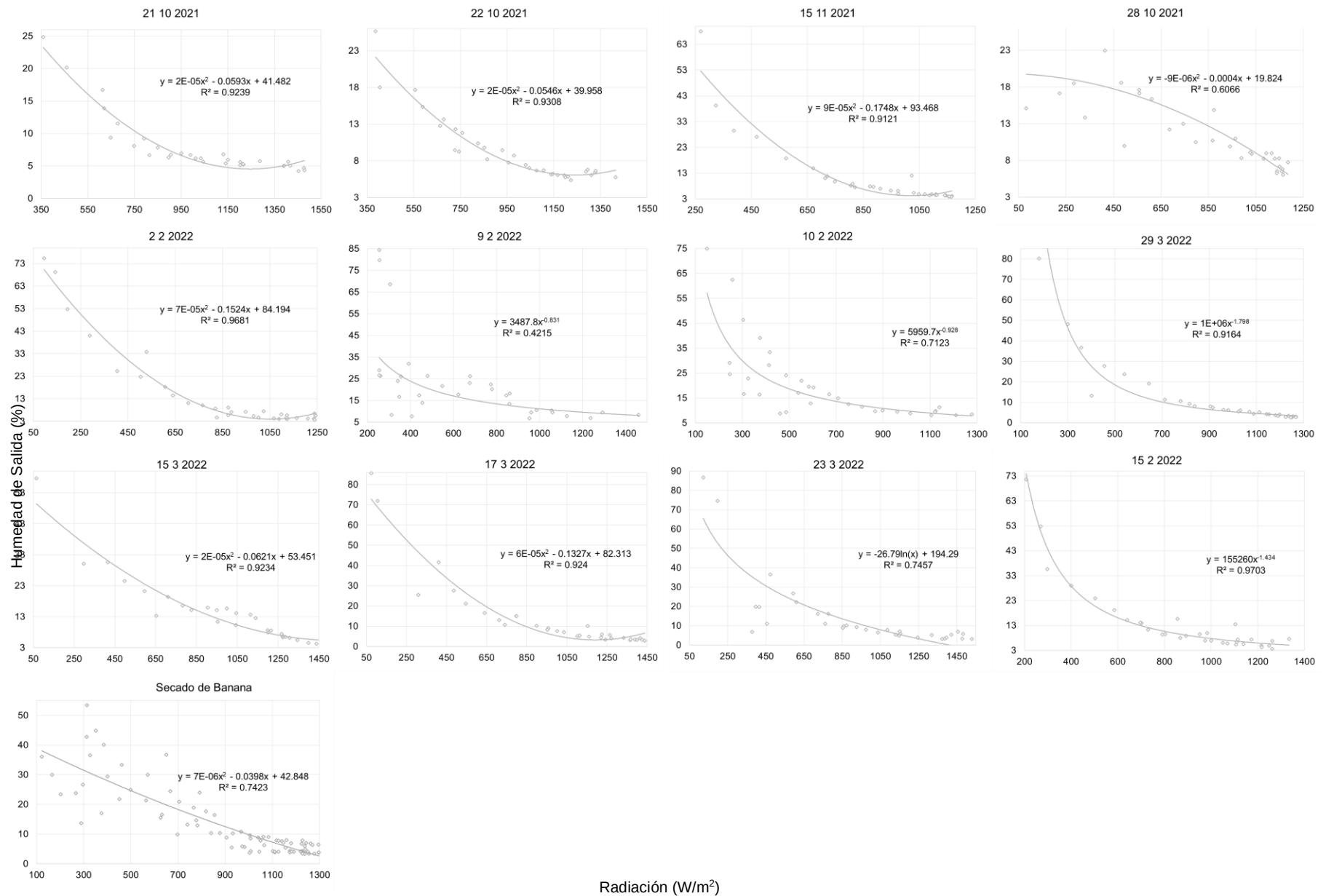


Gráfico 5.5. Regresión entre la humedad relativa del aire de salida y la radiación global incidente medida sobre la superficie de colección para los distintos días de medición.

5.4.2. Caracterización experimental del equipo vacío.

La primera instancia de evaluación global del equipo, orientada a determinar la capacidad real de secado que tiene el deshidratador propuesto, estuvo orientada básicamente a determinar la relación entre la temperatura que alcanza el aire dentro de la cámara en función de la temperatura del aire entregado por el colector, así como si hay zonificación o diferencias significativas en las temperaturas medidas en distintos puntos de la misma.

A partir de las mediciones realizadas con el equipo sin carga se pudo determinar una caída en la temperatura del aire entre la salida del colector (T_{out}) y la base de la chimenea (T_8) del promedio de 2.5 °C (4.6 %), ver tabla 5.10 - anexos. Esta caída debida a las diferentes pérdidas, puede considerarse prácticamente despreciable, pudiendo concluirse en primera instancia un buen diseño de la cámara en cuanto a dimensionamiento y aislación, lo cual se pudo observar por un lado en cuanto a que las temperaturas en T_8 tendieron a ser más altas por momentos que las temperaturas en T_{out} , especialmente pasado el mediodía solar, indicando que, gracias a la aislación, la cámara tendió a acumular el calor proveniente del colector solar. Por otro lado, también se observó que independientemente de las condiciones del tiempo, las temperaturas dentro de la cámara se mantuvieron en promedio en 51 °C, óptimas para lograr un proceso de secado sin superar las máximas temperaturas que puedan deteriorar la calidad final del producto.

En el gráfico 5.6 se puede ver con mayor claridad que no hay diferencias significativas entre las temperaturas medidas en los distintos puntos de la cámara y la temperatura del aire entregada por el colector. Sin embargo, pudo observarse para el día 22/10/2021, un comportamiento interesante desde el punto de vista del secado de alimentos. El aire entregado por el colector solar de aire alcanzó temperaturas durante el mediodía solar que rondaron los 80°C manteniéndose la temperatura en la cámara en un promedio de 54°C. Este salto térmico ejemplifica y evidencia la importancia del correcto dimensionamiento tanto de la chimenea como del diseño trapezoidal del colector, gracias a los cuales la circulación pasiva del aire se ve favorecido al aumentar las diferencias de temperatura entre la entrada y salida del colector como consecuencia de una mayor diferencia de presiones, lo que permite a su vez independientemente de las temperaturas entregadas por el colector solar, mantener temperaturas promedio en la cámara óptimas para el secado.

Se lograría a su vez, con éste comportamiento, un mayor arrastre de humedad manteniéndose condiciones óptimas de temperatura de secado dentro de la cámara sin sobrepasar máximos que pudieran afectar los alimentos en proceso de deshidratación; esto último es posible de ser respaldado con los datos mostrados en la tabla 5.9 en la cual se observa que para dicho día los picos en el caudal másico son del orden de los 0.092 – 0.094 kg/s los cuales se dan junto a los picos en la radiación registrada sobre la superficie de colección, entre las 13.5 y las 14.3 horas, franja horaria en que la misma alcanza valores entre los 1200 y 1416 W/m².

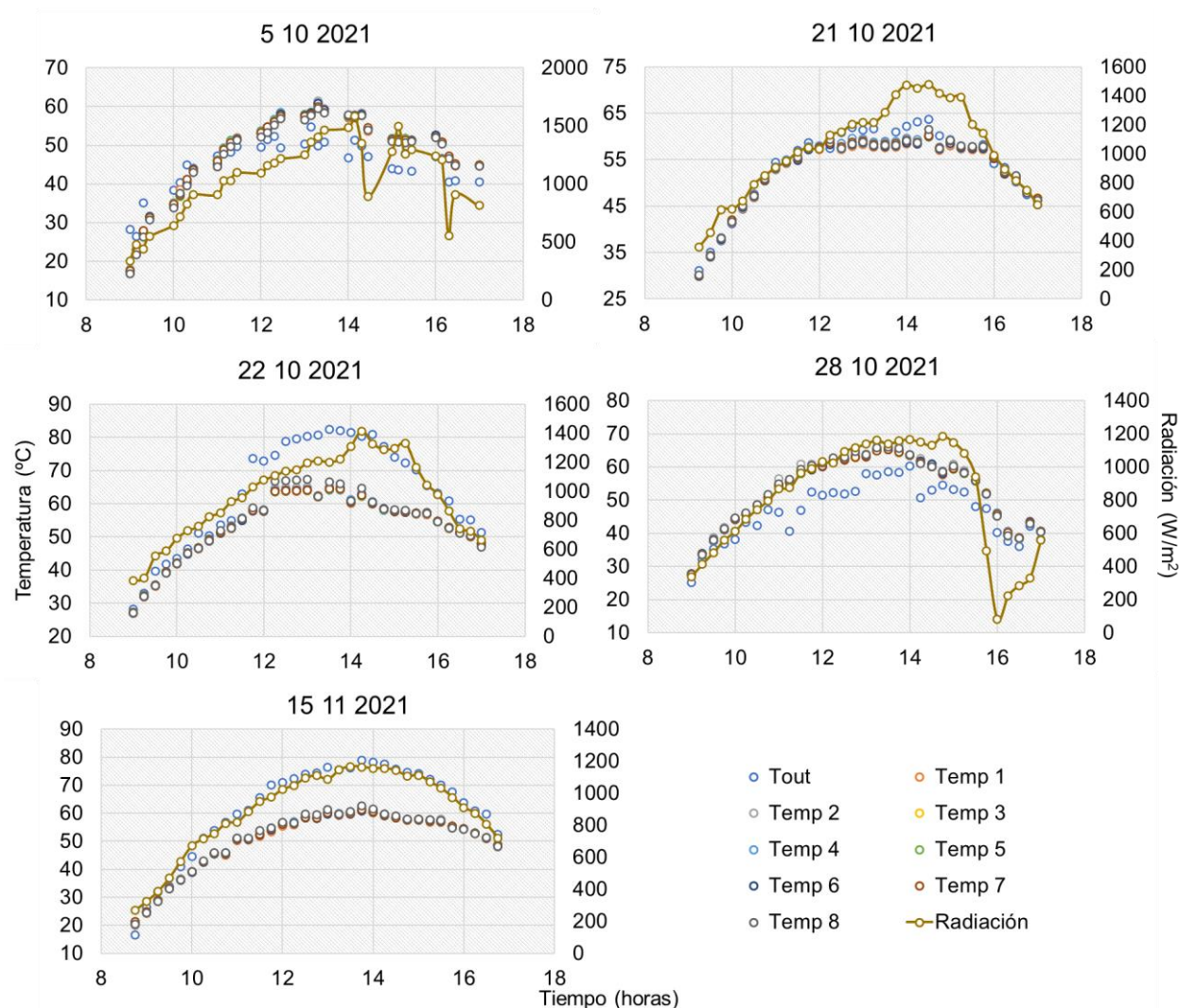


Gráfico 5.6. Perfil de temperaturas registrada dentro de la cámara vacía en contraste con el recurso solar en función del tiempo.

Por último, se encontró con un $R^2=0.74$ una relación de regresión de tipo polinómica de segundo grado entre la cantidad de radiación incidente sobre la superficie de colección y la temperatura promedio de la cámara de secado cuando ésta está vacía, ver gráfico 5.7, lo que indicaría que la ecuación encontrada explica el 74% de la variabilidad de la temperatura en función de la radiación. Dicha ecuación permitirá entonces predecir el valor promedio de la cámara para un instante dado en función de cuanto recurso solar tenga en este instante.

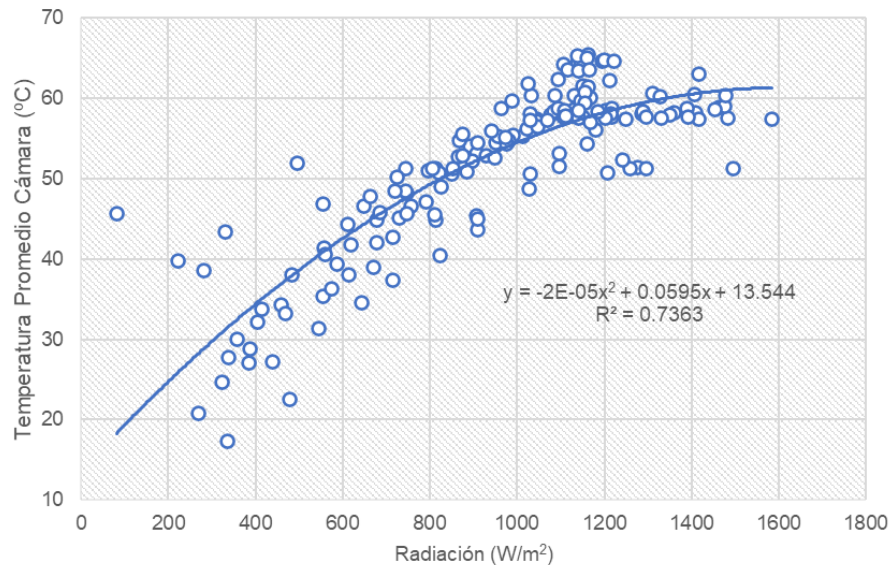


Gráfico 5.7. Regresión polinómica de segundo grado entre la temperatura promedio de la cámara (Eje Y) y la radiación incidente sobre la superficie de colección (Eje X).

5.4.3. Caracterización experimental del equipo cargado con bandejas de agua.

Durante esta etapa se realizaron pruebas de funcionamiento del equipo cargado con bandejas de agua a 3 capacidades distintas, 1/3, 2/3 y 3/3 de la capacidad total. Si bien estas pruebas se tratan de la evaporación de agua libre, situación que cuando tenemos un alimento, no se da de la misma forma; nos permite de todos modos continuar profundizando en la caracterización del funcionamiento del deshidratador.

Se realizaron pruebas para un total de 8 días, disponiéndose 21 bandejitas plásticas con agua por cada bandeja del equipo, cargándose la cámara según lo detallado en la figura 5.11. Cada una de las bandejitas plásticas se llenó con aproximadamente 50 ml de agua exceptuando la primera prueba la cual sirvió más bien a modo de ensayo general de esta etapa experimental. Dicho día las bandejitas se llenaron con aproximadamente 100 ml siendo igual a una carga de aproximadamente 9 kg de agua a ser evaporada a 1/3 de capacidad. Debido a que el equipo se pensó para una capacidad total de 10 kg de producto fresco, equivalente en función a las curvas de secado realizadas, a aproximadamente 6 kg de agua a ser evaporada; se consideró que no sería representativo evaluar el equipo con tanta cantidad de agua a 1/3 de la capacidad total. Es por esto último que se optó finalmente por llenarlas con menos cantidad de agua tratando de reproducir las condiciones reales de funcionamiento lo máximo posible.

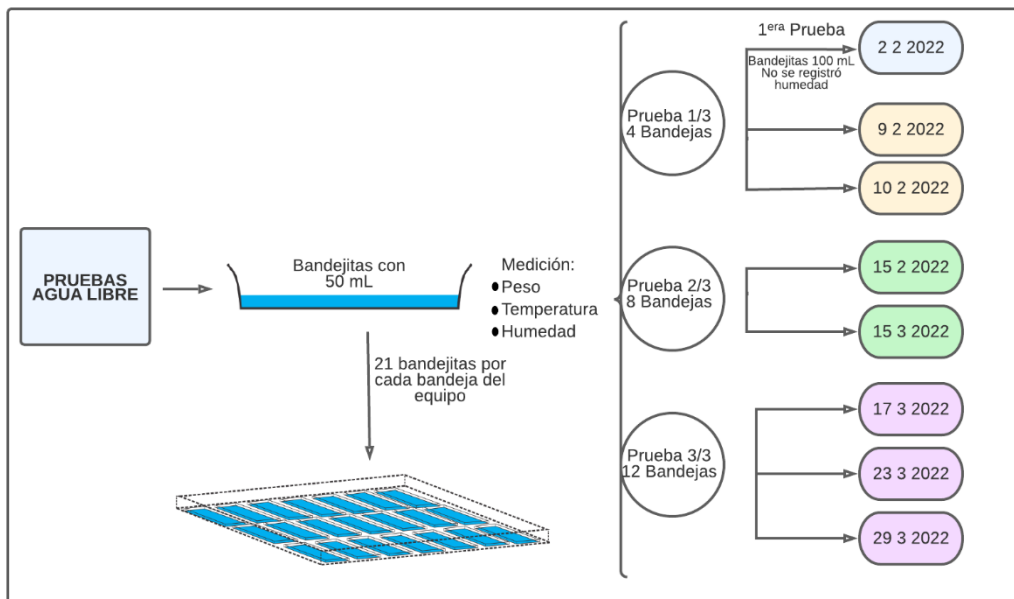


Figura 5.11. Proceso de evaluación experimental mediante la utilización de bandejas con agua.

En todos los casos se midió la temperatura del agua dentro de las bandejas mediante el empleo del sistema de adquisición de datos de temperatura Pasco capstone detallado en la tabla 5.7. Se determinó la evolución del peso a lo largo del día de secado realizando el pesaje de una muestra de bandejitas la cual estuvo compuesta por 3 bandejitas a 1/3 de capacidad, 4 bandejitas a 2/3 de capacidad y 6 bandejitas a capacidad completa. A partir de dicho muestreo se calculó para cada uno de los días de medición, la tasa de evaporación según la ecuación 5.7.

$$TE = \frac{\sum_{bandeja\ x}^{bandeja\ 1} \frac{\Delta Peso}{N^{\circ} Pesajes - 1}}{N^{\circ} de bandejas} \quad \text{Ecuación 5.7}$$

Dónde:

TE= Tasa de evaporación expresada en gramos de agua/ hora.

Δ Peso: Es el cambio registrado en el peso para el intervalo de una hora expresado en gramos.

N° Pesajes: Es la cantidad de veces que se pesó las bandejas durante el día de medición.

N° de bandejas: Es el tamaño de la muestra.

Se analizó el perfil de temperaturas dentro de la cámara cuando la misma tiene carga de agua libre. Se realizó finalmente un balance entre la energía entregada por el colector solar de aire y la efectivamente utilizada en la evaporación del agua. Para esto se calculó la energía entregada como $Q_u \cdot \Delta t$, donde Δt es el intervalo de medición en segundos. Posteriormente se calculó el total de la energía utilizada en la evaporación del agua mediante la ecuación 5.8:

$$Q_{te} = Q_{sen} + Q_{vap} \quad \text{Ecuación 5.8}$$

Dónde:

Q_{te} = Es la energía total utilizada en la evaporación del agua. (J)

Q_{sen} = Es el calor sensible involucrado en el proceso de calentamiento del agua, ecuación 5.9. (J)

Q_{vap} = Es el calor de vaporización obtenido mediante la ecuación 5.10 (Saravia Mathon, 2010). (J)

$$Q_{sen} = m \times C_{p_{agua}} \times (\Delta T) \quad \text{Ecuación 5.9}$$

$$Q_{vap} = \frac{8134}{18.01} \times [6547.1 - 4.23 \times (T + 273.16)] \times \Delta m \quad \text{Ecuación 5.10}$$

Dónde:

m: Masa del agua en kg.

T: Temperatura del agua en °C.

El balance energético (B_q) se expresó en términos de fracción según la ecuación 5.11 que facilita la interpretación en función de los criterios resumidos en la tabla 5.11.

$$B_q = \frac{Q_u}{Q_{te}} \quad \text{Ecuación 5.11}$$

Tabla 5.11. Criterios de evaluación para la interpretación del índice de balance energético.

Criterio	Interpretación
$B_q > 1$	La cantidad de energía provista por el CSA* es suficiente para el secado de la carga permitiendo aumentarla.
$B_q = 1$	La cantidad de energía provista por el CSA* es justa para la cantidad de carga de la cámara de secado.
$B_q < 1$	La cantidad de energía provista por el CSA* es insuficiente para la carga de la cámara de secado evaluado la cual debe ser menor.
*CSA: Colector solar de aire.	

A partir de lo detallado anteriormente se obtuvieron los valores de temperatura para todos los días de medición los cuales se muestran en la tabla 5.12 - anexos. En esta oportunidad se observó una caída en la temperatura entre el aire a la salida del colector (T_{out}) y el último punto de medición ubicado a la base de la chimenea (T_7) de 14.85 °C (24.8%). Esta mayor caída en la temperatura respecto a las mediciones con la cámara vacía se debe al enfriamiento evaporativo producto del cambio de fase del agua contenido en las bandejas. Se observó mayor caída de temperatura a mayor capacidad de carga siendo de -9.37 °C (17.7%) para 1/3 de capacidad, -14.14 °C (23.5%) para 2/3 de capacidad y -20.8 °C (31%) para la capacidad completa. La temperatura del agua se mantuvo en todos los casos siempre menor a la temperatura del aire de la cámara en un promedio de aproximadamente 10 °C.

El gráfico 5.8 muestra las diferencias de temperatura, así como la distribución de estas a lo largo del día donde se puede observar que la tendencia de las mismas sigue el comportamiento de del recurso solar disponible, es decir a mayor radiación medida, mayores las temperaturas determinadas en los diferentes puntos de medición incluida la temperatura del agua. Sin embargo, a diferencia de la situación con la cámara vacía, se puede ver mayor inercia respecto a la variación de la radiación, los picos de caída y subida se ven atenuados en las temperaturas respecto a la oscilación en la radiación incidente sobre la superficie de colección.

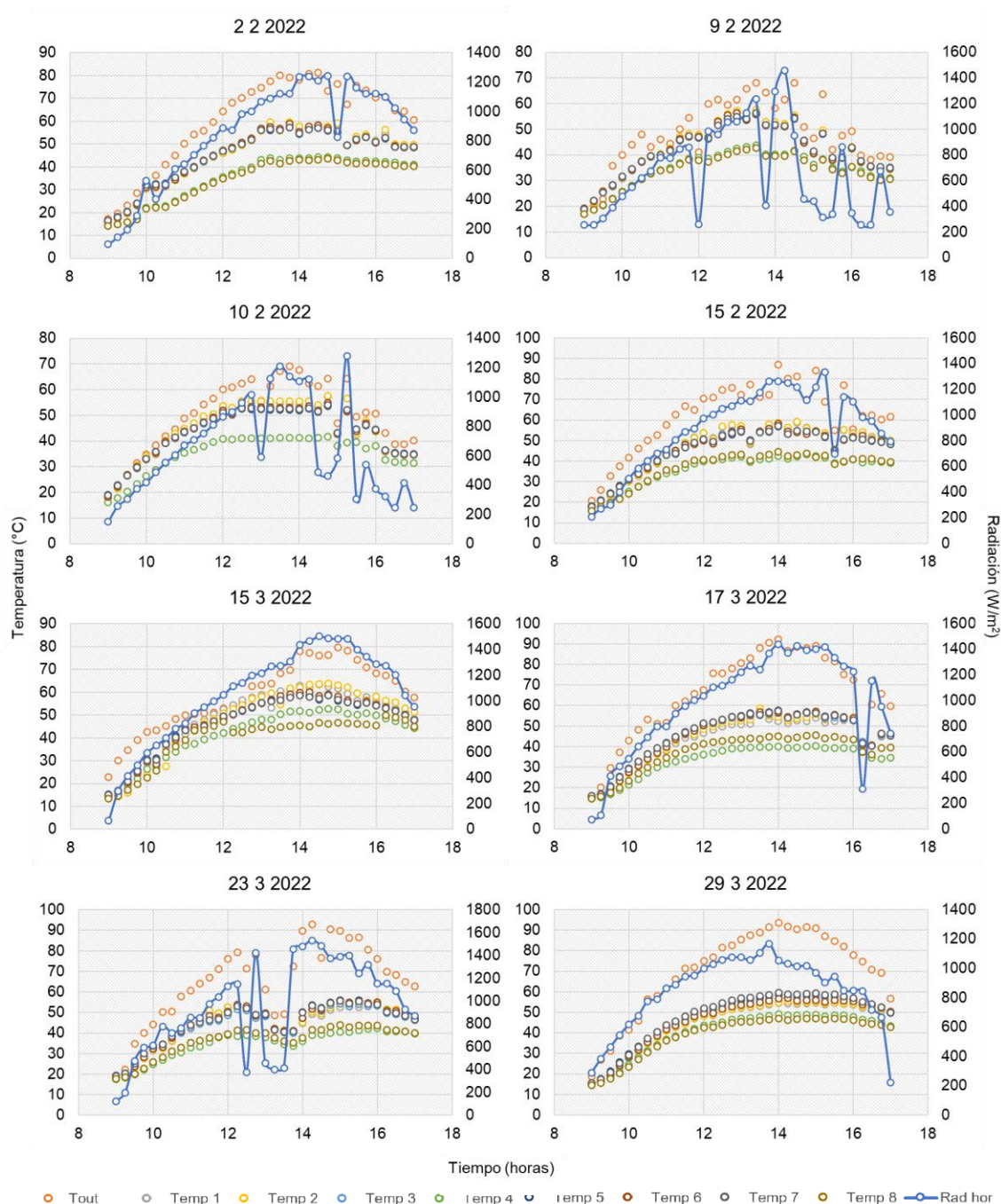


Gráfico 5.8. Variación de las temperaturas y el recurso solar a lo largo del día de medición.

En la tabla 5.13 - anexos se muestra las mediciones realizadas de humedad relativa registrada según lo detallado en la figura 5.9. Dicho registro se hizo para todos los días exceptuando el primero (22/2/2022) debido a que como ya se mencionó, recién a partir de las mediciones realizadas desde el día 10/2/2022 se contó con el instrumental necesario.

Debido al proceso de evaporación que se genera dentro de la cámara de secado, es de esperarse que cuando la cámara tiene carga, la humedad en la misma aumente conforme desciende la humedad del producto. Lo anterior pudo observarse en las mediciones con agua libre donde se observó en promedio un aumento en el 15% de la humedad relativa en el aire a la salida de la cámara en relación al aire de salida del colector, aumento equivalente al 95% del total de este último, es decir el aumento de la humedad relativa del aire fue de casi al doble. En este caso cuando la capacidad de carga fue de 1/3 se registró en promedio solo un aumento en la humedad relativa del 8.4% a diferencia de la situación con la capacidad de carga a 2/3 y 3/3 entre las cuales prácticamente no hubo diferencia registrándose un aumento respecto al aire de salida del 30.7% y 31.3% respectivamente.

En el gráfico 4.9 es posible observar las humedades relativas registradas a lo largo del perfil vertical de la cámara en contraste con la evolución de la radiación en función del tiempo. En dicho gráfico se puede ver la diferencia en la humedad entre el aire de salida del colector y los distintos puntos dentro de la cámara los cuales, si bien evidencian pequeñas diferencias entre ellos, todos alcanzan los menores picos cuando la radiación registra sus máximos. Se observa a su vez que si bien es prácticamente homogénea la humedad en los 4 puntos de medición hay mayor humedad relativa registrada en el primero de ellos, es decir el más cercano a la entrada del aire desde el colector, decreciendo levemente a medida que nos aproximamos a la salida de la cámara, esto puede deberse a que las bandejas de la parte inferior de la cámara reciben el aire más caliente y más seco produciéndose mayor evaporación del agua, aumentando en consecuencia la humedad relativa circundante a dichas bandejas. Es por esto que el secado de alimentos nunca se da de manera totalmente homogénea en los distintos niveles de bandejas dentro de la cámara siendo una buena recomendación el rotar las bandejas al inicio de cada día de secado para procesos que duran más de un día.

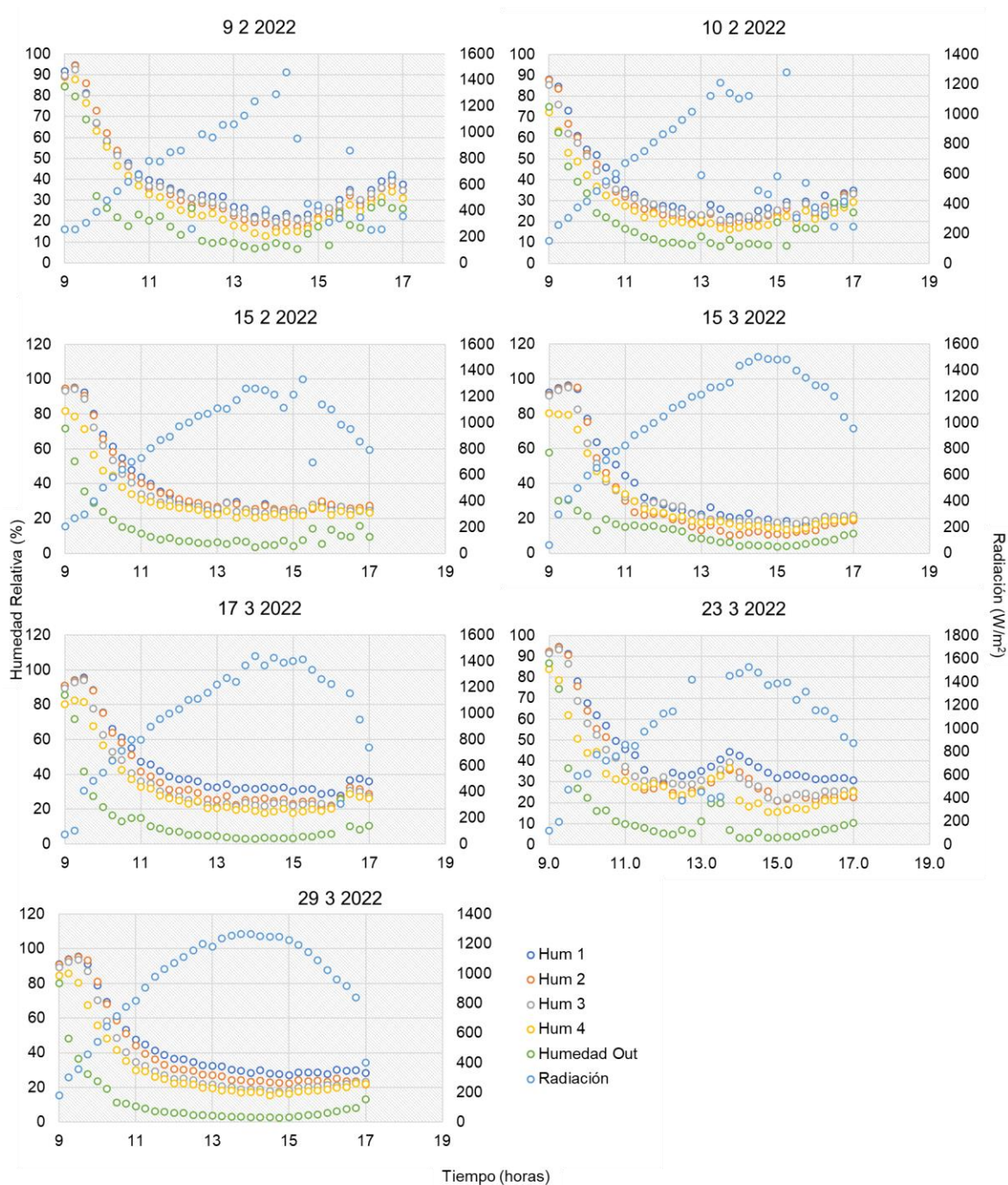


Gráfico 5.9. Evolución de la radiación y la humedad relativa medida en los distintos puntos de la cámara en función del tiempo.

Se muestra finalmente en la tabla 5.14 el balance energético realizado para todos los días de medición con agua libre el cual siempre resulta mayor a 1 sin embargo independientemente de la carga y el Q_u del colector, la tasa de evaporación se mantiene prácticamente constante estando ésta fuertemente determinada por el caudal másico por lo cual es posible concluir parcialmente que en realidad la capacidad de carga del equipo no es exclusiva de cuanto producto se coloque en la

cámara sino más bien de una interacción de factores entre la radiación incidente sobre la superficie de colección, el Q_u , el flujo másico, la cantidad de carga, entre otros.

Tabla 5.14. Balance energético y tasa de evaporación calculado para los distintos días de medición.

Día	Carga	Q_u (MJ)	Q_{te} (MJ)	Bq	TE (gr de agua/hr)
2/2/2022	1/3	62.8	4.5	14	1.14
9/2/2022	1/3	16.8	2.1	8	1.27
10/2/2022	1/3	15.7	2.4	7	1.48
15/2/2022	2/3	49.8	5.6	9	1.52
15/3/2022	2/3	38.5	6.0	7	1.65
17/3/2022	3/3	39.0	6.3	6	1.16
23/3/2022	3/3	24.7	5.6	4	1.04
29/3/2022	3/3	29.7	6.6	5	1.21

5.4.4. Caracterización experimental del equipo cargado con banana.

Durante la última instancia de pruebas experimentales se realizó el secado de banana. La misma se cortó con un espesor de 0.5 cm realizándose los diferentes pretratamientos ya estudiados en el capítulo 3. Se realizó la carga de 4 bandejas con banana sin pretratamiento, 4 bandejas con ácido cítrico, 1 bandeja con metabisulfito, 1 bandeja con vino y 2 bandejas con bicarbonato de sodio. La cantidad de bandejas por pretratamiento fue determinada de manera aleatoria. Se determinó el peso inicial total de la carga de banana y de la cantidad según el pretratamiento, tabla 5.15. La carga total fue aproximadamente de 9 kg.

Durante el proceso de secado se muestreó la evolución de la temperatura de la banana en tres puntos diferentes junto a la evolución del peso, a partir del cual se calculó la humedad en base húmeda (X_{wb}) en función del tiempo para cada uno de los pretratamientos realizados, así como del peso total. El tiempo de secado se determina cuando alcanza peso constante, durante un total dos días y medio. Posteriormente se realizaron diferentes pruebas organolépticas.

Tabla 5.15. Evolución del peso total y de cada uno de los pretratamientos en función del tiempo y de la humedad en base húmeda (X_{wb})

Día	Tiempo (hora)	Sin Tratamiento (kg)	Ácido Cítrico (kg)	Vino (kg)	Metabisulfito de Na (kg)	Bicarbonato de Na (kg)	Peso Total (kg)
4 y 5 2022	13.25	3.14	3.27	1.16	1.29	2.15	8.85
	14.00	3.08	3.29	1.22	1.33	2.21	8.99
	15.00	2.92	3.14	1.18	1.24	2.11	8.56
	16.00	2.77	2.97	1.09	1.15	2.00	8.06
	17.00	2.61	2.78	1.03	1.09	1.91	7.60

5 5 2022	9.00	2.58	2.65	0.96	1.01	1.79	7.23
	10.00	2.36	2.33	0.95	0.98	1.63	6.71
	12.00	2.00	1.81	0.78	0.70	1.32	5.36
	14.00	1.80	1.58	0.66	0.62	1.01	4.60
	16.00	1.63	1.40	0.57	0.56	0.86	4.06
	17.00	1.55	1.31	0.54	0.52	0.81	3.83
6 5 2022	9.00	1.52	1.31	0.52	0.51	0.79	3.75
	10.00	1.44	1.27	0.49	0.49	0.74	3.58
	12.00	1.39	1.24	0.46	0.47	0.73	3.44
	14.00	1.32	1.17	0.42	0.44	0.68	3.23
	16.00	1.32	1.18	0.42	0.44	0.68	3.23
	17.00	1.32	1.18	0.42	0.44	0.68	3.23
Día	Tiempo (hora)	Xwb_ST (%)	Xwb_AC (%)	Xwb_V (%)	Xwb_MNa (%)	Xwb_BNa (%)	Xwb (%)
4 5 2022	13.25	57.82	63.78	64.00	65.73	68.50	63.49
	14.00	57.06	64.06	65.71	66.82	69.35	64.06
	15.00	54.75	62.30	64.53	64.39	68.00	62.23
	16.00	52.33	60.17	61.70	61.78	66.24	59.90
	17.00	49.29	57.41	59.55	59.44	64.60	57.49
5 5 2022	9.00	48.75	55.34	56.36	56.29	62.26	55.30
	10.00	43.92	49.17	55.83	55.21	58.55	51.83
	12.00	33.80	34.75	46.27	37.07	48.72	39.71
	14.00	26.67	25.20	36.84	29.13	32.77	29.66
	16.00	18.75	15.60	27.27	20.65	21.57	20.42
	17.00	14.88	9.80	22.58	15.12	16.67	15.60
6 5 2022	9.00	12.80	9.80	19.10	14.12	13.98	13.70
	10.00	8.33	7.07	15.29	9.88	9.09	9.63
	12.00	4.67	4.17	10.00	6.41	6.98	6.12
	14.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	16.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	17.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Se graficó la curva de secado, gráfico 5.10, realizada para el total de la banana que fue deshidratada. En dicho gráfico se puede observar la forma característica de una curva de secado para un producto, con las 3 fases del proceso descriptas con anterioridad bien delimitadas. El peso total final del producto ya deshidratado fue de 3.23 kg, es decir que la banana que se utilizó tenía una humedad inicial en base húmeda del 63.5%, igual a aproximadamente 5.62 kg de agua, dentro del promedio determinado previamente en laboratorio con la realización de las curvas de secado.

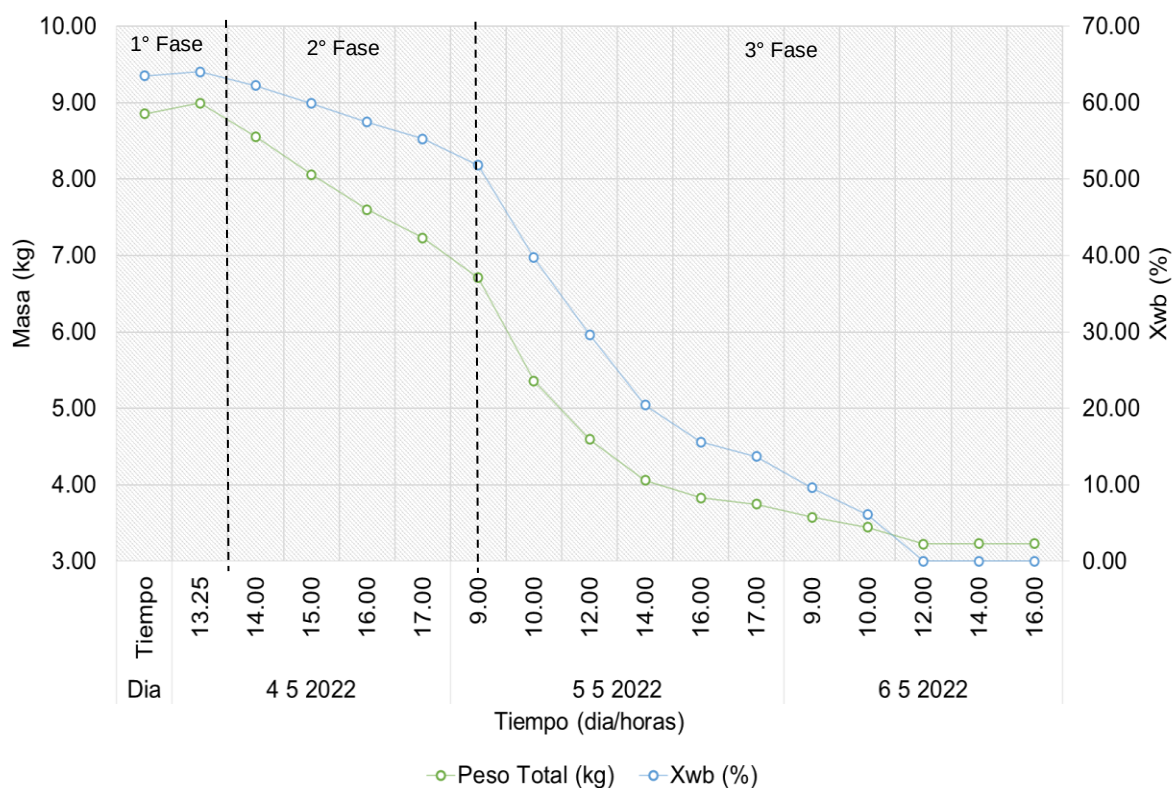


Gráfico 5.10. Curva de la evolución de la masa y la humedad en base húmeda en función del tiempo para el total de la banana deshidratada.

De la misma forma que para el peso total, se procedió de manera diferenciada para cada uno de los pretratamientos, ver gráfico 5.11, pudiéndose observar que, si bien el comportamiento a lo largo del proceso es similar, demorando prácticamente lo mismo el proceso de deshidratación independientemente de cuál haya sido el tratamiento previo realizado, al inicio la humedad es mayor para las bananas pretratadas, fenómeno previsto y observado en laboratorio.

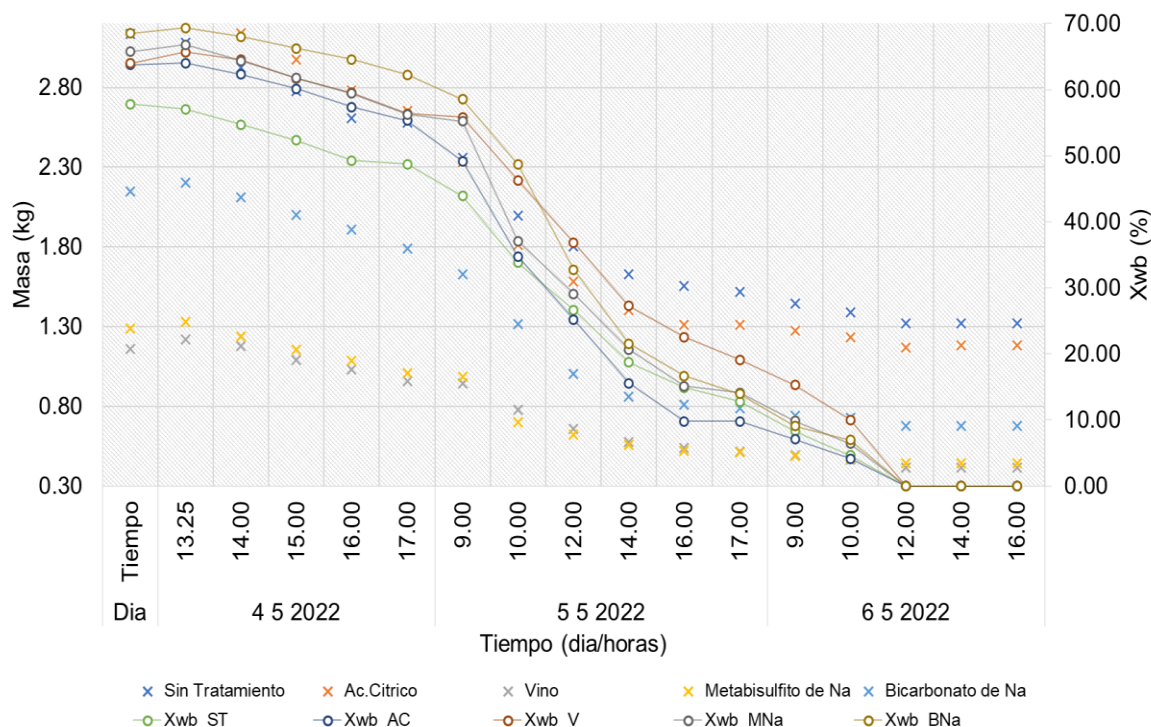


Gráfico 5.11. Curva de la evolución de la masa y la humedad en base húmeda en función del tiempo para los diferentes pretratamientos realizados durante el secado de banana.

En la tabla 5.16 – anexos se detallan las temperaturas registradas en los diferentes puntos de medición, así como la temperatura promedio del producto obtenida de la media aritmética de los registros realizados en tres puntos diferentes y la temperatura promedio de la cámara y del aire circundante a la banana. A partir de dichos registros se puede ver como la temperatura promedio de la cámara fue en aumento a medida que el proceso de secado avanzó y en consiguiente la humedad evaporada fue disminuyendo. Esto se evidencia también en la diferencia registrada entre la temperatura del producto y la del aire circundante al mismo, la cual fue tendiendo a cero cuando el peso empezó a permanecer constante, es así que la diferencia entre la temperatura promedio medida debajo de la chimenea y la temperatura promedio del aire entregada por el colector fue también decreciendo registrándose una diferencia entre estos de 24.7 °C para el primer día y de 7.8 °C y 8.3 °C para el segundo y tercer día de secado respectivamente.

Este fenómeno que se da con las temperaturas a lo largo del proceso permitiría suponer que otro método para determinar la finalización del proceso de secado además del registro del peso es la diferencia de temperaturas entre el aire envolvente al producto y el producto mismo tendiendo a ser cero cuando el producto está totalmente seco.

El gráfico 5.12 muestra dicho fenómeno de homogeneización de temperaturas dentro del colector. Las temperaturas T4, T6 y T8 corresponden al producto pudiendo observarse que los dos primeros días están levemente por debajo del resto para prácticamente unificarse durante el último día de secado.

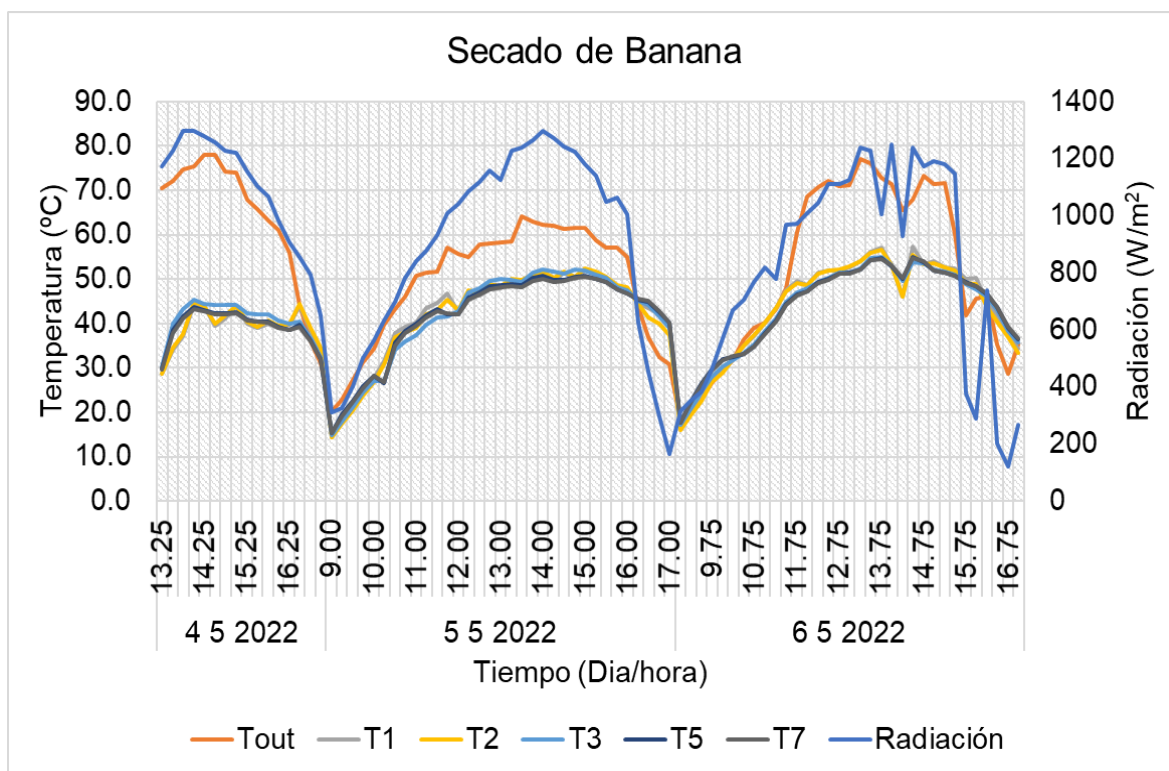


Gráfico 5.12. Perfil de temperaturas determinado a lo largo del proceso completo de secado.

Por otro lado, se observa en dicho gráfico, al igual que para las primeras etapas de experimentación, que las temperaturas siguen el comportamiento del recurso solar registrado sobre la superficie de colección. Una cuestión importante de la experiencia con producto real fue observar que independientemente de la temperatura del aire entregado por el colector, tanto el producto como el aire envolvente siempre se mantuvo debajo del máximo recomendado para el secado de banana, que es de 80°C

En la tabla 5.17 – anexos se puede leer el registro de la humedad relativa el cual se realizó de la misma forma que en la etapa con agua libre. En la misma es posible observar que la humedad relativa promedio de la cámara disminuye a medida que el proceso de secado avanza, de igual manera sucede con las diferencias entre la humedad relativa a la salida de la cámara y la humedad relativa del aire que proviene del colector solar registrándose una diferencia promedio del 24.1 % para el primer día, del 14.8% para el segundo y del 3.4% para el último día de secado. Se observa nuevamente que la humedad relativa decrece a medida que el aire se aleja de la boca del colector.

La evolución de las humedades relativas dentro de la cámara y a la salida del colector fueron graficadas en función del tiempo siendo contrastadas con el recurso solar como puede verse en el gráfico 5.13. Se puede ver nuevamente que la dinámica de las mismas es contrapuesta a la cantidad de recurso solar y el momento del día. Se observa también una tendencia a homogeneizarse a medida que avanza el proceso de secado y es menor la humedad que se le extrae al producto.

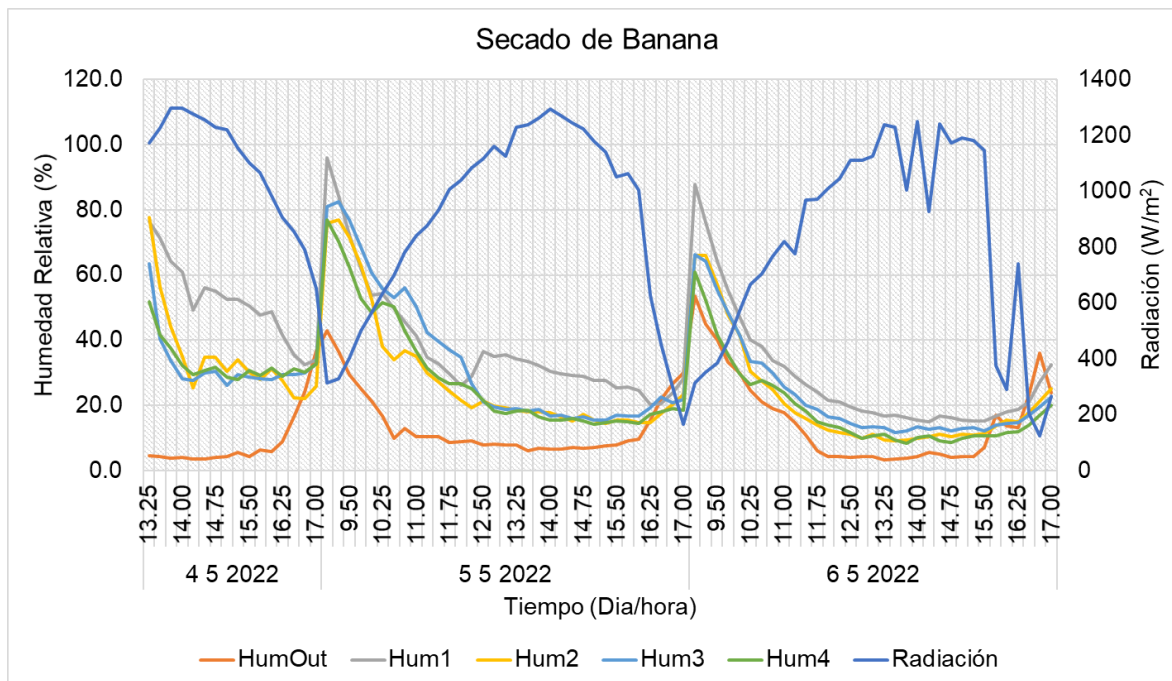


Gráfico 5.13. Humedades relativas y radiación sobre la superficie de colección en función del tiempo.

Se detalla, por último, en la tabla 5.18, el balance energético (Bq) realizado de la misma forma que se especificó para las pruebas con agua libre, el cual da mucho menor que los realizados en dicha instancia, esto se debe a que la energía que se necesita para evaporar el agua contenida dentro de la banana es mucho mayor al alojarse la misma dentro del producto con distintas formas de ligación debiendo vencerse dichas fuerzas para que el secado sea adecuado.

Tabla 4.18. Balance energético realizado para el secado de banana.

Día	Carga	Qu (MJ)	Qte (MJ)	Bq
4 5 2022	Banana	39.1	14.0	2.8
5 5 2022				
6 5 2022				

Durante la etapa de secado de banana se probó también el sistema auxiliar de calentamiento para los días 5/5/2022 y 6/5/2022 (segundo y tercer día de secado). El mismo se encendió mientras se preparaba todo el instrumental para comenzar las mediciones a partir de las 9 am, funcionando una hora cada uno de los días, de 8 am a 9 am, como forma de precalentamiento de la cámara. De esta forma para el día 5/5/2022 se logró en dicha hora un salto térmico de casi 10 °C pasándose de una temperatura de cámara promedio de 4.9 °C a 14 °C y una diferencia en la humedad relativa del 8% pasándose de una humedad promedio de cámara de 90 % a 82 %.

El día 6/5/2022, en el cual el producto ya se encontraba prácticamente seco, se logró un salto térmico prácticamente igual al día anterior, del orden de los 9 °C, pasándose de 6.5 °C a 14.4 °C y una diferencia en la humedad relativa promedio de 14% pasándose de 84.7 a 70.3%. Es decir que no hubo prácticamente diferencias en el desempeño del caloorventor entre ambos días, permitiendo precalentar levemente la cámara de secado de forma tal de que el sistema comience a funcionar con

10 °C por encima. Sería sin embargo pertinente evaluar su desempeño para mantener temperaturas y humedades relativas en vez de utilizarlo como sistema de precalentamiento, como así también continuar el proceso de secado durante la noche, quedando esto pendiente para futuras experiencias.

- CAPITULO 6 -

ANÁLISIS DE CALIDAD

6. Análisis sensorial

Si bien la calidad de los alimentos está determinada por su inocuidad, su seguridad alimenticia y su valor nutricional, entre otros; son aquellos parámetros relacionados con la percepción subjetiva, como el olor, sabor, apariencia, textura y color, los que finalmente determinarán su aceptación o rechazo por parte del consumidor. Dichos parámetros subjetivos pueden ser evaluados mediante los análisis de tipo sensoriales, los cuales consisten en diferentes pruebas orientadas a evaluar las propiedades organolépticas de un producto determinado, y que pueden ser realizados con más de un propósito. La tabla 6.1 describe de manera muy sintética los principales tipos de análisis que se puede realizar a la par de los objetivos de cada uno de ellos.

Tabla 6.1. Tipos de análisis sensoriales. Fuente: Liria Domínguez (2007)

Tipo de análisis	Objetivo del análisis	Pregunta de interés	Tipo de prueba	Características de los evaluadores.
<i>Discriminatorio</i>	Determinar si dos productos son percibidos de manera diferente por el consumidor	¿Existen diferencias entre los productos?	Analítica	Reclutados por agudeza sensorial, algunas veces entrenados.
<i>Descriptiva</i>	Determinar la naturaleza de las diferencias sensoriales	¿En que tipos de características específicas difieren los productos?	Analítica	Reclutados por agudeza sensorial y motivación, entrenados o altamente entrenados.
<i>Afectiva</i>	Determinar la aceptabilidad de consumo de un producto	¿Qué productos gustan más? y ¿cuáles son los preferidos?	Hedónica	Reclutados por uso del producto, no entrenados.

Los análisis sensoriales permiten a su vez generar información para mejorar las cualidades del producto en función de la percepción de los consumidores, con el objeto de aumentar su calidad y aceptabilidad, de forma tal de obtener propuestas alimenticias con óptimas características sensoriales. Los mecanismos utilizados para evaluar la calidad pueden ser divididos en: 1) escalas objetivas, a partir de la utilización de instrumentos de medición, los cuales son en general costosos y no tan comunes determinando muchas veces su inaccesibilidad, y 2) las escalas subjetivas basados en el juicio humano, las cuales se conocen comúnmente como análisis sensoriales (Kader, 1992 citado en Mondino y Ferrato 2006).

Por lo expuesto, se realizó un análisis sensorial del tipo afectivo para evaluar la percepción y aceptabilidad de las bananas deshidratadas solarmente obtenidas mediante dos procesos de secado diferente, por un lado, el equipo indirecto propuesto en esta tesis y ya descrito, y por otro un equipo directo. En cada tipo de deshidratador, se realizó el secado de frutas tratadas con los distintos tipos de pretratamientos ya estudiados y cuyas influencias sobre el color, olor, sabor, textura y apariencia

fueron evaluados directamente a partir de los consumidores. Se propuso y evaluó a su vez, la producción obtenida, mediante una escala objetiva, para determinar la influencia del secado sobre el color de la banana.

6.1. Estudio realizado para las bananas deshidratadas solarmente.

Durante las pruebas experimentales realizadas y detalladas en el apartado 5.4.4, se realizó paralelamente el secado de bananas pretratada de la misma forma que para el sistema indirecto, en un deshidratador directo de tipo caja. El mismo fue construido con madera reciclada de pino de 3/4" y aislado mediante el empleo de poliestireno expandido en sus paredes laterales y base. La cubierta se construyó empleando policarbonato alveolar de 4 mm y la bandeja para colocar las frutas, con una red plástica apta para alimentos. En la figura 6.1 se detallan las principales dimensiones del equipo.

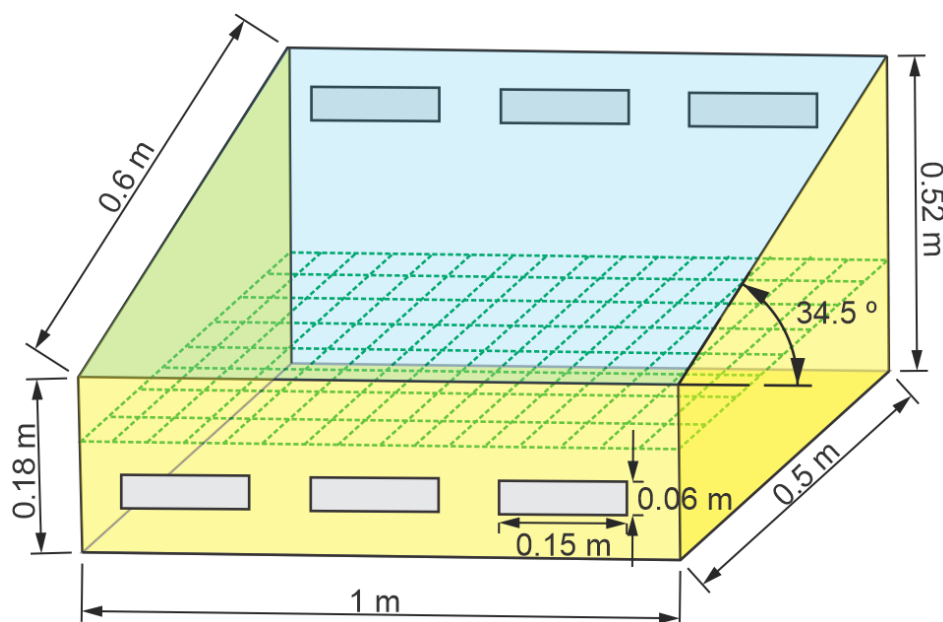


Figura 6.1. Esquema del secador directo tipo caja con sus principales dimensiones.

Se ubicó el secador tipo caja a la par del equipo indirecto con la misma orientación, ver figura 6.2 - a. Con el objetivo de controlar el proceso de secado, se realizó el registro de la radiación incidente sobre la cubierta del equipo, de la humedad relativa y la temperatura dentro de la cámara del secador mediante la utilización del instrumental especificado en la tabla 5.7. Al igual que para la banana deshidratada con el equipo indirecto, se determinó la finalización del proceso mediante el control a intervalos específicos de la evolución del peso de muestras para cada uno de los pretratamientos realizándose el secado hasta alcanzarse peso constante en las mismas.



Figura 6.2. a) Disposición del secador tipo caja al lado del equipo indirecto, ambos con la misma orientación. b) detalle de la bandeja cargada con las bananas pretratadas. c) Detalle del secador tipo caja con la cubierta de policarbonato cerrada.

La banana obtenida de ambos sistemas fue sometida a un proceso de evaluación sensorial de tipo afectiva durante la cual el único pretratamiento que no fue considerado fue el de metabisulfito de Na al no haberse conseguido el producto en grado alimenticio, si no solo de calidad de laboratorio, pudiendo tener trazas de metales o compuestos que puedan afectar la inocuidad del alimento.

La evaluación sensorial se dividió en dos partes, una primera instancia durante la cual cada participante rellenó una encuesta orientada a determinar el nivel de conocimiento general del consumidor acerca de las frutas deshidratadas, ver figura 6.3 - a, así como recolectar información acerca de nuevas posibles oportunidades en cuanto a frutas que podrían incorporarse en el mercado como deshidratadas y obtener una idea de si existe un público destinatario de este tipo de alimentos.

La segunda instancia fue el análisis sensorial propiamente dicho, para el cual además de explicar cómo debía realizarse la valoración en sí, también se realizó una breve introducción acerca de la diferencia entre un sistema de secado directo e indirecto, así como la utilidad y forma de realización de cada uno de los pretratamientos aplicados, ver figura 6.3 - b.

a)

ENCUESTA ORGANOLÉPTICA

1. Edad (Años):

2. Género:

Femenino ☐ Masculino ☐ Otro ☐

3. ¿Conoce las frutas deshidratadas?

Si ☐ No ☐

4. Respecto a la fruta fresca, ¿como crees que es el valor nutricional de la fruta deshidratada?

Mayor ☐ Menor ☐ Igual ☐

5. ¿Cuál considera que sería su intención de comprar frutas deshidratada?

Extremadamente probable ☐

Bastante probable ☐

Algo Probable ☐

Poco Probable ☐

Nada probable ☐

6. ¿Ha consumida alguna vez fruta deshidratada?

Si ☐ No ☐

7. En caso de haber respondido no en la pregunta 6 ¿Por qué nunca consumió fruta deshidratada?

No he tenido posibilidad de acceder a la misma ☐

Apariencia poco atractiva ☐

Altos precios ☐

Poca variedad/ disponibilidad ☐

Otra razón, especifique:

8. ¿Que característica debe tener la fruta deshidratada para llamar su atención?

Buen sabor ☐

Color atractivo ☐

Rico olor ☐

Buena textura ☐

Precio bajo ☐

Otro, especifique:

9. Si supiera que la fruta deshidrata que tiene ante ud. fue producida empleando energías renovables, ¿Afectaría su decisión a la hora de comprarla?

Si ☐ No ☐

10. ¿De que manera afectaría su decisión?

Positivamente ☐ Negativamente ☐

11. ¿Qué fruta considera que preferiría a la hora de consumirla deshidratada?

Banana ☐

Papaya ☐

Manzana ☐

Pera ☐

Mango ☐

Otra, especifique:

b)

ENCUESTA DE EVALUACIÓN SENSORIAL

Frente a usted hay distintas muestras de banana deshidratada utilizando dos sistemas diferentes de energía solar conocidos como secado directo e indirecto, para cada sistema encontrará 4 tipos distintos de pre-tratamientos: Sin tratamiento (ST), Ácido Cítrico (AC), Vino (V) y Bicarbonato (B) . Debe probar y evaluar en la tabla, cada uno de los casos, según la siguiente escala.

1: Me agrado mucho.
2: Me agradó.
3: Me fue indiferente.
4: Me desagradó.
5: Me desagradó mucho.

	Indirecto				Directo			
	ST	AC	V	B	ST	AC	V	B
Apariencia general								
Aroma								
Sabor								
Textura								
Color								

Observaciones/ comentarios adicionales:

Figura 6.3. a) Encuesta sobre conocimiento general de frutas deshidratadas y pequeño sondeo de mercado. b) Modelo de la evaluación sensorial realizada.

Se realizó también, de forma complementaria al análisis sensorial, la determinación del color promedio de las rodajas de banana mediante la obtención de las coordenadas CIE Lab, apostando

a un método objetivo de comparación que permita determinar la influencia en el color y, en consecuencia, de la apariencia, de los distintos pretratamientos y sistemas de secado solar.

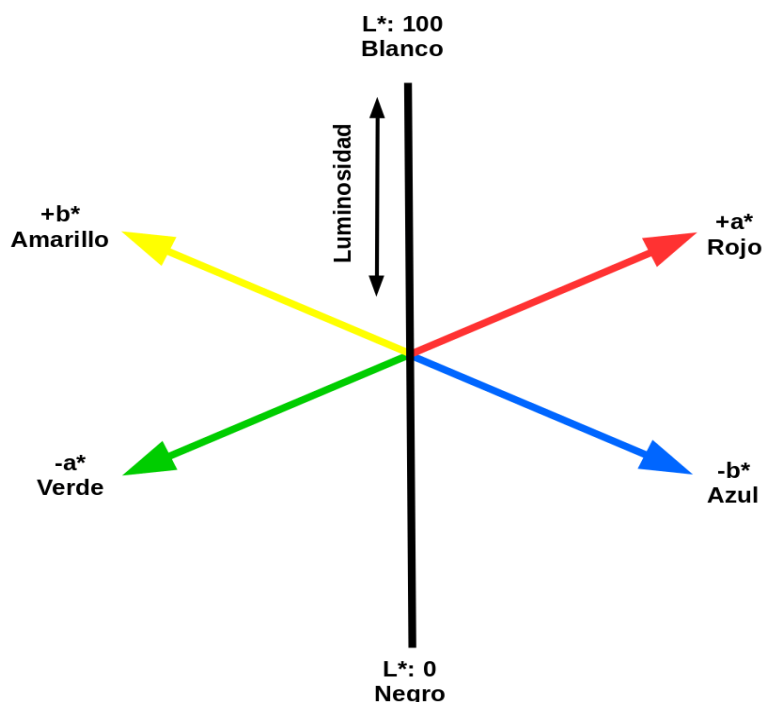


Figura 6.4. Eje cartesiano del espacio de color CIE L*a*b*. Fuente: https://www.researchgate.net/figure/Figura-22-Espacio-de-colores-CIELAB-Lab_fig1_326551993.

El espacio de color CIELab, establecido por la comisión internacional de L'Eclairage en 1978, es un sistema cartesiano formado por tres ejes, ver figura 6.4, los cuales designan: L - la luminosidad variando de 0 color negro a 100 color blanco; a - el color rojo para valores positivos o verde para valores negativos; b - amarillo para valores positivos o azul para valores negativos (Ortiz-Alfaro, 2003 citado en Padrón Pereira, 2009). Es el espacio más utilizado en la evaluación de color de los alimentos dado a que correlaciona los valores numéricos de color de manera consistente con la percepción visual humana (Talens Oliag, 2017) estandarizando en cierta medida de esta última e independizándose de los dispositivos.

Para la determinación de las coordenadas fue necesario en primera instancia la captura fotográfica de las rodajas de bananas, para lo cual se construyó un sistema de adquisición de imágenes, ver figura 6.5, que permita estandarizar y homogeneizar las condiciones de captura. Dicho sistema consistió en una caja, la cual se selló totalmente de forma tal que no se filtre ningún haz de iluminación exterior. Dicha caja fue revestida en su interior con pintura negra mate. Se equipó la misma con dos focos leds ambos de 4.5 wattios de igual potencia y espacio para la colocación de una cámara digital con la cual se realizó la toma de las fotografías.

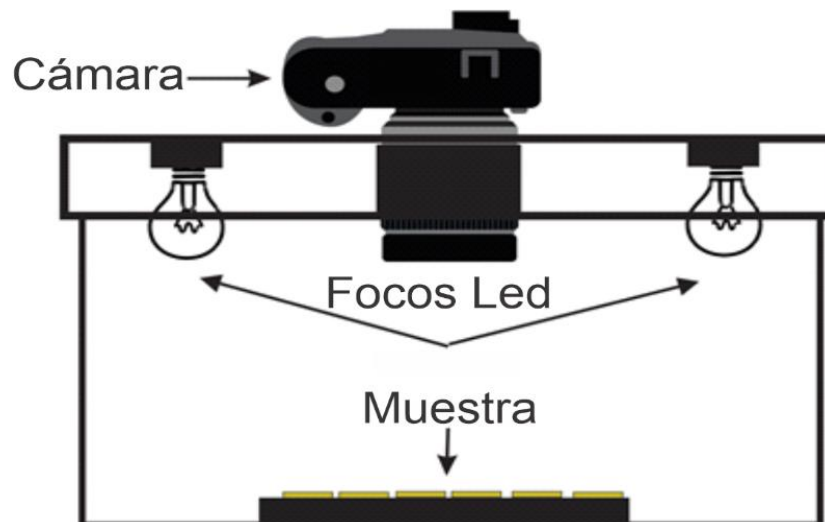


Figura 6.5. Caja construida para la adquisición de fotos antes y después del proceso de secado.

La cámara se estableció para que la toma de imágenes se realice de forma manual en .raw, configurándose exactamente de la misma manera en todas las tomas en cuanto a la temperatura de imagen, foco, sensibilidad del pixel ISO, apertura y velocidad del diafragma. Posteriormente se procesaron las imágenes según el proceso propuesto por Padrón –Pereira (2009), ver figura 5.6.

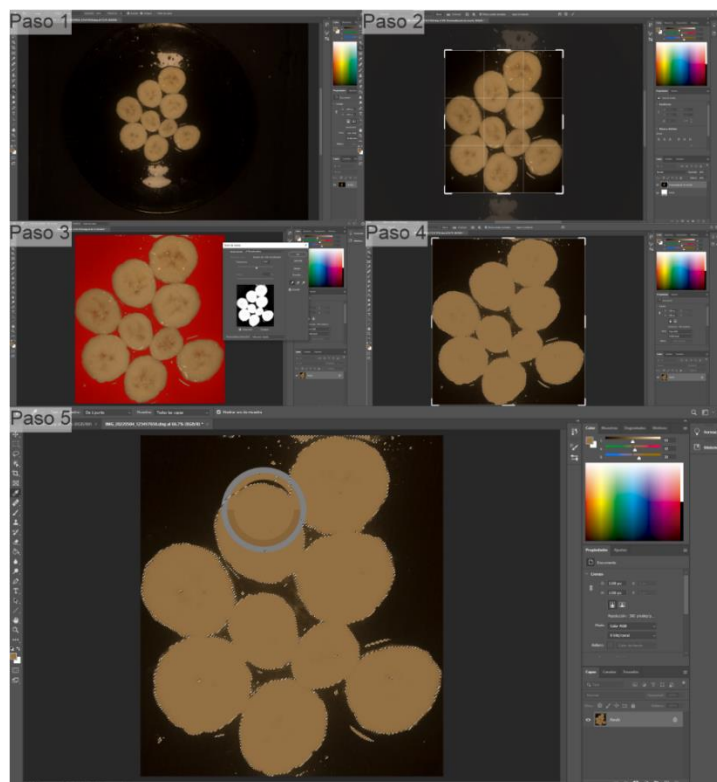


Figura 6.6. Procesamiento de imágenes para obtención de coordenadas CIE Lab según la metodología propuesta por Padrón –Pereira, 2009. Paso 1: Revelado de fotos .raw; Paso 2: Recorte de imagen para excluir partes donde no haya producto; Paso 3: Exclusión de píxeles que no correspondan a la banana; Paso 4: Determinación del promedio de color mediante aplicación de filtro; Paso 5: Determinación de las coordenadas mediante el empleo de cuentagotas.

La variación en el color se analizó mediante la aplicación de las ecuaciones 6.1, 6.2 y 6.3 (Salvo et al., 2021) en función de las muestras de banana antes del secado para cada pretratamiento, las cuales fueron tomadas como referencia:

$$\varphi_{L\%} = \frac{L_{d,i} - L_{ref}}{L_{d,i}} * 100 \quad \text{Ecuación 6.1}$$

$$\varphi_{a\%} = \frac{a_{d,i} - a_{ref}}{a_{d,i}} * 100 \quad \text{Ecuación 6.2}$$

$$\varphi_{b\%} = \frac{b_{d,i} - b_{ref}}{b_{d,i}} * 100 \quad \text{Ecuación 6.3}$$

Dónde:

$L_{d,i}$: Coordenada de *negro-blanco*, para la i-ésima muestra después de la exposición.

L_{ref} : Coordenada promedio de *negro-blanco*, para la referencia antes de la exposición.

$a_{d,i}$: Coordenada de *rojo-verde*, para la i-ésima muestra después de la exposición.

a_{ref} : Coordenada promedio de *rojo-verde*, para la referencia antes de la exposición.

$b_{d,i}$: Coordenada de *azul-amarillo*, para la i-ésima muestra después de la exposición.

b_{ref} : Coordenada promedio de *azul-amarillo*, para la referencia antes de la exposición.

6.2. Análisis de calidad.

Durante el proceso de secado se registró en el equipo directo, ver gráfico 6.1, una temperatura promedio en la cámara de 46.8 °C manteniéndose durante todo el tiempo debajo de los 60°C. En cuanto a la humedad relativa, el promedio de la misma fue de 20.5 % manteniéndose la mayor parte del tiempo en un rango entre 5 y 20% por lo que se consideró que el proceso de secado estuvo dentro de las condiciones óptimas procediéndose a las diferentes pruebas de calidad.

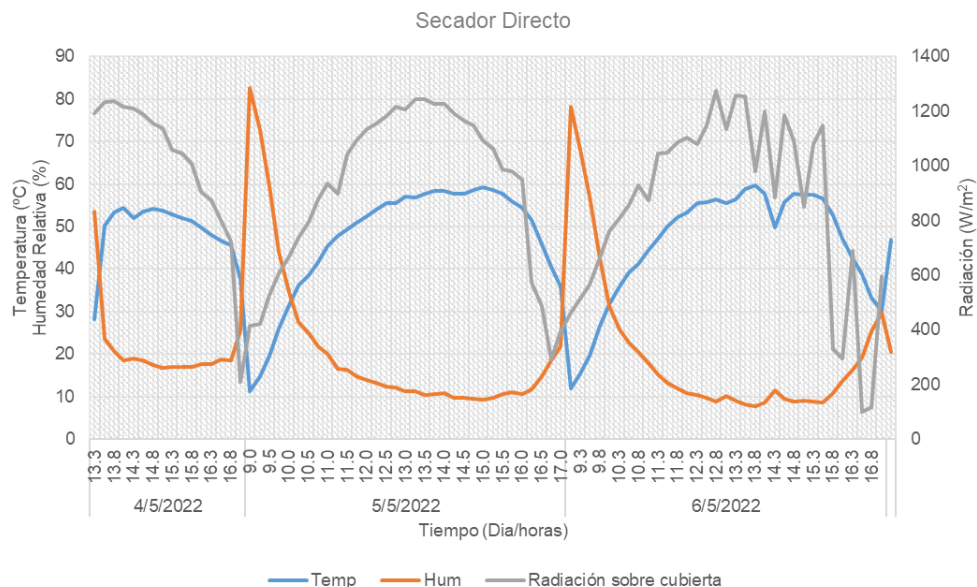


Gráfico 6.1. Registro de los principales parámetros durante el proceso de secado en el equipo directo con el fin de controlar que el proceso se realice dentro de los parámetros óptimos.

6.2.1. Prueba de color

En la tabla 6.2 se detallan las condiciones de toma de imágenes mantenidas durante todas las capturas de imágenes para la realización de la prueba de color. En la tabla 6.3 se detallan las coordenadas CIE Lab obtenidas para cada uno de los pretratamientos luego de realizados éstos, pero antes de colocarse las rodajas de banana en los diferentes secaderos. Dichas coordenadas son las que luego se tomaron como referencia discriminándose entre cada pretratamiento debido a la posibilidad de que estos puedan incidir en la coloración aun cuando la banana está fresca.

Tabla 6.2. Parámetros fijados durante la captura de imágenes

<i>Apertura focal</i>	f 1.7
<i>Velocidad de obturación</i>	1/3000s
<i>ISO</i>	100
<i>Distancia focal</i>	4.9 mm
<i>Temperatura de imagen</i>	4400
<i>Matiz</i>	+1

Tabla 6.3. Coordenadas CIE Lab de la referencia de cada uno de los pretratamientos

Antes de la deshidratación					
	Sin pretratamiento	Ácido Cítrico	Bicarbonato de Na	Metabisulfito de Na	Vino
<i>L*</i>	48	42	45	50	39
<i>a*</i>	10	10	11	10	12
<i>b*</i>	29	27	29	30	27

En la tabla 6.4 se observan las coordenadas CIE Lab obtenidas luego del proceso de deshidratación discriminadas según que el proceso haya sido directo e indirecto. A su vez se detalla el cálculo del desplazamiento porcentual en el color (ϕ).

Debido a que el sistema de coordenadas CIE Lab no tiene valores de referencia en sí, el cálculo de ϕ nos permite estandarizar y comparar la variación observada en el color. A partir de los resultados es posible observar que independientemente del sistema de secado, siempre fueron las rodajas sin pretratamiento las que más modificaciones en su apariencia sufrieron. Considerando la distribución espacial del eje cartesiano del sistema de color, podemos considerar que el pardeamiento de las bananas tenderá a generar desplazamientos en el eje L hacia valores más chicos (negro), en el eje b hacia valores negativos y en el eje a hacia valores positivos.

Tabla 6.4. Coordenadas CIE Lab obtenidas luego de la deshidratación para cada sistema de secado y pretratamiento junto al desplazamiento porcentual de color.

Después de la deshidratación					
Sistema Directo					
	Sin pretratamiento	Ácido Cítrico	Bicarbonato de Na	Metabisulfito de Na	Vino

L^*	14	24	18	24	14
a^*	7	8	8	9	9
b^*	15	19	18	19	15
ϕ	Sin pretratamiento	Ácido Cítrico	Bicarbonato de Na	Metabisulfito de Na	Vino
L^*	-243%	-75%	-150%	-108%	-179%
a^*	-43%	-25%	-38%	-11%	-33%
b^*	-93%	-42%	-61%	-58%	-80%
Sistema Indirecto					
	Sin pretratamiento	Ácido Cítrico	Bicarbonato de Na	Metabisulfito de Na	Vino
L^*	13	22	20	24	16
a^*	8	9	9	8	9
b^*	14	19	20	19	17
ϕ	Sin pretratamiento	Ácido Cítrico	Bicarbonato de Na	Metabisulfito de Na	Vino
L^*	-269%	-91%	-125%	-108%	-144%
a^*	-25%	-11%	-22%	-25%	-33%
b^*	-107%	-42%	-45%	-58%	-59%

Bajo esta premisa se realizó la comparación eje por eje entre ambos sistemas de secado para cada pretratamiento obteniéndose la matriz resumida en la tabla 6.5 donde podemos ver que en términos generales, la banana sin pretratamiento se pardeó más en el sistema indirecto, la pre tratada con metabisulfito de sodio se pardeo levemente más en el sistema indirecto, las pre tratadas con bicarbonato y vino se pardearon más en el sistema directo y fue indiferente el efecto de ambos sistemas sobre la influencia del color para el caso del ácido cítrico, pretratamiento que finalmente fue el que mejor conservó el color original de la banana fresca seguido por el metabisulfito de Na.

Tabla 6.5. Matriz de comparación del corrimiento en el color de cada eje según cada pretratamiento.

Cuando hay pardeamiento el eje tiende a:	Sin pretratamiento	Ácido Cítrico	Bicarbonato de Na	Metabisulfito de Na	Vino
$L^* \rightarrow 0$	I	I	D	=	D
$a^* \rightarrow (+)$	I	D	D	I	=
$b^* \rightarrow (-)$	I	=	D	=	D
Referencias: I: El sistema indirecto evidenció mayor corrimiento en el eje; D: El sistema directo evidenció mayor corrimiento en el eje; =: El corrimiento fue indiferente según cada sistema.					

En la figura 6.6 se observan muestras del color promedio de las bananas antes y después de su deshidratación observándose en conclusión muy pocas diferencias que sean realmente considerables entre ambos sistemas, mas no así entre pretratamientos, siendo estos mucho más influyentes sobre la coloración final del producto antes que el tipo de secado en sí. Sin embargo, el tipo de secado puede generar influencias sobre aspectos como ser el valor nutricional que aquí no han sido abordados quedando como pendiente de la presente comparación. Más allá de lo antes

dicho, es posible aseverar que una ventaja notable de un equipo indirecto sobre uno directo, es la capacidad de carga mayor del primero sobre el segundo.

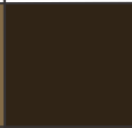
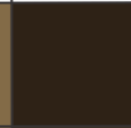
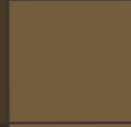
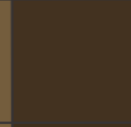
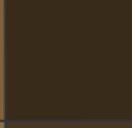
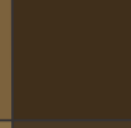
Sistema	Directo		Indirecto	
Pretratamiento	Antes	Después	Antes	Después
Sin Pretratamiento				
Ácido Cítrico				
Bicarbonato de Na				
Metabisulfito de Na				
Vino				

Figura 6.6. Muestras de coloración de la banana antes y después de cada pretratamiento realizado en un sistema directo y uno indirecto de secado. La coloración se determinó a partir de la obtención de las coordenadas CIE Lab promedio para cada caso.

6.2.2 Análisis sensorial

Antes del análisis sensorial, se realizó una breve encuesta a los participantes de 11 preguntas, las dos primeras relacionadas a los participantes en si con el fin de caracterizar brevemente la población – muestra y el resto específicas al consumo de la fruta deshidratada. Participaron un total de 34 personas de la ciudad de Salta pertenecientes a grupos etarios diversos, ver gráfico 6.2 - a, distribuidos en distintos géneros como se detalla en el gráfico 6.2 - b.

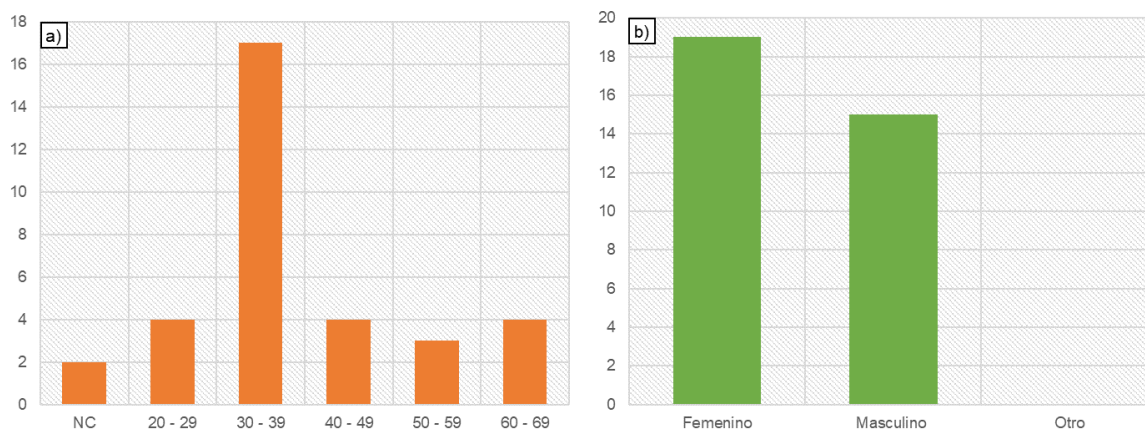


Gráfico 6.2. a) Distribución etaria de los participantes, b) Distribución de género de los participantes.

El total de los participantes manifestó tener conocimientos sobre que son las frutas deshidratadas, ver gráfico 6.3 - a, sin embargo, cuando se los consultó de manera comparativa cual era el valor nutricional de las frutas deshidratadas respecto a las frutas frescas, siendo el primero más concentrado debido al menor contenido de agua, pero igual en términos absolutos; no todos supieron contestar de manera correcta, ver gráfico 6.3 – b.

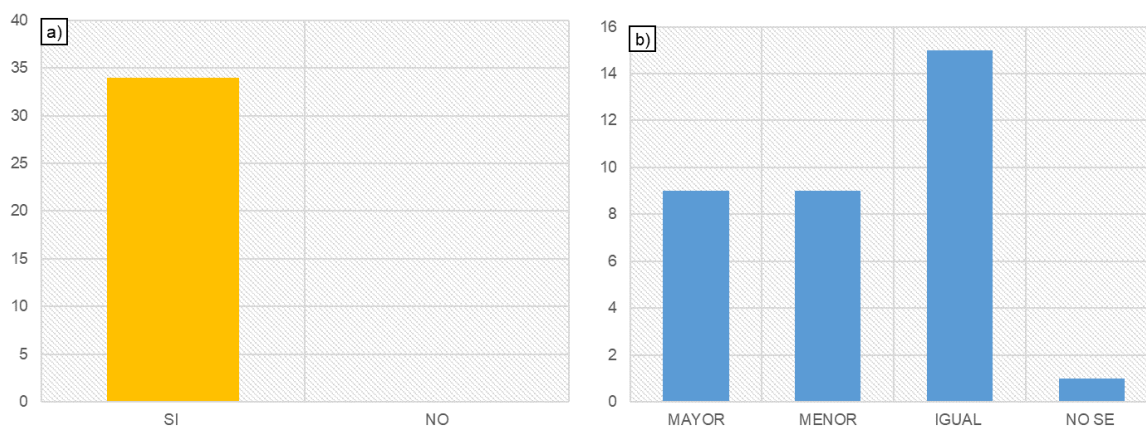


Gráfico 6.3. a) Pregunta: ¿Conoce las frutas deshidratadas?, b) Pregunta: Respecto a la fruta fresca ¿Cómo cree que es el valor nutricional de la fruta deshidratada?

A los fines de saber si los participantes tenían algún tipo de noción sobre las características que tienen las frutas cuando se deshidratan se les consultó si alguna vez habían consumido las mismas manifestando nuevamente el 100% de los participantes que sí, ver gráfico 6.4 - a, por lo cual la pregunta siguiente en la encuesta fue desestimada pues estaba orientada a aquellos que jamás las habían comido. Se les consultó, cual es la característica que más les llama la atención cuando deciden consumir algún tipo de fruta deshidratada pudiendo elegir más de una opción entre las que se detallan en el gráfico 6.4 - b siendo la característica que más resaltó el hecho de que tengan buen

sabor. Se aportaron dos nuevas características a las propuestas las cuales fueron que tengan certificación SIN-TACC y que no posean azúcar agregada.

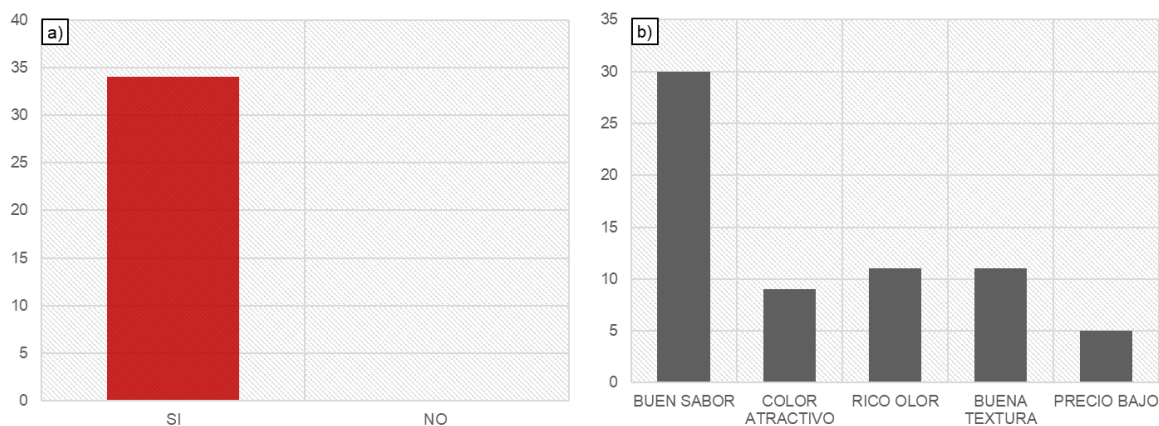


Gráfico 6.4. a) Pregunta: ¿Ha consumido alguna vez fruta deshidratada? b) Pregunta: ¿Qué característica debe tener la fruta deshidratada para llamar su atención?

Se les consultó sobre la probabilidad como consumidores de adquirir frutas deshidratadas obteniéndose los resultados del gráfico 6.5 – a donde se puede ver que la gran mayoría eligieron entre las opciones de bastante probable a extremadamente probable. En relación a esta última pregunta, se les consultó sobre cuáles son las frutas que preferirían conseguir de manera deshidratada dándoseles la opción de agregar nuevas propuestas si las que ellos querían no se encontraban entre las opciones. En el gráfico 6.5 – b se detallan las frutas principalmente elegidas, las pintadas en líneas verde son aquellas propuestas por los participantes, siendo la más elegida la banana, seguida por el mango, ambas producidas actualmente por la asociación YPA-YVI

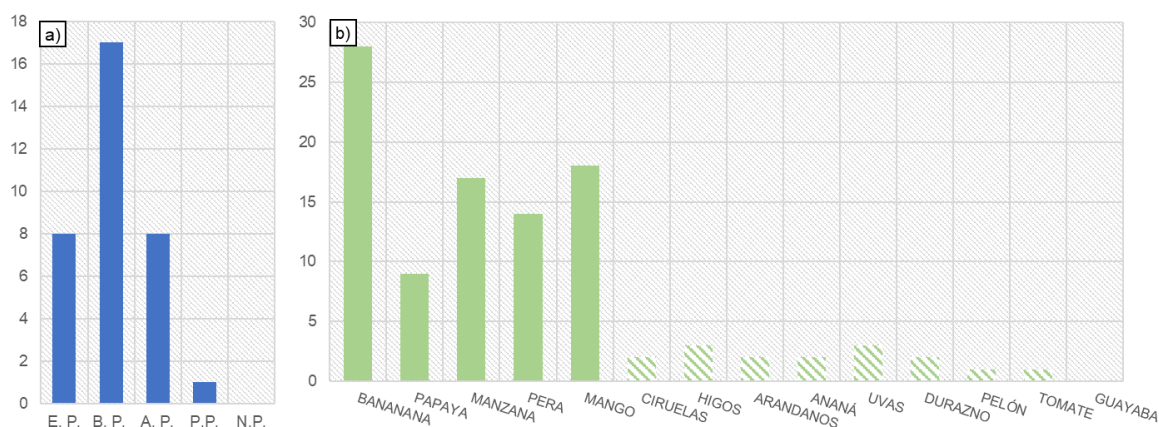


Gráfico 6.5. a) Pregunta: ¿Cuál considera que sería su intención de comprar frutas deshidratadas? Probabilidad de comprar frutas deshidratadas: EP: Extremadamente Probable, BP: Bastante Probable, AP: Algo Probable, PP: Poco Probable, NP: Nada Probable; b) Pregunta: ¿Qué frutas considera que preferiría a la hora de consumirla deshidratada?

Por último, se les preguntó en relación al secado solar, por un lado, si el saber que intervinieron energías renovables en el proceso de secado afectaría en su decisión de compra para posteriormente preguntar de qué manera sería la afectación, ver gráfico 6.6 a y b. En este punto, si bien no fue muy grande la diferencia entre aquellos que manifestaron que el uso de renovables afectaría su decisión, la gran mayoría respondió que en caso de que se utilicen fuentes alternativas, esto afectaría positivamente en su decisión de compra.

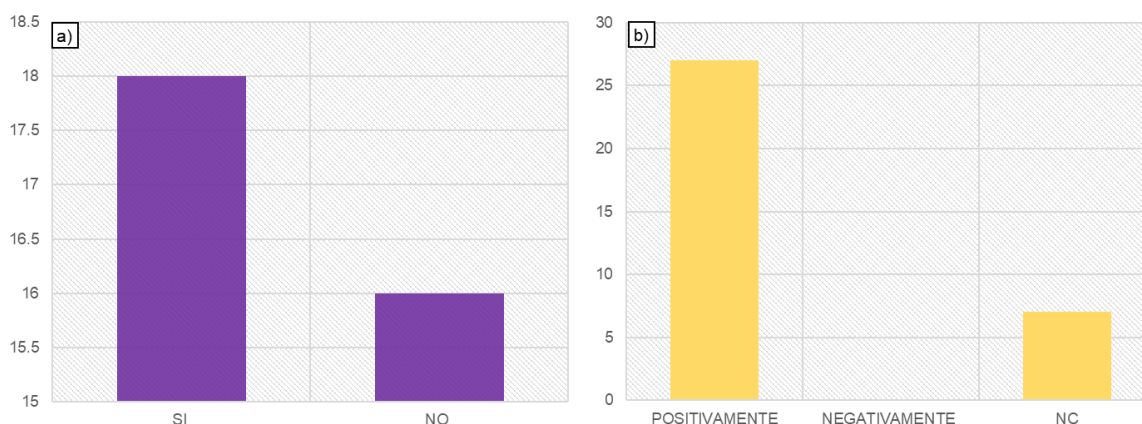


Gráfico 6.6. a) Pregunta: Si supiera que la fruta deshidratada que tiene ante ud. fue producida empleando energías renovables ¿Afectaría su decisión a la hora de comprarla? b) Pregunta: ¿De qué manera afectaría su decisión?

Luego de la encuesta se realizó el análisis sensorial a lo largo del cual se evaluó la apariencia general, el aroma, el sabor, la textura y color para cada uno de los pretratamientos a excepción del realizado con metabisulfito de Na por razones mencionadas anteriormente. En el gráfico 6.7 se observan los resultados del análisis sensorial detallado por tipo de secado, pretratamiento y categoría de calidad. El sabor, categoría más importante según los participantes a la hora de llenar la encuesta, resultó ser el mejor valorado de entre todas las categorías, siendo el que más puntaje obtuvo, el de la banana sin pretratamiento producida en el equipo indirecto seguido por la pretratada con vino para el mismo sistema de secado. Seguidamente al sabor, las categorías más valoradas fueron las de apariencia general y color, siendo la banana pretratada con bicarbonato en el equipo indirecto la más valorada para estos dos aspectos.

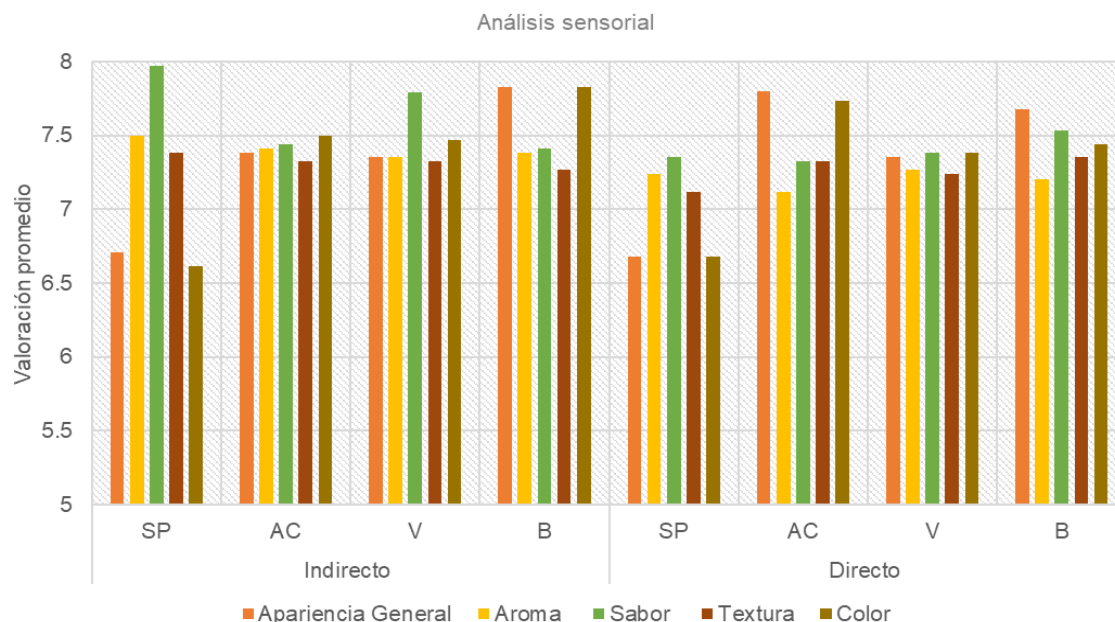


Gráfico 6.7. Resultados a partir del análisis sensorial discriminados por sistema de secado, pretratamiento y categoría de calidad donde SP: Sin pretratamiento, AC: Ácido Cítrico, V: Vino y B: Bicarbonato de Na.

En el gráfico 6.8 se obtuvo el valor promedio de las 5 categorías evaluadas para cada tipo de pretratamiento en cada uno de los sistemas de secado de forma tal de obtener un resultado global de valoración. A partir de este se determinó que la banana que más gusto en términos generales fue la obtenida de manera indirecta pretratada con bicarbonato seguida por la tratada con vino. A excepción del pretratamiento con ácido cítrico, el resto de los pretratamientos resultaron siempre de mejor calidad cuando se obtuvo a partir del secado indirecto.

Un detalle a considerar es que muchos participantes manifestaron que a la hora de evaluar la textura tendieron a comparar la misma con la que tienen las bananas fritas que se encuentran comercialmente y se mal ofrecen como deshidratadas, esperando de esta forma que las que realmente son deshidratadas sean crocantes. Considero que esto sería un punto a trabajar desde el marketing de forma tal de establecer y difundir que en realidad la banana deshidratada, así como cualquier tipo de fruta, es más bien una pasa y no algo crocante.

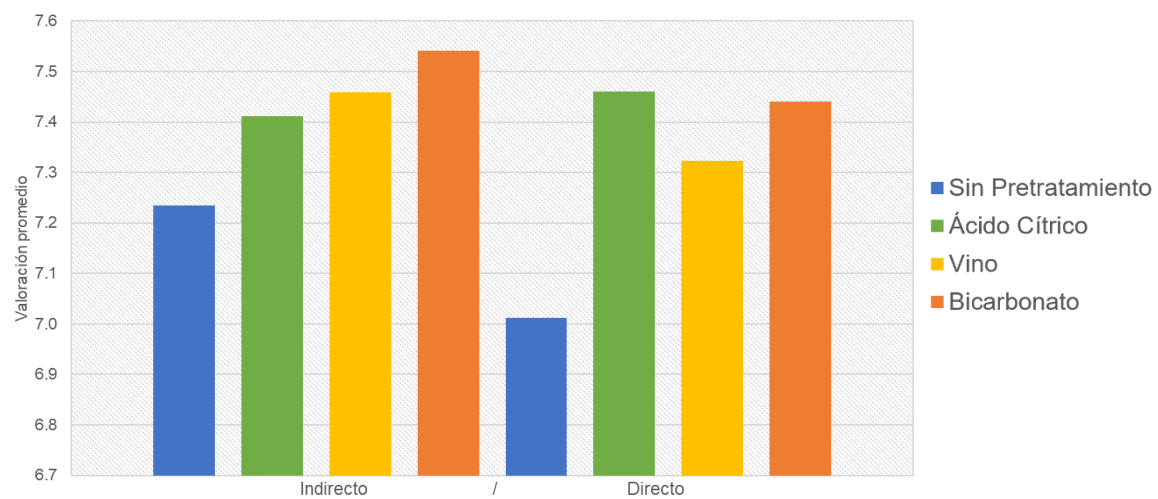


Gráfico 6.8. Valores promedios obtenidos a partir de las distintas categorías de calidad para cada pretratamiento discriminados por sistema de secado.

- CAPITULO 7 -

SIMULACIÓN NUMÉRICA

COMPUTACIONAL

Nomenclatura

- Sección 7.1:

$A_{b,i}$	Área de la pared inferior, para la sección i , m^2
A_c	Área total de la cubierta, m^2
$A_{li,i-j}$	Área de las paredes laterales, para la sección i y el elemento j , m^2
$A_{t,i}$	Área de la cubierta, para la sección i , m^2
C_p	Capacidad calorífica promedio del aire, $J/kg\ ^\circ C$
Dh_{ij}	Diámetro hidráulico de los canales, para la sección i y elemento j , m
F_{sky}	Factor de vista hacia el Cielo, adimensional
$h_{ab,i}$	Coeficiente convectivo entre la pared inferior y los nodos de aire inferiores, para la sección i , $W/m^2\ ^\circ C$
$h_{cs,i}$	Coeficiente convectivo desde la superficie exterior de la cubierta hacia los nodos ambientales, para la sección i , $W/m^2\ ^\circ C$
h_{ij}	Coeficiente convectivo interno, para la sección i y el elemento j , $W/m^2\ ^\circ C$
$h \left \begin{smallmatrix} li,i-1 \\ ai,a \end{smallmatrix} \right.$	Coeficiente convectivo entre el nodo de aire superior y la pared interna izquierda, para la sección $i=1$, $W/m^2\ ^\circ C$
$h \left \begin{smallmatrix} li,i-2 \\ ai,a \end{smallmatrix} \right.$	Coeficiente convectivo entre el nodo de aire superior y la pared interna derecha, para la sección $i=1$, $W/m^2\ ^\circ C$
$h \left \begin{smallmatrix} li,i-2 \\ ai,b \end{smallmatrix} \right.$	Coeficiente convectivo entre el nodo de aire superior y la pared interna izquierda, para la sección $i=2$, $W/m^2\ ^\circ C$
$h \left \begin{smallmatrix} li,i-2 \\ ai,b \end{smallmatrix} \right.$	Coeficiente convectivo entre el nodo de aire superior y la pared interna derecha, para la sección $i=2$, $W/m^2\ ^\circ C$
$h_{pai,a}$	Coeficiente convectivo entre el absorbedor y los nodos de aire superiores, para la sección i , $W/m^2\ ^\circ C$
$h_{pai,b}$	Coeficiente convectivo entre el absorbedor y los nodos de aire inferiores, para la sección i , $W/m^2\ ^\circ C$
I_i, I	Radiación solar que incide sobre la superficie de la cubierta, W/m^2
$\dot{m}_a$	Caudal másico del canal superior, kg/s
$\dot{m}_b$	Caudal másico del canal inferior, kg/s
$\dot{m}_t$	Caudal másico total, kg/s
Nu_{ij}	Número de Nusselt, para la sección i y el elemento j , adimensional
Pr_{ij}	Número de Prandtl, para la sección i y el elemento j , adimensional
Q_u	Calor útil entregado por el aire de salida del colector trapezoidal, W
Re_{ij}	Número de Reynolds, Para la sección i y el elemento j , adimensional
$T_{ai,a}$	Temperatura del nodo de aire superior, para la sección i , $^\circ C$
$T_{ai,a} _{i=1}$	Temperatura del nodo de aire superior, para la sección $i=1$, $^\circ C$
$T_{ai,a} _{i=3}$	Temperatura del nodo de aire superior a la salida $i=3$, $^\circ C$
$T_{ai,b}$	Temperatura del nodo de aire inferior, para la sección i , $^\circ C$
$T_{ai,b} _{i=1}$	Temperatura del nodo de aire inferior, para la sección $i=1$, $^\circ C$
$T_{ai,b} _{i=3}$	Temperatura del nodo de aire inferior a la salida. $i=3$, $^\circ C$
$T_{bi,i}$	Temperatura interior del fondo del colector, para la sección i y elemento j , $^\circ C$
$T_{bi,o}$	Temperatura exterior del fondo del colector, para la sección i y elemento j , $^\circ C$

T_c	Temperatura de la cubierta, °C
$T_{ci,i}$	Temperatura de la cara interior de la cubierta, para la sección i , °C
$T_{ci,o}$	Temperatura de la cara exterior de la cubierta, para la sección i , °C
T_e	Temperatura ambiente, °C
T_{ib}	Temperatura de la capa de aislación inferior, °C
$T_{li,i-1}$	Temperatura de la pared izquierda interior, para la sección $i=1$, °C
$T_{li,i-2}$	Temperatura de la pared derecha interior, para la sección $i=1$, °C
$T_{li,i-j}$	Temperatura de la pared lateral interior, para la sección i y el elemento j , °C
T_{li-1}	Temperatura de la capa de aislación izquierda, °C
T_{li-2}	Temperatura de la capa de aislación derecha, °C
$T_{lo,i-j}$	Temperatura de la pared lateral de salida, para la sección i y el elemento j , °C
$T_{p,i}$	Temperatura del absorbedor, para la sección i , °C
T_{sky}	Temperatura del cielo (sky), °C
U_b	Coeficiente de pérdidas total para la pared inferior, $W/m^2\text{ }^\circ C$
U_g	Coeficiente global de pérdidas del colector, $W/m^2\text{ }^\circ C$
U_l	Coeficiente global de pérdidas de las paredes laterales, $W/m^2\text{ }^\circ C$
U_t	Coeficiente global de pérdidas de la cubierta, $W/m^2\text{ }^\circ C$
v_i	Velocidad de aire interior, m/s
y	Espesor de la cubierta/ paredes laterales/ pared inferior, para el cálculo de flujos convectivos, m
$\phi_{\lambda_{is},i}$	Flujos conductivos de calor a través de la pared inferior, para la sección i , W
$\phi_{\lambda_{is},i-j}$	Flujos conductivos de calor a través de las paredes laterales, para la sección i y el elemento j , W
$\phi_{\lambda_p,i}$	Flujos conductivos de calor a través de la cubierta, para la sección i , W
$\phi_{a,j} _{i=1}$	Flujos convectivos de calor desde la superficie interna j hacia el nodo de aire superior, para la sección $i=1$, W
$\phi_{b,j} _{i=1}$	Flujos convectivos de calor desde la superficie interna j hacia el nodo de aire inferior, para la sección $i=1$, W
α_p	Absortancia del absorbedor, adimensional
β_s	Factor que separa el intercambio de calor por irradiación con el Cielo y con el aire ambiente, adimensional
η_g	Eficiencia global del colector trapezoidal de aire, %
θ_i	Ángulo de incidencia solar, °
λ	Coeficientes conductivos de los materiales, $W/m\text{ }^\circ C$
λ_{ij}	Coeficiente conductivo del aire, para la sección i y el elemento j , $W/m\text{ }^\circ C$
λ_{is}	Coeficiente conductive de la lana de vidrio, $W/m\text{ }^\circ C$
λ_p	Coeficiente conductive del policarbonato, $W/m\text{ }^\circ C$
ν_i	Viscosidad dinámica, m^2/s
τ_p, T	Transmitancia espectral de la cubierta de policarbonato, adimensional
ϵ	Coeficiente de emisividad, adimensional
ρ	Densidad de los materiales, kg/m^3
ρ_i	Densidad del aire, kg/m^3
σ	Constante de Stefan-Boltzmann, $5.670373 \times 10^{-8} W/s\text{ }K^4$

Sección 7.3:

$\sum Q_i$	Ingresos y egresos de energía térmica hacía y desde el nodo de parafina
m_p	Masa de parafina
$\dot{H}$	Calor latente de cambio de estado, J/g
HC_p	Cp de la parafina, J/kg °C
β_l	Parámetro de control, adimensional
β_s	Parámetro de control, adimensional
I_i	Irradiancia solar incidente en la cubierta de policarbonato, W/m ²
$T_{p,i}$	Temperatura de la placa absorbedora, para la sección i , °C
α_p	Absortancia de la placa absorbedora, adimensional
$h_{pai,a}$	Coeficiente convectivo entre absorbedor y aire superior, para la sección i , W/m ² °C
$T_{p,i}$	Temperatura de la placa absorbedora, para la sección i , °C
$T_{ai,a}$	Temperatura de aire de canal superior, para la sección i y elemento j , °C
k_{pr}	Conductividad de la capa de parafina, W/m °C
e_{pr}	Espesor de la capa de parafina, m
ΔT_p	Diferencia de temperatura entre límite superior e inferior de la capa de parafina, °C
ϵ_p	Coeficiente de emisividad infrarroja del absorbedor, adimensional
$T_{bi,i}$	Temperatura interior del fondo del colector, para la sección i y elemento j , °C
$T_{ci,i}$	Temperatura interior de la cubierta, para la sección i y elemento j , °C

Sección 7.4

m_{mp}	Masa total del aire en la cámara, kg
m_{ch}	Masa total del aire en la chimenea, kg
$\dot{m}_{ai}$	Caudal másico, kg/s
h_{cd}	Coeficiente convectivo desde la superficie interior derecha de la pared de la cámara hacia el nodo central de la misma, W/m ² °C
h_{ci}	Coeficiente convectivo desde la superficie interior izquierda de la pared de la cámara hacia el nodo central de la misma, W/m ² °C
h_{chd}	Coeficiente convectivo desde la superficie interior derecha de la pared de la chimenea hacia el nodo central de la misma, W/m ² °C
h_{chi}	Coeficiente convectivo desde la superficie interior izquierda de la pared de la chimenea hacia el nodo central de la misma, W/m ² °C
A_{cd}	Área de la pared derecha de la cámara, m ²
A_{ci}	Área de la pared izquierda de la cámara, m ²
A_{chd}	Área de la pared derecha de la chimenea, m ²
A_{chi}	Área de la pared izquierda de la chimenea, m ²
T_{cd}	Temperatura de la pared derecha interior de la cámara, °C
T_{cam}	Temperatura del nodo de la cámara, °C
T_{ci}	Temperatura de la pared izquierda interior de la cámara, °C
T_{col}	Temperatura del aire proveniente de colector, °C
T_{ch}	Temperatura del nodo de la chimenea, °C

T_{chd}	Temperatura de la pared derecha interior de la chimenea, °C
T_{chi}	Temperatura de la pared izquierda interior de la chimenea, °C
T_{am}	Temperatura ambiente, °C
C_{pai}	Capacidad calorífica promedio del aire, J/kg °C
R_a	Número de Rayleigh, adimensional
β	Coeficiente de expansión térmica, 1/K
L	Longitud vertical, m
ν	Viscosidad cinemática, m ² /s
k_{ai}	Conductividad térmica de aire, W/m°C
g	Aceleración debido a la gravedad, m/s ²

Sección 7.5

C_{ps}	Calor específico de la masa seca, J/kg °C
C_{pa}	Calor específico del agua líquida, J/kg °C
X	Humedad en base seca del product, kg/kg
h_{fg}	<i>Calor de cambio de fase, kJ/kg</i>
T_p	Temperatura del producto, °C
W	Humedad absoluta de una mezcla aire-vapor, kg/kg
W_c	Humedad absoluta del aire interior de la cámara de secado, kg/kg
W_s	Humedad absoluta de saturación del producto, kg/kg
v_s	Velocidad de secado, kg/s
h_d	Coeficiente de difusión del líquido por la superficie del trozo, 1/s
h_c	Coeficiente de convección térmica de la superficie de cada trozo, W/grados
A_T	Área total del producto, m ²
p_s	Presión de saturación del aire circundante al producto, pascal
p_a	Presión atmosférica del lugar, pascal

7. Introducción

En la actualidad la aplicación e investigación en materia de energías renovables viene siendo amplia y diversa comenzando a identificarse en la práctica multiplicidad de factores que influyen en la eficiencia de los sistemas los cuales, si fueran todos estudiados de manera práctica, implicarían grandes inversiones económicas y de tiempo. Es por esto que el estudio de diferentes aplicaciones mediante modelación matemática y/o simulación computacional se ha convertido en una opción económicamente atractiva pasando a ser actualmente una herramienta de gran importancia en cuanto a ingeniería de proyectos y control de procesos (Argão, 2006 citado en Machado et al., 2012).

Dentro de la aplicación del secado solar, es posible la representación y estudio de los diferentes mecanismos físicos de transferencia de calor y masa que se dan durante los procesos de deshidratación en el interior de los equipos. Modelos que luego de ser validados mediante la experimentación nos permiten predecir diferentes escenarios. (Garcia et al., 2018) siendo de gran ayuda en el diseño en la gestión de la operación, así como en la propuesta y estudio de mejoras con un buen grado de precisión y el consiguiente ahorro en tiempo, de recursos financieros, materiales, de personal y energía (Machado et al. 2012).

Se realizó la simulación numérica computacional mediante el empleo del software Simsuol (Saravia et al., 2007) y la validación experimental del deshidratador indirecto propuesto. La misma fue abordada en tres instancias. En la primera se realizó el estudio del colector solar de aire empleando el modelo computacional validado para estudiar la respuesta que hubiera supuesto en su eficiencia determinadas modificaciones geométricas, a su vez se analizó la influencia en su desempeño, de la incorporación de materiales de cambio de fase como sistemas de acumulación de calor. En una instancia posterior se estudió la cámara de secado construyendo el modelo computacional de manera independiente al colector, pero conectado a la simulación de éste, aquí se dividió el estudio y la validación, primero realizando el modelado de la cámara vacía al que luego se le incorporó la carga de producto. Se estudió finalmente el sistema en su totalidad bajo diferentes condiciones de funcionamiento, de forma tal de evaluar la eficiencia de secado.

7.1. Modelación matemática y validación experimental del colector solar de aire.

Dentro del amplio campo de aplicación de la energía solar térmica, los colectores de placa plana son una de las tecnologías más aplicadas siendo los de aire los mayormente utilizados debido a su diseño simple siendo fáciles de construir y operar (Siddhartha, 2010; Ullah et al., 2017). La eficiencia de estos es baja en comparación a los colectores de agua por lo cual, nuevos diseños son continuamente propuestos y probados buscando aumentar su desempeño térmico, por un lado, pero también generar alternativas cada vez más compactas y livianas (Zulkifile et al., 2018; Borello et al., 2012).

Se realizó la simulación del colector trapezoidal cuyas dimensiones, detalladas en mayor detalle en la sección 4.1, son 2.44 metros de ancho en la base, 1 metro de ancho a salida y 1.9 metros de largo con un área total de colección de 3.3 m². El espesor de la carcasa de chapa galvanizada es de 0.1 m. La cubierta es de policarbonato de 6 mm de espesor. Para la aislación térmica se usó 0.05 m de espesor de fibra de vidrio. La placa absorbidora de 1 mm de espesor de chapa galvanizada

sinusoidal la cual divide el ducto de circulación aire en dos canales, superior e inferior. Las propiedades térmicas asumidas para los materiales se detallan en la tabla 7.1.

Tabla 7.1. Propiedades de los materiales.

Propiedad	Placa absorbidora	Cubierta	Carcaza	Aislante
Densidad ρ (kg/m ³)	7,850	1,200	-	14
Conductividad λ (W/m °C)	-	0,2	-	0,03
Absortividad α (-)	0,96	-	-	-
Transmitancia τ (-)	-	0,8	-	-
Emisividad ϵ (-)	0,8	0,9	0,1	-

7.1.1 Modelo físico y matemático

Durante la formulación del modelo computacional se tuvieron en cuenta las siguientes hipótesis:

- La circulación del aire en los canales es unidireccional en dirección entrada-salida. En la práctica esta circulación es favorecida por la forma sinusoidal del absorbedor.
- La rugosidad de las paredes internas es despreciada. Bajo esta hipótesis se asumió un perfil de velocidades de aire uniformes para cada sección.
- Los disturbios transitorios producidos por la velocidad del viento exterior no son considerados.
- Los fenómenos de reflexión interna del policarbonato se consideran despreciables debido a la ausencia en la literatura de modelos precisos que representen dicho efecto en relación a los policarbonatos de tipo alveolar.
- Las propiedades termo físicas (conductividad, absortividad y reflectividad) son considerados constantes y la composición de los materiales homogénea.
- Todos los flujos de calor se consideran unidireccionales.
- Las propiedades psicrométricas de los nodos de aire (humedad absoluta y relativa) no fueron considerados en esta etapa de la simulación.
- La transmitancia solar espectral del policarbonato es considerada como un valor constante y su dependencia en función del ángulo de incidencia es despreciada.
- Se considera a la chapa absorbidora como un nodo sin dimensión, dado su bajo espesor, por lo que la conductividad a través de ella no se tuvo en cuenta.
- Las ecuaciones representativas al efecto convectivo entre el aire en circulación y el absorbedor se corresponden al caso de una superficie plana, por lo que la sección transversal de los canales se considera rectangulares.

La energía térmica es transferida desde el plato absorbedor al aire en circulación dentro del equipo, mediante convección como el principal mecanismo de transferencia (Duffie y Beckman, 2013), sin embargo, los mecanismos de radiatividad y conductividad fueron también considerados.

La circulación del aire sucede por los canales superior e inferior a la placa, este tipo de configuración mejora el desempeño en los procesos de colección (Haghighat, 1988; Hernandez y Quiñonez, 2013). Las mediciones horarias de las variables climatológicas como velocidad del viento, radiación solar y temperatura ambiental fueron consideradas como condiciones de borde. Los coeficientes convectivos hacia el exterior fueron calculados según la metodología descrita por Duffie y Beckman, 2013. La figura 7.1 muestra el modelo físico implementado en la simulación.

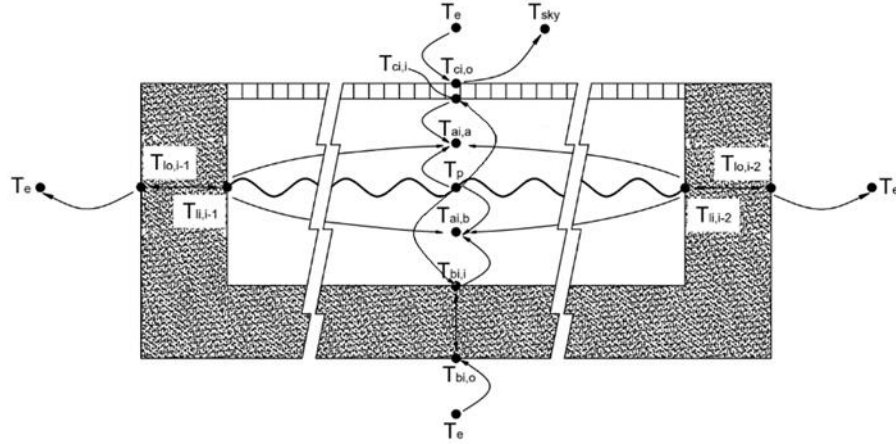


Figura 7.1. Esquema de nodos de temperatura y circuitos de transmisión térmica.

En el presente modelo, las temperaturas de aire son representadas por nodos: uno ubicado entre la cubierta y la placa y el otro entre la placa y la base del colector. La radiación solar transmitida ($I\tau$) a través de la cubierta incide en la placa siendo parte absorbida como energía térmica ($I\tau\alpha$), la cual parcialmente se transfiere a los nodos de aire por convección. La transmisión de calor entre los nodos de aire y las paredes laterales internas fue considerada, así como los mecanismos de conductividad térmica a través de la aislación y la cubierta. Las pérdidas térmicas que toman lugar en este modelo son tres: superior (a través de la cubierta), inferior (a través de la base del colector), y lateral. Las condiciones de borde en la superficies exteriores e interiores incluyeron los efectos de radiación y convección.

Al ser la placa absorbedora prácticamente plana, su forma levemente sinusoidal no fue considerada. Situaciones diferentes ocurren cuando el absorbedor tiene formas irregulares pronunciadas como se observa en Bashria et al. (2007) y Zulkifl et al. (2018). Las condiciones para el cálculo de Nusselt deben ser tratadas diferenciadamente según se trate de un flujo laminar, turbulento o en transición entre ambas regiones. En el presente diseño, las áreas transversales al flujo fueron consideradas rectangulares. Las ecuaciones 7.1, 7.2 y 7.3 fueron aplicadas para los cálculos térmicos (Bergman et al., 2011; Kays et al., 2005).

$$Re_{ij} = \frac{\rho_i v_i D h_{ij}}{\mu_i} \quad \text{Ecuación 7.1}$$

$$Nu_{ij} = \begin{cases} 0.453 Re_{ij}^{0.5} \cdot Pr_{ij}^{0.333} & Pr_{ij} \geq 0.6 \\ 0.0308 Re_{ij}^{0.8} \cdot Pr_{ij}^{0.333} & 0.6 \leq Pr_{ij} \leq 60 \end{cases} \quad \text{Ecuación 7.2}$$

$$h_{ij} = \frac{Nu_{ij} \lambda_{ij}}{Dh_{ij}}$$

Ecuación 7.3

La dependencia del número de Prandtl (Pr) en función de la temperatura, la viscosidad dinámica (ν) y el coeficiente de conductividad (λ) fueron implementadas en el programa mediante el uso de tablas. Los valores de estos parámetros fueron tomados de Bergman et al. (2011). Una consideración similar fue reportada por Bashria et al. (2007) y Zulkifle et al. (2018), los cuales implementaron formulas en función de la temperatura del aire en vez de valores discretos.

El colector modelado fue dividido en tres secciones, el sufijo i refiere a cada sección discreta transversal mientras que el sufijo j refiere a cada coeficiente convectivo y radiativo de la misma sección. Cada sección está conectada a las otras mediante el flujo másico del aire como se muestra en la figura 7.2. Los nodos B1-3 y D1-3 representan la temperatura del aire en circulación por arriba y debajo de la placa absorbidora respectivamente. El flujo másico a través del colector es el mismo, pero debido a que la sección transversal al mismo decrece, la velocidad de aire aumenta conforme avanza a través del colector. H1-3 y L1-3 representan la capacitancia inercial del aire circulante. Los nodos de temperatura ss y si representan el aire de salida para ambos canales, superior e inferior respectivamente. La convección entre los nodos del aire interior al colector y el nodo de temperatura ambiental fue modelada según Iriarte et al. (2014).

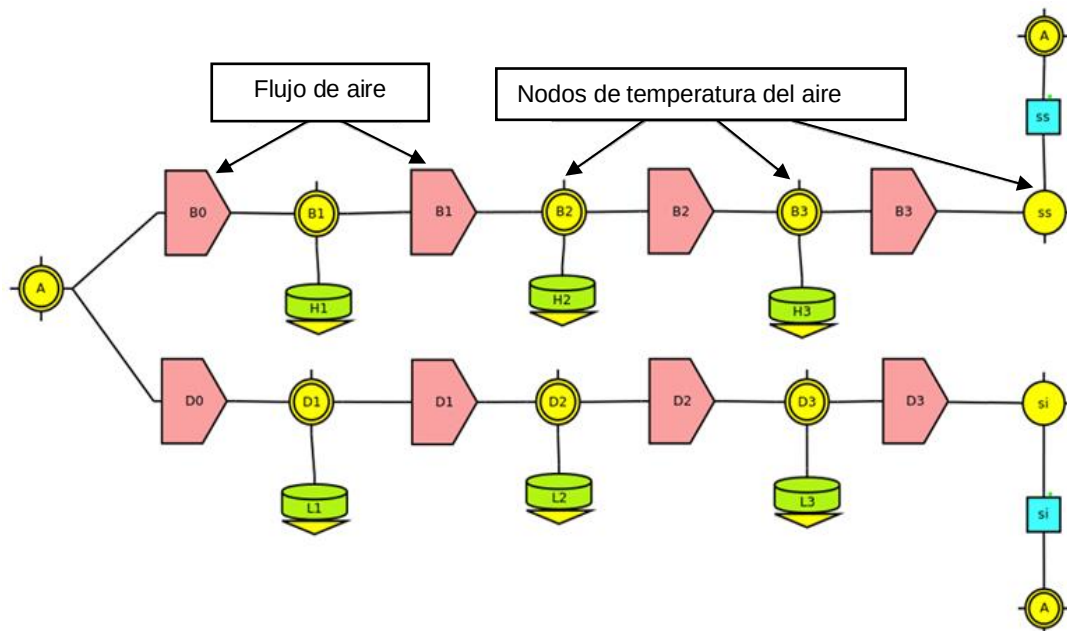


Figura 7.2. Representación del modelo de flujo másico a través del colector. B0-3 y D0-3 corresponden al flujo de aire arriba y debajo de la placa absorbidora respectivamente.

7.1.2. Condiciones de borde

Para cualquier sección del modelo, las condiciones de borde fueron calculadas según:

→ Cubierta

Esta superficie está expuesta directamente a las condiciones exteriores donde radiación y convección son los principales mecanismos de transferencia de calor. La cubierta está conformada por policarbonato alveolar representado como una única conductancia térmica con un coeficiente de transmisión de $\lambda_p=3.6$ (W/m² °C). La ecuación 7.4 expresa el balance de energía para cubierta de colección solar.

$$h_{cs,i}(T_{ci,o} - T_e) + F_{sky}\beta_s\epsilon\sigma(T_{ci,o}^4 - T_{sky}^4) + F_{sky}(1 - \beta_s)\epsilon\sigma(T_{ci,o}^4 - T_e^4) = \lambda_p \frac{\partial T_c}{\partial y} \quad \text{Ecuación 7.4}$$

Según Liu et al. (2017; 2018):

$$\beta_s = \sqrt{0.5(1 + \cos \theta_i)} \quad \text{Ecuación 7.5}$$

$$F_{sky} = 0.5(1 + \cos \theta_i) \quad \text{Ecuación 7.6}$$

$$T_{sky} = 0.0552 T_e^{1.5} \quad \text{Ecuación 7.7}$$

→ Placa absorbidora

La placa absorbidora es una superficie metálica pintada de negro mate la cual absorbe parcialmente la radiación solar incidente con el consiguiente aumento en su temperatura. El balance de energía en ésta está dado por la ecuación 7.8 donde la conducción térmica a través de la superficie metálica fue despreciada debido a su escaso espesor.

$$I_i \tau_p \alpha_p = h_{pai,a}(T_{p,i} - T_{ai,a}) + h_{pai,b}(T_{p,i} - T_{ai,b}) + \epsilon\sigma[2T_{p,i}^4 - T_{bi,i}^4 - T_{ci,i}^4] \quad \text{Ecuación 7.8}$$

→ Pared inferior

El aire que circula debajo del absorbedor transfiere parte de su energía térmica a la superficie inferior mediante convección y luego mediante conducción a través de la capa de aislación inferior hacia la cara exterior de la carcasa. Para cualquier sección del colector, la ecuación 7.9 introduce la condición de borde para la superficie inferior del mismo en donde la conducción de la carcasa metálica es despreciada debido a su escaso espesor.

$$h_{ab,i}(T_{ai,b} - T_{bi,i}) + \epsilon\sigma(T_{p,i}^4 - T_{bi,i}^4) = \lambda_{is} \frac{\partial T_{ib}}{\partial y} \quad \text{Ecuación 7.9}$$

→ Paredes internas

Las pérdidas térmicas a través de las paredes laterales del colector fueron consideradas teniendo solo en cuenta la convección. Se calcularon para ambos canales, tanto superior e inferior, mediante las ecuaciones 7.10 y 7.11.

$$h \left| \begin{smallmatrix} li, i-1 \\ ai, a \end{smallmatrix} \right. (T_{ai,a} - T_{li,i-1}) + h \left| \begin{smallmatrix} li, i-1 \\ ai, b \end{smallmatrix} \right. (T_{ai,b} - T_{li,i-1}) = \lambda_{is} \frac{\partial T_{li-1}}{\partial y} \quad \text{Ecuación 7.10}$$

$$h \left| \begin{smallmatrix} li, i-2 \\ ai, a \end{smallmatrix} \right. (T_{ai,a} - T_{li,i-2}) + h \left| \begin{smallmatrix} li, i-2 \\ ai, b \end{smallmatrix} \right. (T_{ai,b} - T_{li,i-2}) = \lambda_{is} \frac{\partial T_{li-2}}{\partial y} \quad \text{Ecuación 7.11}$$

7.1.3. Rendimiento térmico

Por definición (Duffie y Beckman, 2013) las pérdidas térmicas representan la energía que no es transferida al fluido calo portador (HTF por sus siglas en inglés – Heat Carrier Fluid) disipándose hacia la atmósfera. En consecuencia, el coeficiente de pérdidas globales es definido en términos de coeficientes de conducción, convección y radiación. Las perdidas térmicas a través del techo, de la base y de las paredes laterales se calculan de manera separadas mediante las ecuaciones 7.12, 7.13 y 7.14 respectivamente.

$$U_t = \sum_{i=1}^{i=3} \phi_{\lambda_{p,i}} [A_{t,i} (T_{ci,i} - T_{ci,o})]^{-1} \quad \text{Ecuación 7.12}$$

$$U_b = \sum_{i=1}^{i=3} \phi_{\lambda_{is,i}} [A_{b,i} (T_{bi,i} - T_{bi,o})]^{-1} \quad \text{Ecuación 7.13}$$

$$U_l = \sum_{i=1}^{i=3} \sum_{j=1}^{j=2} \phi_{\lambda_{is,i-j}} [A_{li,i-j} (T_{li,i-j} - T_{lo,i-j})]^{-1} \quad \text{Ecuación 7.14}$$

Los flujos de calor $\phi_{\lambda_{p,i}}$, $\phi_{\lambda_{is,i}}$ y $\phi_{\lambda_{is,i-j}}$ son calculados por Simusol como pérdidas conductivas. Sus valores pueden ser obtenidos mediante un simple pedido en los resultados de simulación a través del programa. La ecuación 7.15 da el coeficiente de pérdidas globales.

$$U_g = U_t + U_b + U_l \quad \text{Ecuación 7.15}$$

La energía útil del colector y la eficiencia global son calculadas mediante las ecuaciones 7.16 y 7.17 respectivamente.

$$Q_u = C_p [\dot{m}_a (T_{ai,a}|_{i=3} - T_e) + \dot{m}_b (T_{ai,b}|_{i=3} - T_e)] \quad \text{Ecuación 7.16}$$

$$\eta_g = 100 * \frac{Q_u}{I A_c} \quad \text{Ecuación 7.17}$$

Ambos flujos másicos, $\dot{m}_a$ y $\dot{m}_b$, son determinados a partir del balance térmico instantáneo entre los nodos de temperaturas B1 y D1 respectivamente (Iriarte et al. 2014).

$$\dot{m}_a C_p T_{ai,a}|_{i=1} = \sum_{j=1}^{j=4} \phi_{a,j}|_{i=1} \quad \text{Ecuación 7.18}$$

$$\dot{m}_b C_p T_{ai,b}|_{i=1} = \sum_{j=1}^{j=4} \phi_{b,j}|_{i=1} \quad \text{Ecuación 7.19}$$

El flujo másico total resulta en:

$$\dot{m}_t = \dot{m}_a + \dot{m}_b$$

Ecuación 7.20

Los flujos convectivos $\phi_{a,j}|_{i=1}$ y $\phi_{b,j}|_{i=1}$ son determinados por Simusol y representan la ganancia térmica desde el absorbedor, paredes laterales, cubierta y pared inferior hacia los respectivos nodos de aire como muestra la figura 7.3.

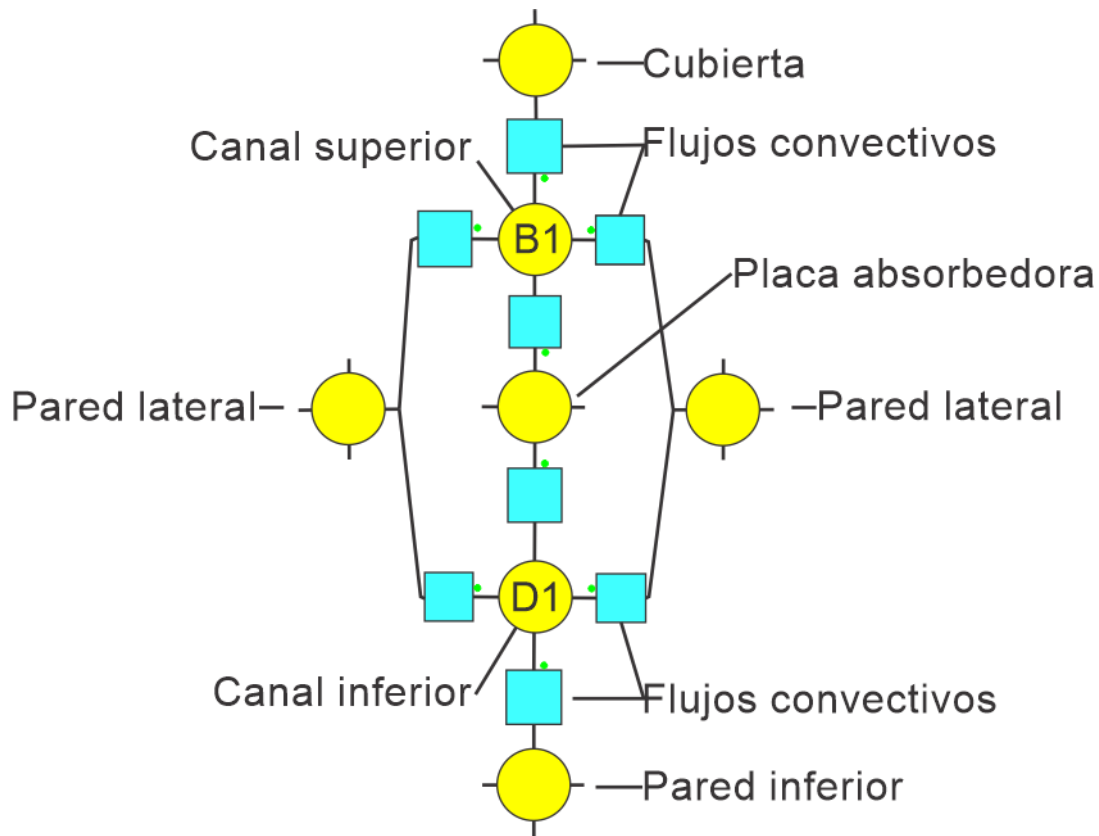


Figura 7.3. Esquema de los flujos convectivos hacia los nodos de aire para la primera sección del colector solar de aire.

7.1.4. Resultados de la simulación

Simusol genera una hoja de cálculo con pasos de tiempo de 7 segundos para cada parámetro. Es posible también realizar el pedido de distintas variables dependientes del tiempo; de caso contrario, Simusol muestra el perfil de temperatura de todos los nodos térmicos del modelo. Para correr la simulación, es necesario introducir como parámetros de entrada, información climatológica, basada en mediciones experimentales, de radiación solar, temperatura ambiental y velocidad del viento en el área colindante. Esta información es introducida mediante tablas, y pueden ser repetidas

múltiples veces mediante el comando *Prep*. Es también importante definir la inclinación y dimensiones geométricas del colector.

Debido a que Simusol corre en Linux, puede ser lanzado directamente desde una terminal de usuario ubicándose en la carpeta donde se encuentre el archivo *.dia* alojado (extensión de los archivos simusol) mediante el uso del comando *simusol*. Es importante guardar todos los cambios que se realicen antes de comenzar la simulación. La figura 7.4 muestra un diagrama de interacción entre el modelo térmico, la información climatológica de entrada, las propiedades térmicas/ópticas de los materiales, y los parámetros de diseño geométrico para los canales superior e inferiores. Las ecuaciones diferenciales son resueltas mediante el método de cuarto orden Runge-Kutta (Press et al., 1992), que es simple, robusto, y apropiado para la solución numérica de ecuaciones diferenciales combinadas con una rutina adaptativa de manera inteligente al tamaño de pasos de cálculo.

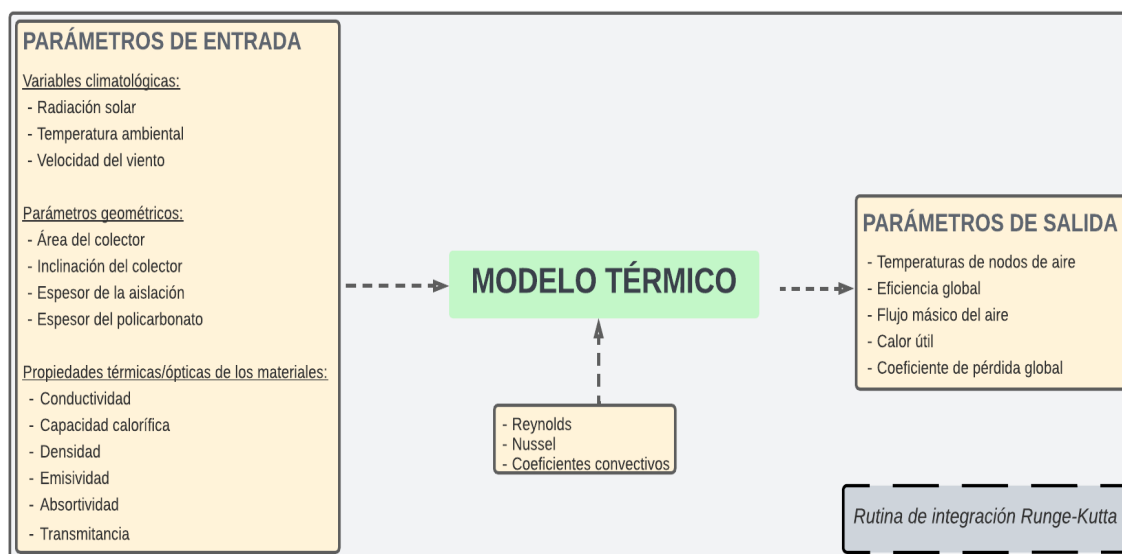


Figura 7.4. Esquema del modelo térmico implementado en Simusol.

Fueron seleccionados cuatro días para llevar a cabo la simulación numérica y validación, agrupados principalmente en dos tipos: día claro y parcialmente nublado. El objetivo de esto fue reproducir condiciones de variabilidad en las cuales debe funcionar el colector solar de aire de manera lo más realista posible. El gráfico 7.1 muestra el perfil de temperaturas para el flujo de aire del canal superior. Para simplificar el gráfico se definió un periodo de operación para el colector comprendido entre las 9 am hasta las 5 pm.

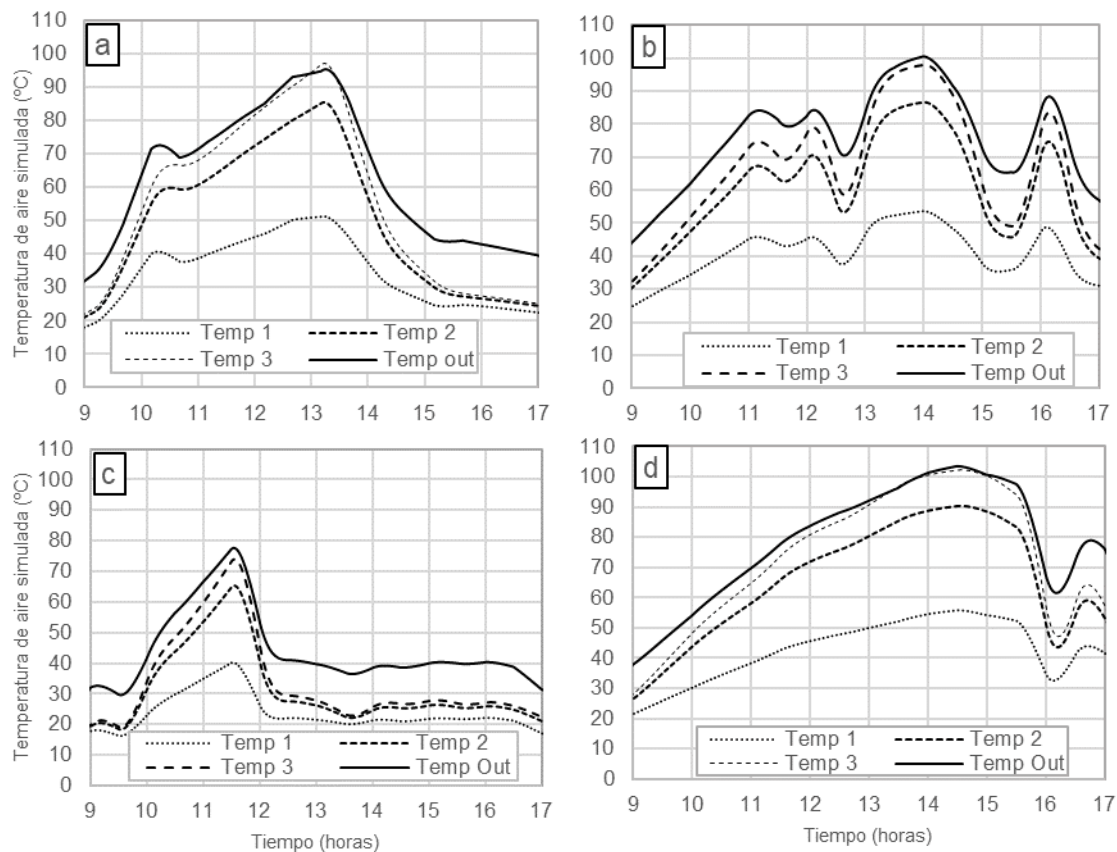


Gráfico 7.1. Temperaturas de aire del canal superior simuladas. Temperaturas 1 a 3 y temperatura de salida correspondientes a los nodos B1 a B3 y temperatura ss (ver figura 6.2). a) 29 de marzo del 2021 b) 6 de abril del 2021 d) 12 de abril del 2021 y d) 15 de abril del 2021.

Puede observarse que las temperaturas de salida del canal superior alcanzan alrededor de los 100 °C. Para procesos como secado de fruta, estas temperaturas pueden ser mayores que la necesaria, aunque adecuada para algunos tipos de granos y/o semillas. De todos modos, estos valores posibilitarían utilizar el colector en otro tipo de procesos además del secado de frutas. Los picos observados en las temperaturas están fuertemente relacionados con los altos valores de radiación medidos en el lugar sumado al área adicional de colección debido a la forma trapezoidal.

Las ecuaciones 7.18, 7.19 y 7.20 permiten obtener el flujo másico expresado en kg/s para ambos canales, superior, inferior y caudal másico total respectivamente. El calor útil y la temperatura de aire influyen fuertemente en los valores del caudal másico del aire (gráfico 7.2) los cuales como se pueden observar son diferentes para cada canal debido a la diferencia de calores útiles. Los valores de flujo másico más altos corresponden al canal superior significando que la velocidad del aire es a su vez mayor en dicho canal. Estos resultados numéricos fueron los esperados debido a que la fuente de calor (la placa absorbedora) se encuentra localizada debajo del nodo térmico del canal superior mientras que la misma fuente de calor está localizada encima del nodo térmico del canal inferior.

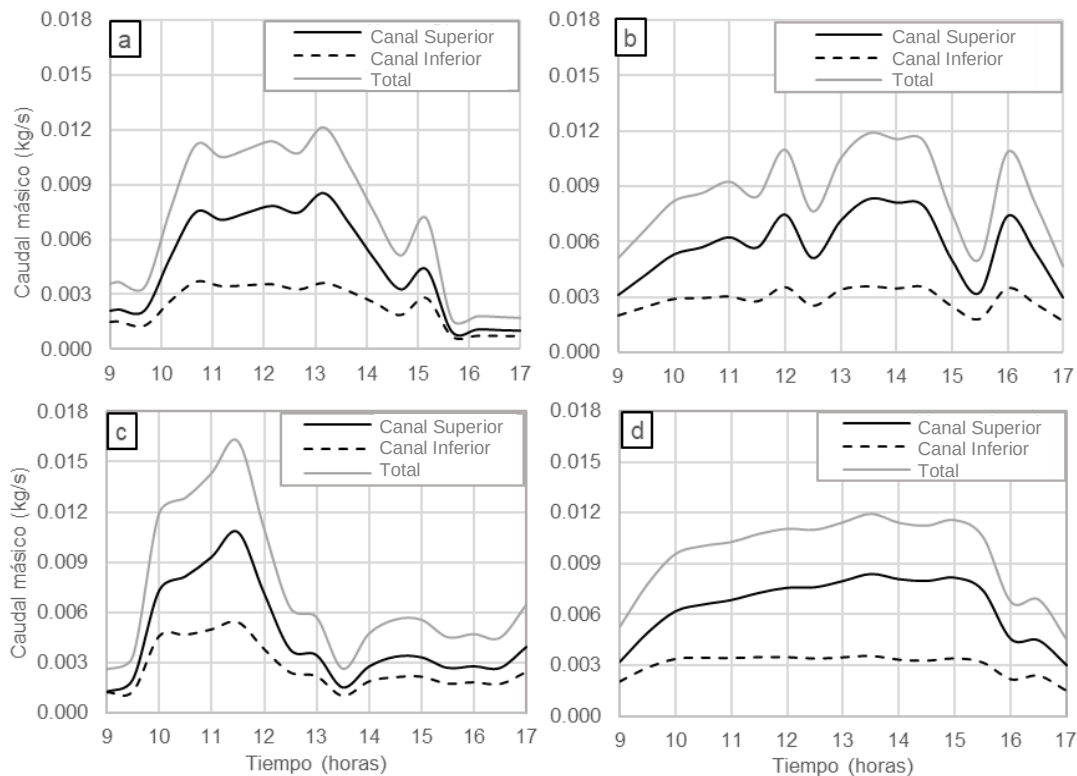


Gráfico 7.2. Perfiles de caudal másico para ambos canales, superior e inferior, y el total. a) 29 de marzo del 2021 b) 6 de abril del 2021 d) 12 de abril del 2021 y d) 15 de abril del 2021.

Los valores de caudal másico total oscilan entre 0.002 kg/s a 0.061 kg/s. Estudios de colectores solares de aire reportan valores de caudales másicos de 0.019 a 0.028 kg/s (Bhattacharyya et al., 2017), 0.017 kg/s (Ghiami y Ghiami, 2018), 0.013–0.04 kg/s (Kabeel et al., 2018), y 0.056 kg/s (Karim et al., 2006). En dichos trabajos es importante mencionar que se evidencian a la par de los distintos caudales, diferencias significativas entre la posición e inclinación de los colectores, las geometrías, las formas del absorbedor y materiales constructivos. Sin embargo, el flujo másico obtenido aquí se corresponde con los normalmente obtenidos para este tipo de tecnologías.

El calor útil es determinado mediante la ecuación 7.16 la cual depende de los flujos de caudal másico para ambos canales y de la diferencia entre las temperaturas de aire a la entrada y salida del colector. Aquí la dependencia del calor específico del aire en función de la temperatura fue despreciada. El gráfico 6.3 muestra los perfiles de calor útil para los cuatro días considerados durante la validación. El colector bajo estudio alcanzó potencias de salida máximas de alrededor 900 W. La eficiencia global es determinada por la ecuación 7.17, ver gráfico 7.3. Durante condiciones de operación de día claro, valores de eficiencia promedio del 25% fueron observados en horas cercanas al mediodía mientras que para los días nublados la eficiencia fue muy variable. Picos de alrededor de 31% fueron alcanzados por el colector.

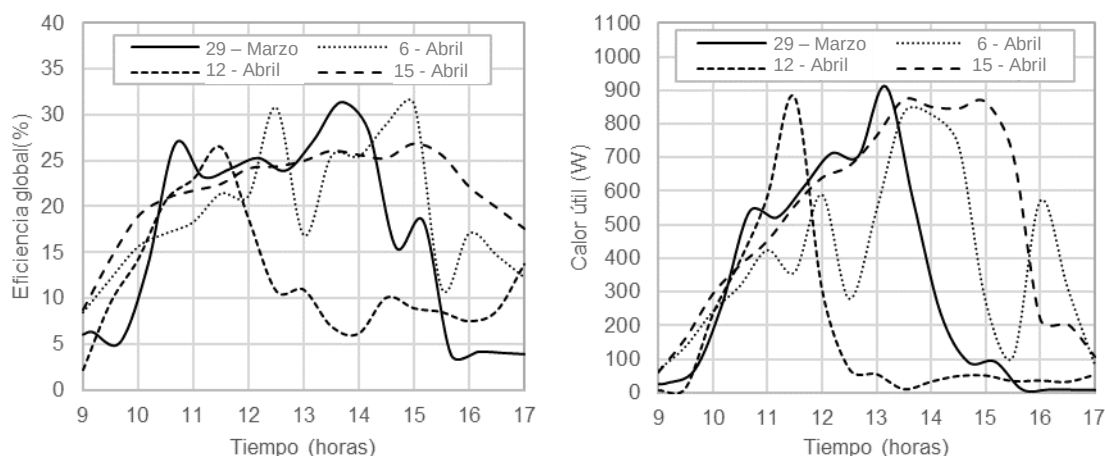


Gráfico 7.3. Eficiencia global (Izquierda) y calor útil (derecha).

Uno de los principales parámetros a ser considerados para describir el funcionamiento del equipo es el coeficiente de pérdidas global dado por la ecuación 7.15. En este modelo, las pérdidas por la cubierta, paredes laterales e inferior, fueron consideradas de manera separada estimándose luego las pérdidas globales. El gráfico 7.4 muestra la variación de las pérdidas globales en función del tiempo para los días considerados. Para el periodo de operación, el coeficiente global de pérdidas Fluctuó entre 10 y 12 W/m²°C. La literatura reporta como valor normal para colectores de aire con una sola cubierta 10 W/m²°C (Duffie and Beckman, 2013).

El gráfico 7.4. - b muestra el rango de caudal másico para la producción de aire caliente considerando la potencia térmica de salida del colector. Para un funcionamiento óptimo, el colector solar de aire debe operar en rangos entre 0.012 – 0.016 kg/s, aspecto que debiera ser considerado en caso de incorporarse un sistema para forzar la circulación del aire.

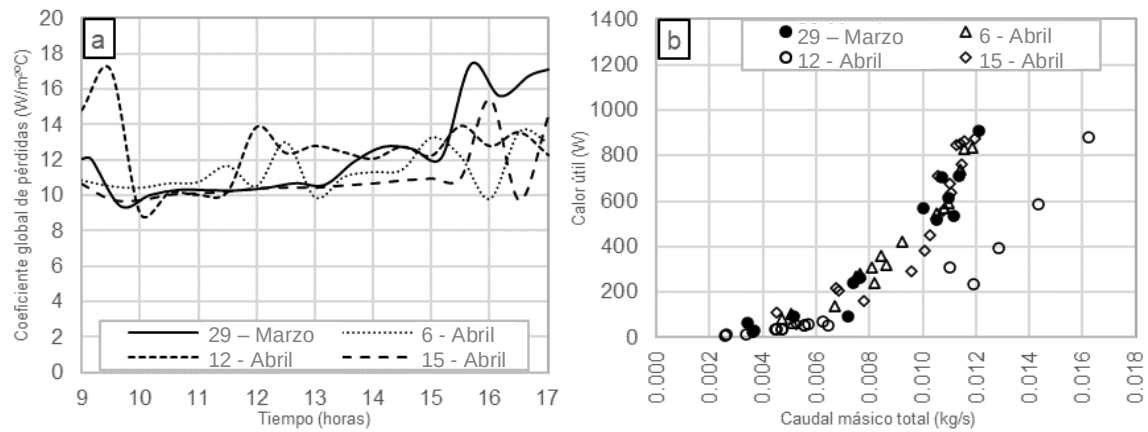


Gráfico 7.4. a) Coeficiente de pérdida global. b) Calor útil relacionado con el caudal másico total.

7.1.5. Mediciones experimentales.

Se utilizaron las mediciones experimentales para los días 6, 12 y 15 de abril del 2021 detalladas en el apartado 5.2.1, más mediciones realizadas para el día 29 de marzo del mismo año. Dichos días fueron elegidos considerando que dos de ellos se corresponden con un día claro y dos con días de nubosidad variables. Durante dichos días se realizó la medición de los parámetros ambientales: velocidad del viento, temperatura del aire y radiación sobre el plano de colección junto a las temperaturas del aire en puntos ubicados según los nodos térmicos del modelo de simulación: B1, B2, B3 y ss con el instrumental detallado en la tabla 5.1. Solo fue posible ubicar las termocuplas K para la medición de la temperatura de aire en el canal superior del colector.

Para la validación se utilizaron mediciones comprendidas entre las 9 am y 5 pm las cuales se observan en el gráfico 7.5. en el cuál es posible observar picos en las temperaturas del aire comprendidos entre los 80 °C y 100°C siguiendo la forma de la curva de la radiación los de la temperatura según lo esperado indicando una baja inercia térmica del equipo por lo cual alcanza rápidamente el estado estacionario. Para obtener temperaturas óptimas para secado entre los 50 – 60 °C (Saravia Mathon, 2010) el colector solar necesita radiaciones globales en el orden de los 600 W/m^2 y 900 W/m^2 . Los días nublados donde el recurso solar fue del orden de los 200 W/m^2 , la temperatura entregada por el equipo fue de alrededor de 35 – 40 °C.

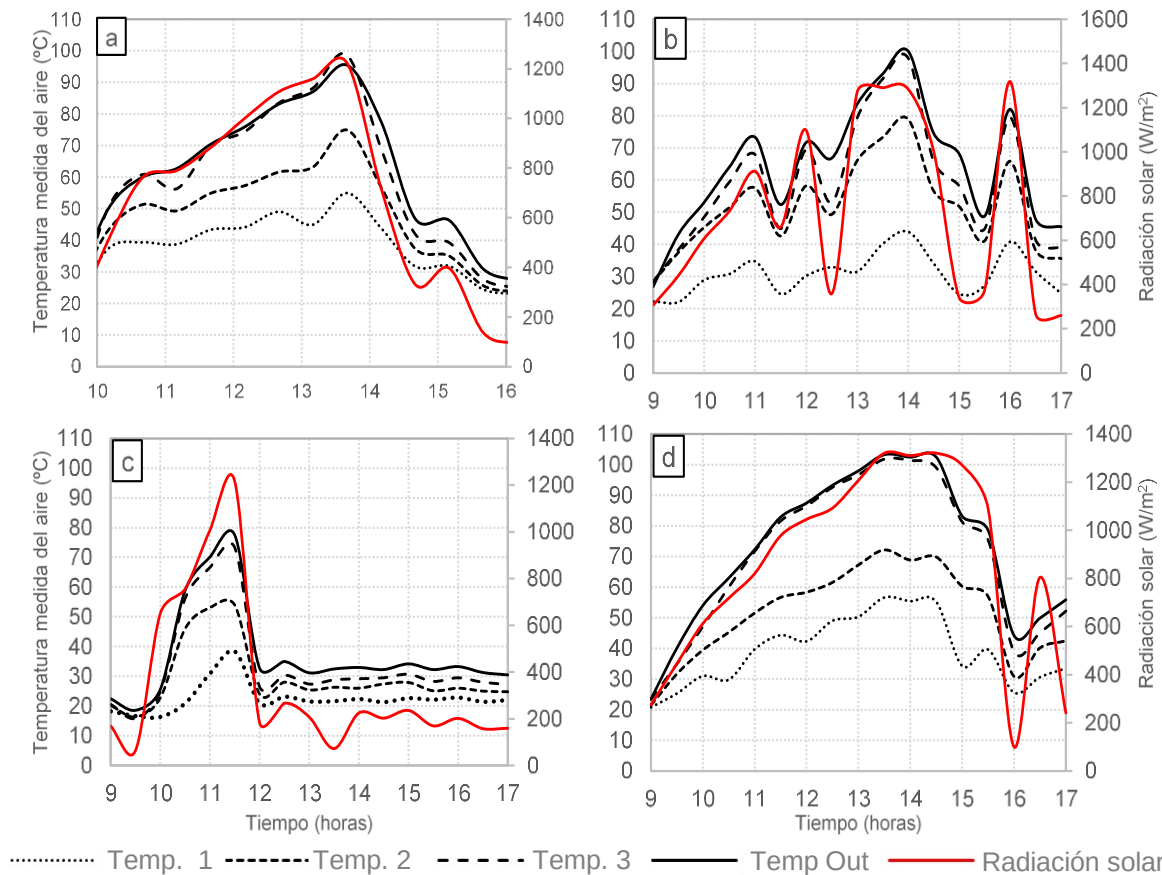


Gráfico 7.5. Temperaturas del aire del canal superior medidas. Temp Out se corresponde con el nodo ss del modelo de simulación. a) 29 de Marzo b) 6 de Abril c) 12 de Abril d) 15 de Abril

7.1.6. Validación del modelo.

Los resultados experimentales y de simulación fueron comparados en el gráfico 6.6 tomándose la temperatura del aire a lo largo del canal superior del colector como la variable principal a ser considerada para realizar dicha comparación. Para el conjunto de días bajo consideración, el coeficiente de determinación R^2 obtenido estuvo entre 0.81 y 0.93. Las correlaciones más bajas se obtuvieron para los días nublados, donde la radiación global fue de alrededor de 200 W/m² después del mediodía (12 de abril). Estas correlaciones pueden ser consideradas aceptables a pesar de las condiciones meteorológicas de trabajo inestables. Para los días de cielo claro, el coeficiente de correlación fue de 93%. Correlaciones intermedias fueron observadas para los días de condiciones parcialmente nublados. Mientras más estables fueron las condiciones climáticas, mejor fue el ajuste logrado con el modelo numérico computacional, el cual ha sido ajustado y mejorado en función de las mediciones experimentales.

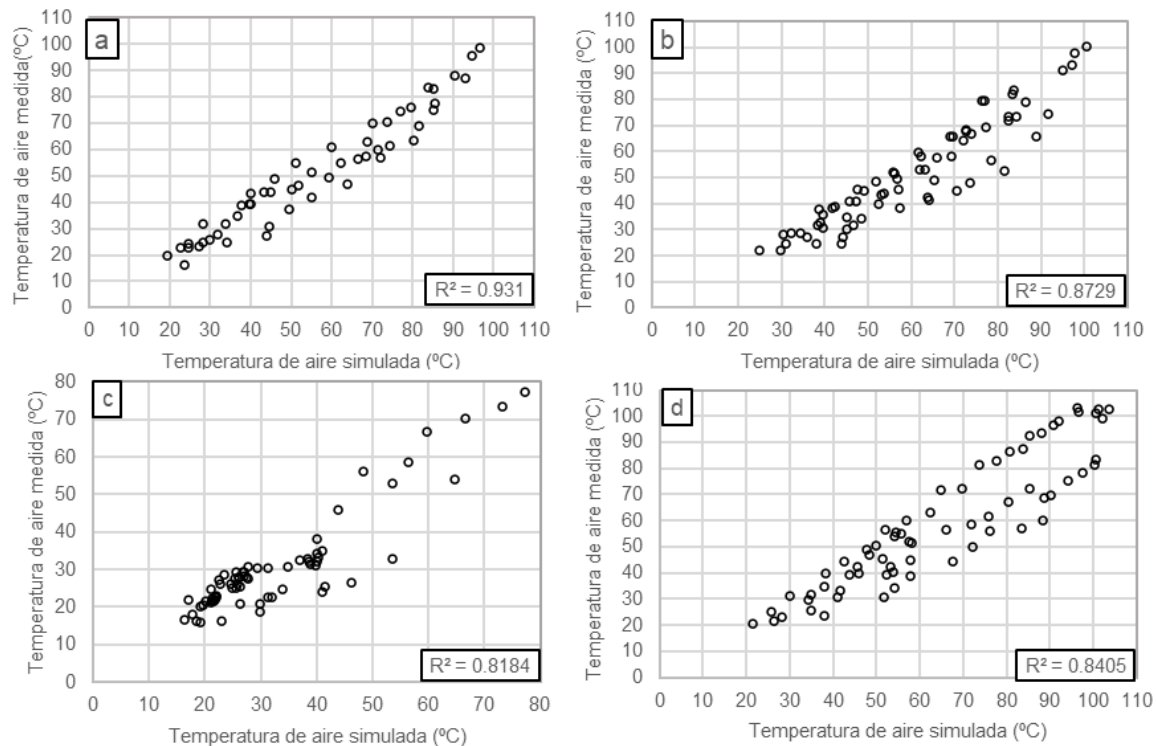


Gráfico 7.6. Comparación entre las temperaturas medidas experimentalmente y las obtenidas mediante simulación a) 29 de Marzo b) 6 de Abril c) 12 de Abril d) 15 de Abril

La dispersión observada en el gráfico 7.6 puede ser explicada a su vez debido a la gran variabilidad observada en el viento medido en los alrededores del equipo (Gráfico 7.7). Al tratarse de un equipo de tipo convectivo el cual, en esta etapa no estaba aún conectado a la cámara de secado definitiva, dichas variaciones en el viento exterior produjeron en consecuencia variaciones en la presión en las zonas de entrada y salida del aire, influyendo en el caudal másico y en los coeficientes convectivos. El gráfico 7.7 muestra el rango de variación de la velocidad del viento de entre 0.1 a 3.4 m/s, dicha variación es una característica propia de la zona donde se realizaron los ensayos (Carta eólica de la SEREE, último acceso 17 de abril de 2021).

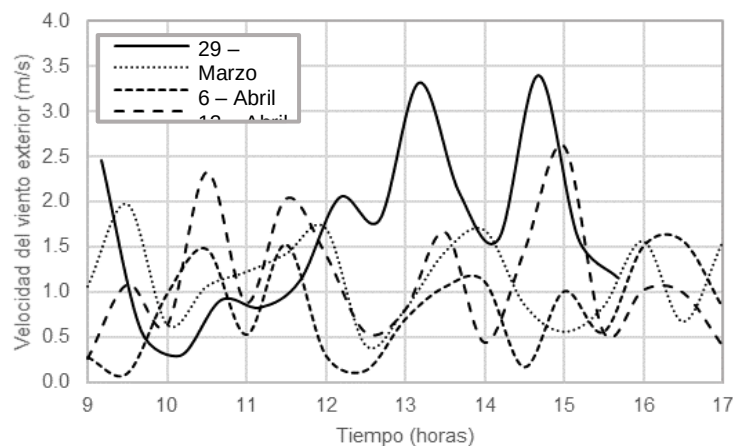


Gráfico 7.7. Velocidad del viento en los alrededores del colector solar de aire.

La fiabilidad del estudio realizado fue analizada mediante el empleo del software estadístico *Infostat*. En adición al R^2 , otros coeficientes fueron determinados. La tabla 7.2 muestra el p-valor, el error estándar (σ_x), el error absoluto medio (ϵ), la asimetría y los coeficientes de curtosis.

Tabla 7.2. Parámetros estadísticos del proceso de validación del modelo computacional.

Día	R^2 (%)	p-Value	σ_x (°C)	ϵ (°C)	Asimetría		Curtosis	
					Med.	Sim.	Med.	Sim.
29 de marzo	93.10	0.0000	5.74	4.70	1.14	0.40	-1.11	-1.76
6 de abril	87.29	0.0000	7.23	5.61	1.89	0.67	-0.84	-1.54
12 de abril	81.84	0.0000	5.86	4.46	5.44	3.62	5.24	1.87
15 de abril	84.05	0.0000	9.72	8.16	1.33	0.30	-1.55	-1.93

Los resultados del análisis estadístico muestran p-valores menores a 0.05 para todos los casos lo que indica una relación estadística significativa entre los valores simulados y medidos con un nivel de confianza del 95%. Como se mencionó arriba, el modelo explica la correlación entre las variables analizadas con un R^2 mayor al 80% indicando una buena relación entre variables. Para variables cuya distribución es normal, los coeficientes de asimetría y curtosis presentan valores entre -2 / +2. El día 12 de abril estuvo fuera de este rango, dicha desviación significativa pudo haber sido causada por el alto nivel de variación meteorológica de la radiación solar en combinación con una alta velocidad de viento exterior.

7.2 Propuesta numérica de un colector rectangular a partir del modelo numérico computacional validado.

Como ya se ha mencionado con anterioridad, una vez validado el modelo numérico, es posible predecir con un gran nivel de precisión como repercutirían en su funcionamiento la introducción de modificaciones diversas. Es por esto y debido a que la propuesta de construir un equipo trapezoidal es un supuesto de mejora, pues nunca se ha realizado la comparación práctica/experimental entre éste y el mismo equipo si hubiera tenido geometría rectangular, lo cual implicaría una gran inversión de recursos; es que, mediante la utilización del modelo expuesto en el apartado anterior, se decidió realizar dicha comparación. Se modificó de esta manera la geometría del colector, según se detalla en la figura 7.5, con el objetivo de determinar cómo la misma repercute en su funcionamiento y desempeño.

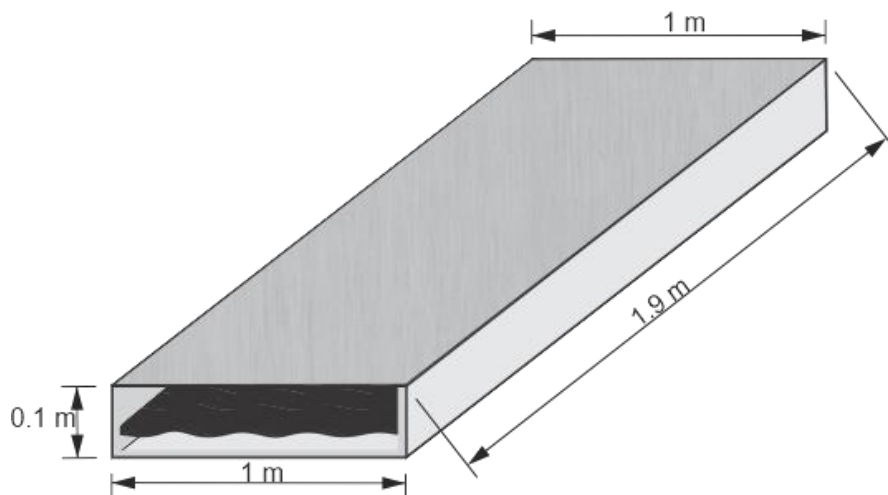


Figura 7.5. Colector rectangular simulado a partir del modelo validado experimentalmente.

Se corrió la simulación para los mismos cuatro días con los que se trabajó con el equipo trapezoidal pidiéndose entre los resultados los valores de aquellos parámetros considerados como los más importantes a los fines de la evaluación. presentados en el grafico 7.8. Con esta nueva geometría en evaluación se obtuvieron temperaturas máximas promedio de alrededor de los 100°C , caudales máxicos que oscilaron entre $0.0007 - 0.0062 \text{ kg/s}$, un calor útil máximo de 1267 W y promedio de alrededor de 468 W , una eficiencia máxima global promedio de 26% y un coeficiente global de pérdidas comprendidas entre $9 - 13.5 \text{ W/m}^2\text{C}$.

Se compararon ambas geometrías mediante la tabla 7.3 en la cual es posible observar que, si bien las temperaturas del aire de salida fueron prácticamente iguales entre ambos sistemas, el caudal másico del equipo rectangular fue considerablemente menor, lo que puede ser debido en parte a la menor área de entrada del aire la cual es de 0.1 m^2 en este caso, a diferencia del trapezoidal en donde es 0.24 m^2 . Dichas diferencias en el caudal másico determinarán finalmente menores desempeños debido a que menores caudales implicarán menores calores útil entregados por el equipo. Es importante en este punto, tener en cuenta que puntualmente para los procesos de secado, las temperaturas máximas después de ciertos límites, no son tan importantes, pudiendo hasta inclusive ser perjudiciales a diferencia del caudal másico y el calor útil, parámetros que, al mejorar mejoran en consecuencia las condiciones de deshidratación, habiéndose logrado esto último para el sistema trapezoidal.

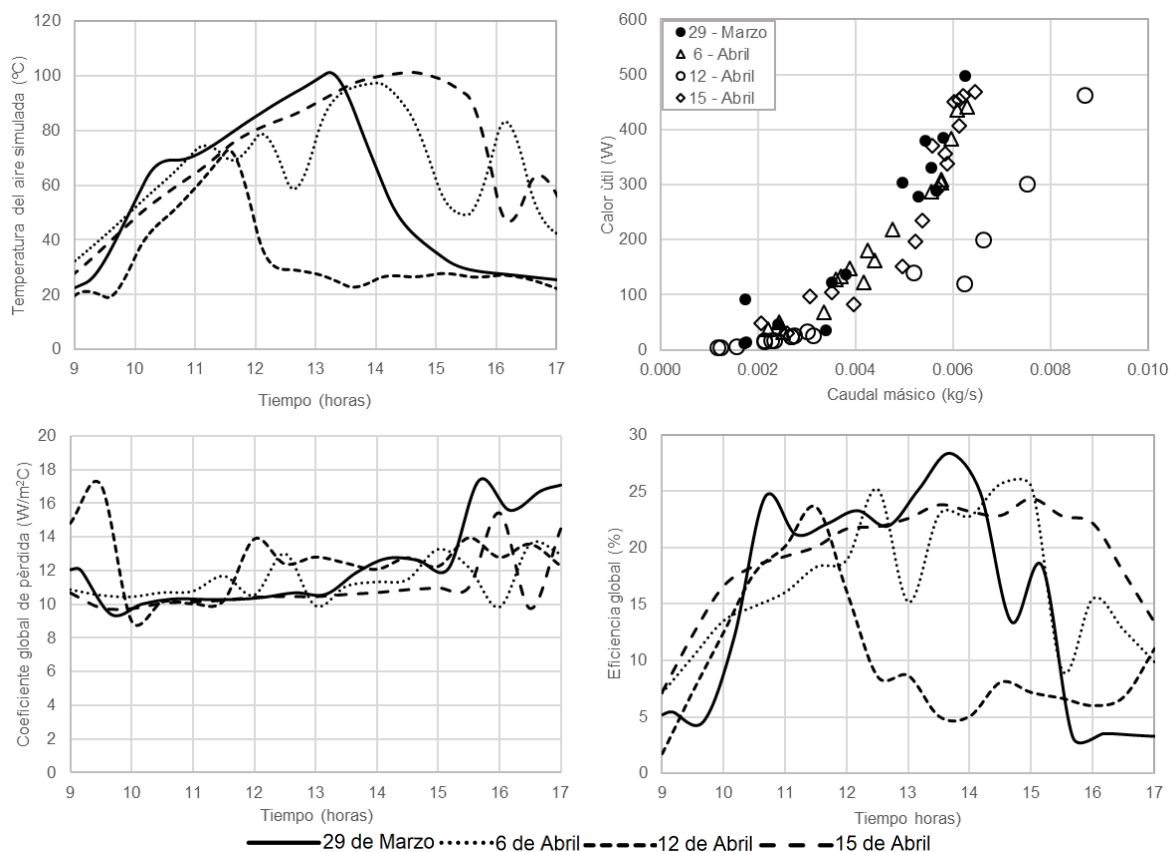


Gráfico 7.8. Simulación del colector con forma rectangular para los cuatro días a) Temperatura del aire a la salida del colector b) calor útil en función del caudal másico c) Coeficiente global de pérdida y c) Eficiencia global.

La tabla 7.3 se detallan los valores extremos para cada parámetro permitiendo observar que independientemente de las condiciones del día evaluado, tanto los máximos como los mínimos tendieron a ser siempre más altos para el sistema trapezoidal, esto incluido el coeficiente global de pérdidas, el cual al estar relacionado con el área del equipo, es de esperarse que sea mayor para mayores superficies de colección.

Tabla 7.3. Valores mínimos y máximos de los principales parámetros obtenidos mediante simulación para los colectores trapezoidal (trap.) y rectangular (rect.)

	29/03/2021		6/04/2021		12/04/2021		15/04/2021	
	Rect.	Trap.	Rect.	Trap.	Rect.	Trap.	Rect.	Trap.
Parámetros	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.
Caudal másico (kg/s x 10 ⁻³)	0.7	6.2	2.6	16.2	2.2	6.3	6	16.1
Calor útil (W)	4	497	12	1322	33	441	92	1215
Temperatura del aire de salida (°C)	33.3	92.9	34	84.6	44.5	101	44.2	100.6
Eficiencia global (%)	3	28	6	45	7	26	12	44
Coeficiente global de pérdidas (W/m ² °C)	9.4	17.4	8.3	23.1	9.8	13.5	11.8	18.9

Se obtuvieron en la tabla 7.4 las proporciones de mejora a partir de la ecuación 7.21 a fin de entender de una manera más sencilla qué proporción mejora o empeora cada uno de los parámetros evaluados cuando incorporamos modificaciones simples en el equipo, como son las geométricas, permitiendo finalmente corroborar que dicho cambio involucró mejoras notables tanto en el desempeño como en la eficiencia mejorando el caudal másico y calor útil en más del doble.

$$\text{Proporción de mejora} = \frac{\text{Máx. Parámetro}_i \text{ Colector Trapezoidal}}{\text{Máx. Parámetro}_i \text{ Colector Rectangular}} \quad \text{Ecuación 7.21}$$

Tabla 7.4. Proporción de mejora obtenida a partir de la comparación día a día de los valores máximos para cada uno de los parámetros evaluados.

Parámetro	Dia	Proporción de mejora				
		29/3/2021	6/4/2021	6/4/2021	15/4/2021	Promedio
Caudal másico ($\text{kg/s} \times 10^{-3}$)		2.6	2.6	2.3	2.5	2.5
Calor útil (W)		2.7	2.8	2.5	2.7	2.6
Temperatura del aire de salida ($^{\circ}\text{C}$)		0.9	1.0	1.0	1.0	1.0
Eficiencia global (%)		1.6	1.7	1.5	1.6	1.6
Coeficiente global de pérdidas ($\text{W/m}^2\text{C}$)		1.3	1.4	1.2	1.3	1.3

7.3 Evaluación de la incorporación de materiales de cambio de fase en el colector solar de aire.

A lo largo de la revisión bibliográfica realizada en el capítulo 1 de la presente tesis, fue posible identificar que una de las principales motivaciones actuales relacionadas a los procesos de secado solar en general, y a la utilización de colectores de aire en particular; es indagar sobre mecanismos que permitan extender el proceso aun cuando el recurso solar deja de estar disponible. Sumado a esto, se identificó que, la diversificación de la matriz energética como estrategia de mitigación y adaptación, en el actual contexto de crisis climática, involucra el ahorro energético en términos de eficiencia y almacenamiento entendiendo al mismo como un vector para cumplir con los diferentes objetivos que permitan la transición hacia un modelo de producción/consumo sostenible.

Lo anterior lleva a pensar que dentro de las diferentes formas de aplicación de energía solar, es la investigación sobre sistemas de almacenamiento energético, principalmente de tipo térmicos (TES, por sus siglas en inglés) de gran importancia en la materia al estar los mismos relacionados, por un lado a la disminución de los costos vinculados a la generación (LCOH) (Dellicompagni et al., 2021), pero también a la profundización en la independencia de los ciclos diarios de disponibilidad de radiación y mejor aprovechamiento de ésta. Los mencionados TES cumplen con un doble rol, en primer lugar, suplir a la demanda energética cuando la generación es insuficiente y, en segundo lugar, poder disponer de energía en mayores períodos de tiempos, o ante la ausencia de la principal fuente energética (Mazlan et al., 2021).

Uno de los TES que ha cobrado relevancia, sobre todo en sistemas de aprovechamiento de energía solar, es aquel que emplea materiales de cambio de fase (PCM, por sus siglas en inglés); y esto se debe a la absorción/liberación de energía térmica cuando dichas sustancias se encuentran

cambiando de estado, lo que se conoce como almacenamiento de calor latente (Torres-Gallo et al., 2017; Dellicompagni et al., 2020). En cuanto a la sustancia a utilizar como TES, son diversos los parámetros a considerar para optar por una u otra. Principalmente, se ha de tener en cuenta el punto de fusión, el cual está relacionado con la temperatura a la cual suceden los procesos, o bien, a la cual se quiere disponer de energía térmica. En segundo lugar, el calor latente y la capacidad calorífica que determinan la cantidad de energía que se podrá intercambiar desde y hacia el TES. Por último, la finalidad de uso y la escala energética determinarán qué sustancia usar. Por ejemplo, para la producción eléctrica a gran escala, normalmente se emplean sales fundidas ya sean como fluido caloportador (HTF, por sus siglas en inglés) o como medio de almacenamiento (Giaconia et al., 2020). Por otro lado, en sistemas térmicos de baja entalpía, se emplea PCM de bajo punto de fusión, como ser Hidróxido de bario (Díaz, 2017) o parafinas (Heim et al., 2021). Se analizó a continuación de manera comparativa mediante la utilización del modelo numérico computacional previamente validado y continuando con la utilización de Simusol, el comportamiento térmico del colector con y sin PCM.

7.3.1. Descripción del modelo de parafina

El modelo implementado para la representación del comportamiento térmico del PCM es aquel propuesto por Dellicompagni et al. (2020), en el cual la parafina se comporta como un medio de transmisión de calor del tipo principalmente conductivo, es decir, los esfuerzos por viscosidad no se consideran, dado a que la velocidad con la que se mueve la parafina en su estado líquido es baja, por lo que la convección interna se desprecia. La energía puesta en intercambio se debe a dos procesos: calor sensible y latente. Habitualmente la selección de la parafina para el proceso en el cual quiere ser incorporada para almacenamiento térmico puede ser complejo debiendo habitualmente caracterizarse las propiedades físicas y ópticas del material de manera experimental (Dellicompagni et al., 2020) mediante la realización de una calorimetría diferencial de barrido (DSC – por sus siglas en inglés). Sin embargo, debido a que en Argentina no se consiguen las parafinas con el nivel de pureza necesario para su utilización como sistemas de almacenamiento, se adoptó para el presente análisis, una parafina de la firma Rubitherm® cuyo punto de fusión nominal es de 60°C y posee las características descriptas en la tabla 7.4.

Tabla 7.4. Propiedades termo-físicas del PCM modelado (Rubitherm® RT64HC).

Propiedad	Valor típico	Unidad	Comentario
Punto de fusión	63 – 65	°C	Pico máximo en 64°C
Punto de solidificación	64 – 61	°C	Pico máximo en 64°C
Calor latente	250	kJ/kg	±7.5%
Capacidad calorífica	2	kJ/kg°C	-
Densidad en sólido	0.88	kg/l	A 20°C
Densidad en líquido	0.78	kg/l	A 80°C
Conductividad térmica	0.2	W/m°C	En ambos estados
Temperatura máxima	95	°C	Limite operativo

La Fig. 7.6. muestra el mecanismo de transferencia de calor a través de una capa de PCM, mediante un esquema realizado con la simbología de simusol, en la cual los ingresos y egresos de energía térmica suceden por los nodos superior e inferior, de forma unidireccional. Un nodo central representa a la parafina (Pr), el cual está acoplado a una fuente de temperatura. Es esta temperatura la que varía en función de la energía absorbida o liberada, como así también del estado (líquido, sólido o de transición).

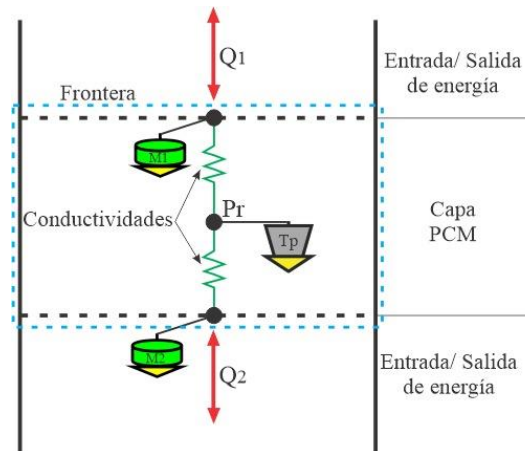


Figura 7.6. Mecanismo de transferencia de calor a través de una capa de PCM.

La ecuación 7.22 se formula a partir de la metodología de Dellicompagni et al. (2020), mediante la cual se obtiene la variación temporal de la temperatura de la parafina.

$$\frac{\partial T_p}{\partial t} = \left[\sum Q_i - m_p \dot{H} \beta_l \right] \left[\frac{1}{1 + \beta_s m_p H C_p} \right] \quad \text{Ecuación 7.22}$$

Dónde:

$\sum Q_i$: Representa a todos los ingresos y egresos de energía térmica hacia y desde el nodo de parafina, ya sea por conducción, convección o irradiación.

m_p : Es la masa de la parafina.

β_l : Es un parámetro de control igual a 1 cuando ocurre el cambio de estado y 0 cuando el intercambio energético es del tipo sensible.

β_s : Es un parámetro de control igual a 1 cuando el intercambio energético es del tipo sensible y 0 cuando ocurre el cambio de estado.

$\dot{H}$: Es el calor latente de cambio de estado, 250 J/g.

$H C_p$: Es el poder calorífico de la parafina.

La información sobre $\dot{H}$ y $H C_p$ se obtuvo a partir de la hoja de datos del fabricante. En el caso particular de $H C_p$, en este modelo se aproximó su variación con respecto a la temperatura mediante una regresión gaussiana, según se muestra en el gráfico 7.9 - a. Esta regresión responde a la ecuación 7.23, en la cual los coeficientes a, b, c y d se muestran en la tabla 7.5. El grado de ajuste

entre los valores dados por el fabricante y los obtenidos mediante regresión gaussiana se observa en el gráfico 7.9 - b, en la cual un R^2 ajustado de 89.78% se consideró aceptable a los fines de la modelización. La variación de los parámetros β_s y β_l también mostrados en el gráfico 7.9 – a, con respecto a la temperatura de la parafina se proponen de forma gradual, es decir, tanto los flancos ascendentes como los descendentes son rectas de pendiente acentuada. Esto tiene la finalidad de superponer los procesos de intercambio de calor latente y sensible, para representar la transición desde un mecanismo de transferencia hacia otro, conforme varía la temperatura y ocurren los cambios de estado; cómo así evitar divergencias infinitas en la ecuación diferencial 7.22.

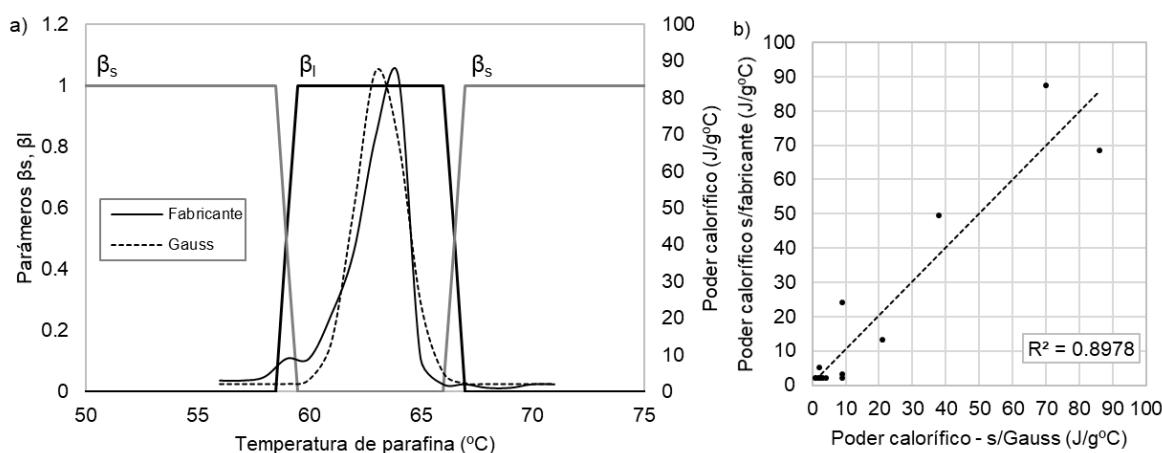


Gráfico 7.9. a) Comparativa entre valores del poder calorífico dado por el fabricante y el respectivo obtenido por regresión gaussiana. Se muestra además la variación de los parámetros de control β_s y β_l en función de la temperatura de la parafina. b) Grado de ajuste de la regresión.

$$HC_p = 1000 \left(a * e^{-\left(\frac{T-b}{2*c^2}\right)} + d \right) \quad \text{Ecuación 7.23}$$

Dónde:

T: es la temperatura de la parafina en °C.

Tabla 7.5. Coeficientes de regresión gaussiana para el PCM modelado (Rubitherm® RT64HC).

Coeficiente	Valor	Unidad
a	87	J/g
b	63.2	°C
c	0.89	$1/\sqrt{^\circ\text{C}}$
d	2	J/g

7.3.2. Descripción del modelo ensamblado

El modelo ensamblado se basa principalmente en el mostrado en la figura 7.1, que corresponde al colector solar, al cual se le añadió la capa de parafina (figura 7.6) por debajo del absorbedor, obteniéndose el esquema de transferencia térmica que se muestra en la figura. 7.7.

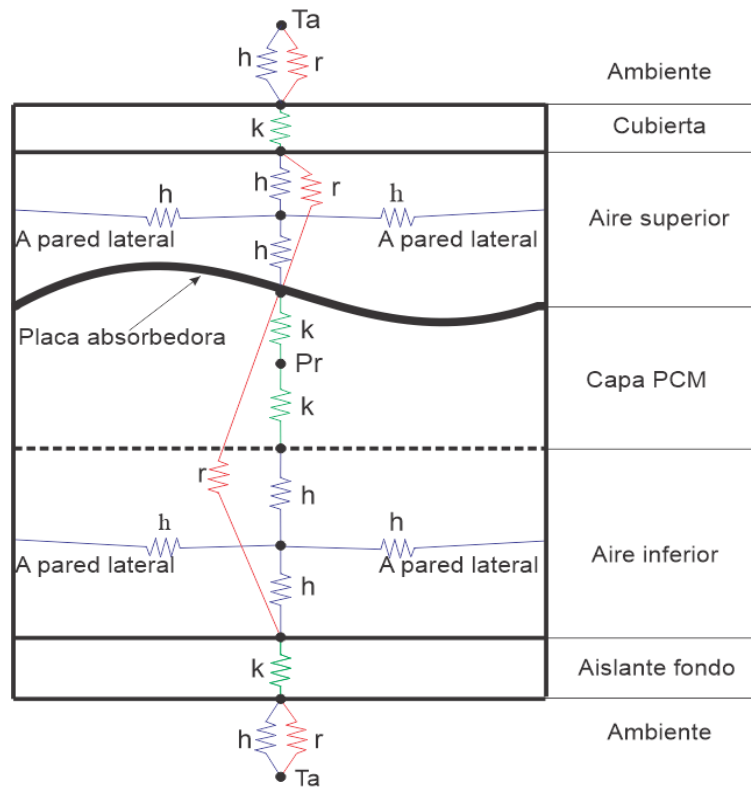


Figura 7.7. Diagrama realizado sin escala de los mecanismos de transferencia de calor para el modelo ensamblado. Referencias: k: conductividad; h: convectividad; r: radiatividad.

El calor que absorbe la placa es en parte entregada al aire del canal superior y parte a la parafina determinando la variación de su temperatura y/o estado (ecuación 7.24), tal es así, que el intercambio de energía desde y hacia la parafina ocurre entre ésta y la placa absorbedora como al nodo de aire del canal inferior.

$$I_i \tau_p \alpha_p = h_{pai,a} (T_{p,i} - T_{ai,a}) + k_{pr} e_{pr} \Delta T_p + \epsilon_p \sigma [2T_{p,i}^4 - T_{bi,i}^4 - T_{ci,i}^4] \quad \text{Ecuación 7.24}$$

Se mantienen para esta instancia, las hipótesis de simulación planteadas en el apartado 7.1.1, más las siguientes:

- La transferencia de calor en la capa de parafina es principalmente de tipo conductivo despreciándose las convectividades internas debido a la baja velocidad del PCM en estado líquido.
- Los flujos de calor hacia y desde la capa de PCM son al igual que para el colector, unidireccionales y en sentido transversal a la misma.

- Al ubicarse la capa de parafina debajo de la placa absorbedora, la ganancia térmica por incidencia solar no tiene lugar en el nodo de PCM
- Se supone a los fines de simulación que la parafina se encuentra alojada a modo de capa uniforme sin una estructura que la contenga despreciándose las diferencias de espesor producto de la adopción de la misma de la forma sinusoidal de la placa encontrándose en contacto debajo de lo misma a lo largo de toda su extensión.
- La capa de parafina se supone homogénea, es decir, sin burbujas de aire en su interior.
- La capa límite de la parafina es de dimensiones despreciables, por lo que no influye en el intercambio de energía.
- Se considera que la altura de la capa de parafina no afecta la altura por la cual circula el aire en el canal inferior considerando las dimensiones de éste invariables respecto a la configuración del equipo sin parafina.

7.3.3 Proceso de simulación y resultados.

Para la evaluación de modelo ensamblado se continuó trabajando con los 4 días utilizados en la validación experimental. Se contrastó la simulación del colector solar sin parafina y con parafina, realizándose una evaluación paramétrica en función del espesor de la capa de PCM para tres valores: 3, 5 y 10 mm.

El gráfico 7.10 muestra los principales resultados obtenidos para el día 29 de marzo. En el gráfico 7.10 – g se puede ver en amarillo el recurso solar a lo largo del día en cuestión, el cual tuvo una distribución bastante normal, si se considera un día típico, hasta aproximadamente las 13 y 14 horas, a partir del cual la radiación incidente disminuyó como consecuencia de algunas nubosidades. Para el caso base, sin incorporación de parafinas, las temperaturas máximas para el aire de salida del colector son del orden de los 95 °C y 80 °C para el canal superior e inferior respectivamente, gráfico 7.10 - a y b. Al incorporarse parafina al equipo, se observa una disminución de los picos de temperatura debido a que, en esta nueva situación, la energía aprovechada por el colector solar es entregada en parte al calentamiento del aire y en parte al cambio de fase y calentamiento de la capa de PCM, siendo mayor la energía necesaria cuando mayor es el espesor y en consecuencia a su vez, mayor la energía acumulada por el material de cambio de fase.

De esta forma se observa que las temperaturas máximas alcanzadas por el aire entregado son para el canal superior e inferior del orden de los 74 °C y 56 °C cuando la capa es de 10 mm, 69 °C y 55°C cuando es de 5 mm y 67 °C y 54 °C cuando es de 3 mm no observándose diferencias significativas entre los distintos casos para el canal inferior, a diferencia del superior, donde en función del sentido común uno esperaría que haya mayores diferencias en los picos máximos o dicho de otra manera, mayor disminución en la temperatura del aire cuando mayor es el espesor de PCM que se incorpora, siendo sin embargo al revés de lo esperado.

Esto se explica ya que la capa de parafina que se incorpora responde a un modelo conductivo (ver figura 7.6) actuando la misma como material resistivo; siendo en consecuencia mayor la resistencia al flujo del calor a través de ésta cuando mayor es el espesor de la capa, costando a su

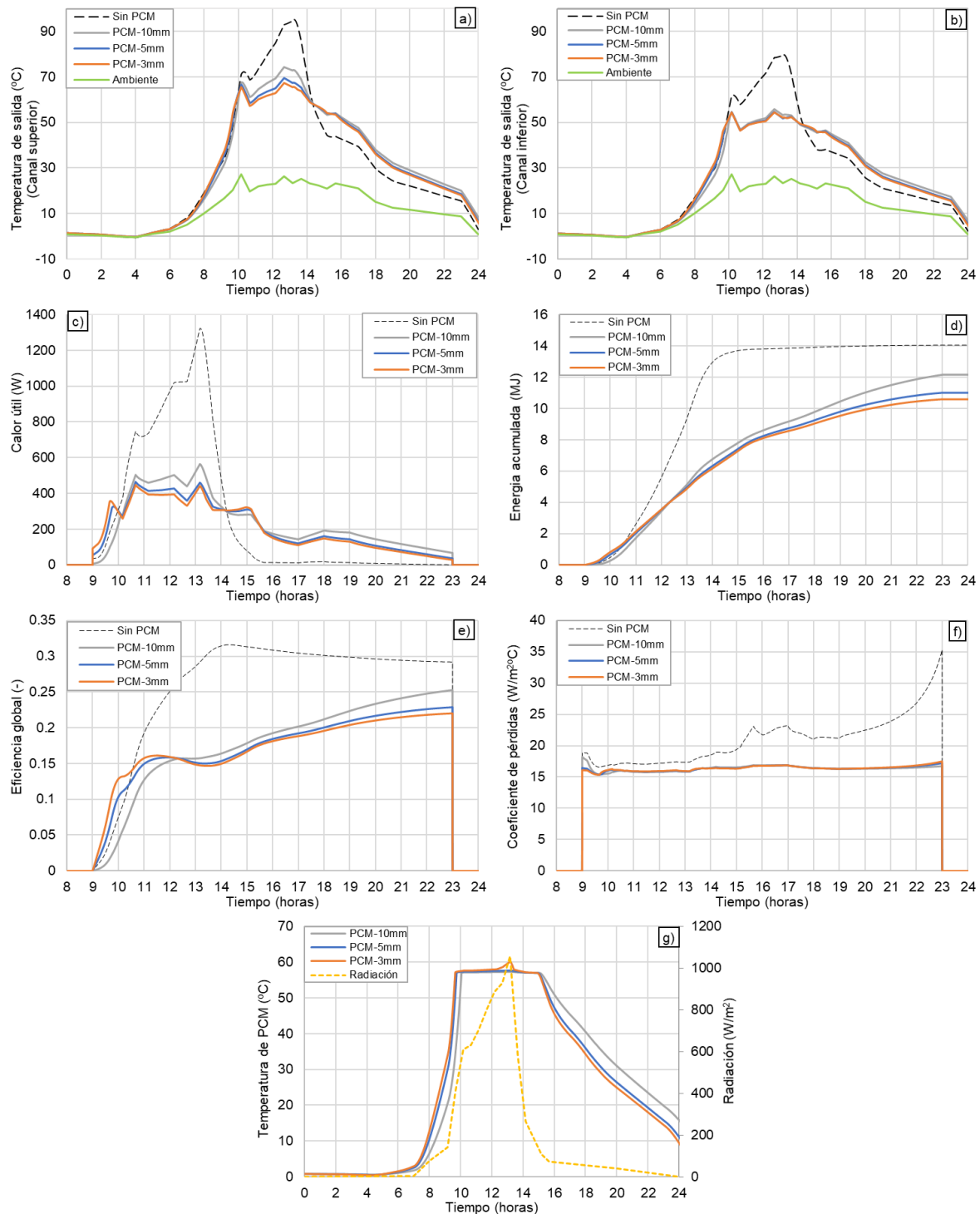


Gráfico 7.10. Resultados obtenidos para el 29-03-2021 cuando el equipo no tiene PCM y para tres espesores distintos de parafina. a) Temperatura de salida del aire del canal superior, b) Temperatura de salida del aire del canal inferior, c) Calor útil a lo largo del tiempo de funcionamiento del colector, d) Energía acumulada a lo largo del tiempo de funcionamiento, e) Eficiencia global instantánea, f)

Coeficiente global de pérdidas y g) Evolución de la temperatura de la capa de parafina y radiación en función del tiempo.

vez más el aumento de su temperatura y la absorción del calor proveniente del aire en circulación. En consecuencia, al ser mayor la inercia térmica de la capa a mayores espesores, es menor el calor que absorbe del aire en circulación el cual disminuye a su vez menos su temperatura, al ceder menos calor, cuando más grande es la capa de PCM. Esto es posible a su vez de observar en el gráfico 7.10 – g, en el cual se encuentra graficada la evolución de la temperatura de las diferentes capas de parafina a lo largo del tiempo. A medida que la capa es más fina, más rápido se da su cambio de fase y su aumento de temperatura. En dicho gráfico también se puede ver que solo la capa de 3 mm logra cambiar de estado en su totalidad para continuar aumento su temperatura luego de que se produzca el mismo.

El gráfico 7.10 – c muestra el contraste del calor útil entre el caso sin PCM con las diferentes situaciones con parafina. Cuando no se tiene parafina, la potencia térmica sigue el comportamiento de la radiación, alcanzando un pico máximo igual 1323 W y disminuyendo cuando está última también lo hace. Cuando se incorpora parafina, si bien el pico máximo de potencia disminuye en promedio en un 37 %, la misma se estabiliza a lo largo del día variando mucho más lentamente que el recurso solar, logrando el equipo aumentar la franja de tiempo en la cual entrega calor útil. Mejor son las condiciones del día, mayor será la energía acumulada (ver gráfico 7.10 – d) y en consecuencia mayor el tiempo de funcionamiento posible a partir de que haya ausencia de radiación incidente. Para este día particular, la energía acumulada total cuando se incorporó parafina independientemente del caso paramétrico estudiado, fue menor que el caso base.

Se observa también una caída en la eficiencia global en referencia al caso base, esto es debido a lo ya discutido respecto a las temperaturas del aire; al disminuir la diferencia de la temperatura del aire de salida respecto al aire de entrada (Δt), debido a que ahora parte del calor está siendo entregada a la capa de parafina, disminuirá en consecuencia la eficiencia calculada del equipo. Sin embargo, cuando la radiación disminuya, la eficiencia aumentará tal como se ve en el gráfico 7.10 – e, pues la relación energía entregada/energía incidente sobre el sistema aumentará como consecuencia del calor que ha sido acumulado en el PCM durante el día y que comienza a ser entregado cuando la radiación disminuye. Se observa finalmente en el gráfico 7.10 – f, la influencia de la acumulación con PCM sobre el coeficiente global de pérdidas, el cual tiende a ser menor y más estable cuando se incorpora parafina como consecuencia de que cuando tenemos parafina, partes de las pérdidas de calor en vez de disiparse hacia el ambiente, van hacia el calentamiento de la capa de material de cambio de fase.

El gráfico 7.11 muestra el mismo análisis realizado, pero ahora para el día 6 de abril el cual presentó condiciones mucho más variables de radiación que el recientemente analizado, observándose solo dos picos en la misma donde el día se despejó en su totalidad, la franja entre las 12 y 14 horas y las 15 y 17 horas. Se observa en consecuencia en el gráfico 7.11- a y b gran variación en la temperatura del aire entregado con, con picos máximos para el canal superior e inferior para el

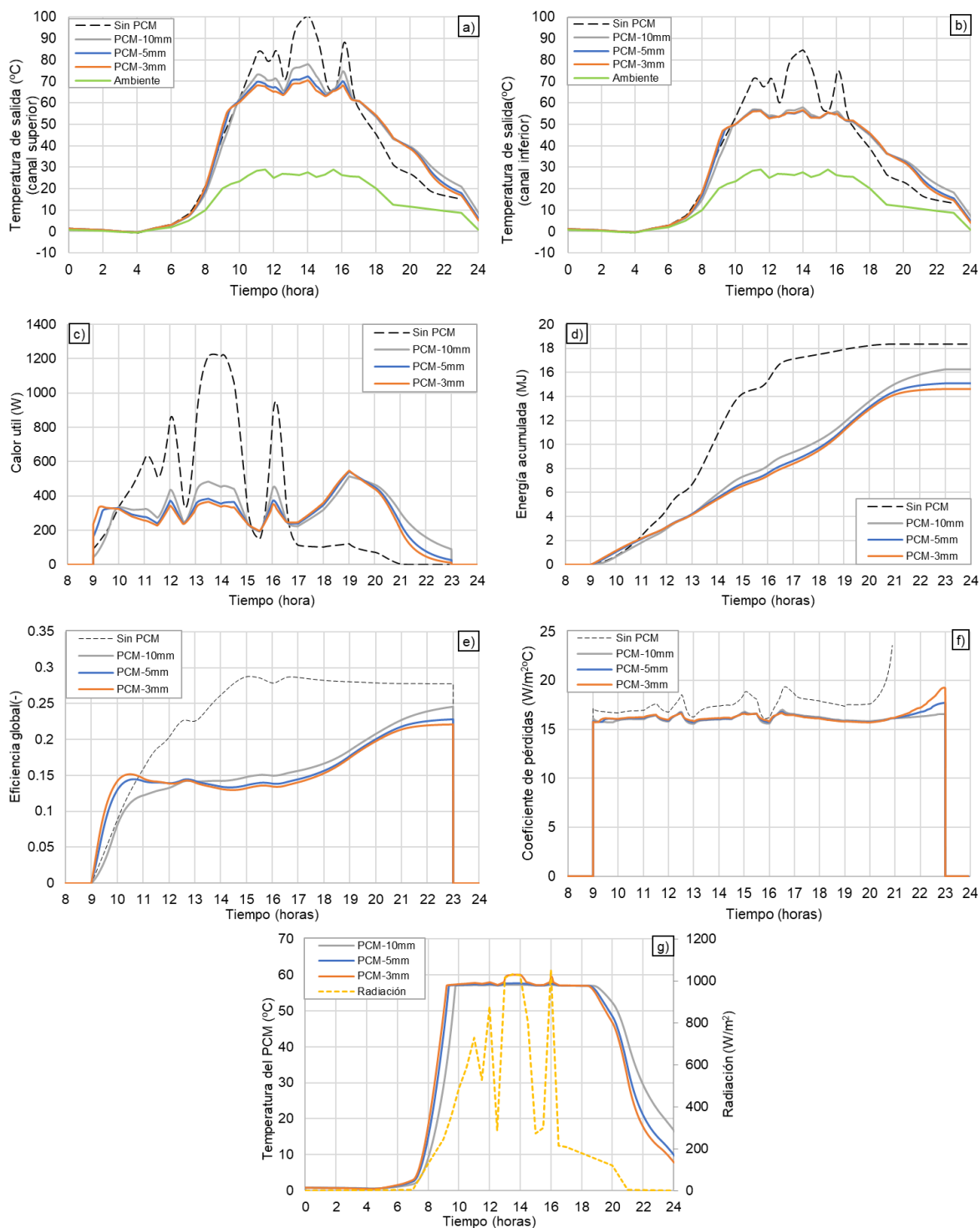


Gráfico 7.11. Resultados obtenidos para el 06-04-2021 cuando el equipo no tiene PCM y para tres espesores distintos de parafina. a) Temperatura de salida del aire del canal superior, b) Temperatura de salida del aire del canal inferior, c) Calor útil a lo largo del tiempo de funcionamiento del colector, d) Energía acumulada a lo largo del tiempo de funcionamiento, e) Eficiencia global instantánea, f) Coeficiente global de pérdidas y g) Evolución de la temperatura de la capa de parafina y radiación en función del tiempo.

caso sin PCM de 101 °C y 85 °C respectivamente. Cuando se incorpora parafina las temperaturas máximas para ambos canales disminuyen manteniéndose sin embargo temperaturas por encima del caso base a partir de aproximadamente las 17 horas tendiéndose a homogeneizar a partir de dicho momento para los tres casos. Aquí nuevamente se observa que para el canal inferior la influencia del espesor sobre las temperaturas del aire es despreciable.

En el gráfico 7.11 – c, se puede ver que el calor útil máximo entregado para el caso base es de 1226 W cayendo dicho pico a potencias de 515 W para los 10 mm, 545 W para los 5 mm y 548 W para los 3 mm, es decir en promedio alrededor del 44%. Sin embargo, se observa nuevamente que, aunque caen los picos, la inercia térmica general del sistema aumenta a medida que se agrega PCM siendo la misma mayor cuando mayor es el espesor de la capa de parafina. Es por esto que es posible ver que cuando la radiación disminuye abruptamente a partir de las 17 horas, el calor útil entregado por el sistema sin parafina cae también de manera brusca, a diferencia que cuando incorporamos parafina donde el fenómeno se da de manera inversa, cae la radiación y comienza a aumentar el calor útil entregado al comenzar la capa de PCM a ceder al aire en circulación el calor acumulado hasta dicho punto.

Durante este día, el cual nuevamente no fue un día claro, la energía fue mayor para el caso base que para el caso con parafina, siendo importante remarcar que la energía acumulada calculada es en función de las diferencias de temperatura registradas para el aire de salida. Cuando incorporamos parafina disminuimos dicha diferencia por lo que los cálculos tanto de energía acumulada en MJ y de eficiencia global (ver gráfico 7.11 – e) muestran valores menores cuando incorporamos parafina que cuando no. Lo anterior remarca hasta aquí que la importancia de evaluar la incorporación de materiales de fase en equipos con aplicación de secado solar, tiene que ver con la mejora de las propiedades psicrométricas del aire y el aumento general de la inercia térmica del sistema durante mayor tiempo.

En el gráfico 7.11 – f se encuentra nuevamente el coeficiente global de pérdidas, de igual manera que para el primer día analizado, los valores generales de dicho coeficiente mejoran cuando incorporamos parafina, al disminuir gracias a dicha incorporación las pérdidas de calor hacia el ambiente. Finalmente se muestra para este día, en el gráfico 7.11 – g, la variación de la temperatura de la capa de PCM. Aquí es posible ver como las tres capas aumenta de temperatura hasta alcanzar una meseta, la cual determina que las mismas han comenzado a cambiar su estado de sólido a líquido, solo para el caso donde el espesor es de 3 mm y para el caso de 5 mm se observan que la capa aumenta su temperatura por momentos levemente por encima de dicha meseta, es decir que dichas capas han logrado su cambio de fase totalmente continuando con su aumento de temperatura, se observa que dichos momentos se condicen a su vez con los valores más altos de radiación.

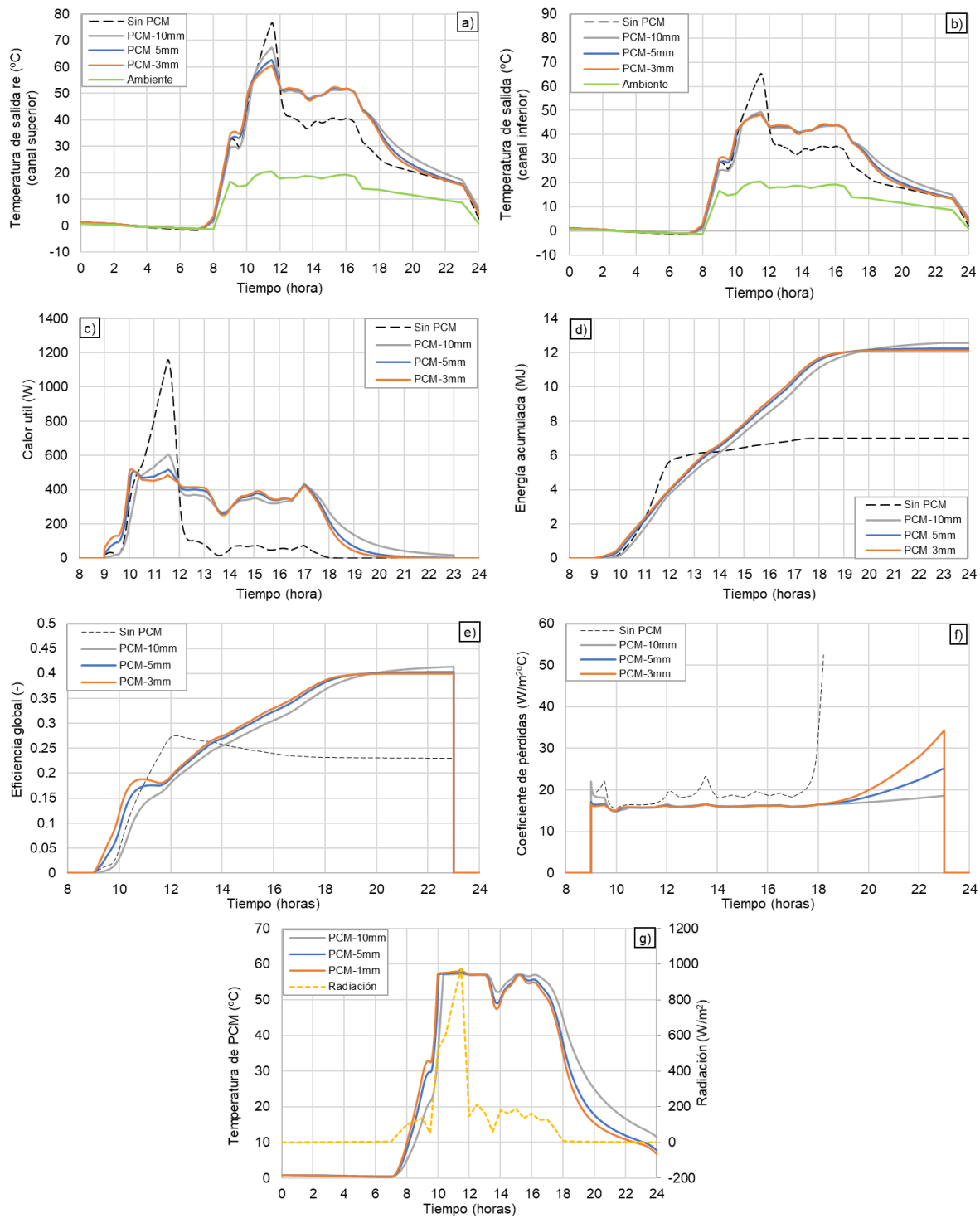


Gráfico 7.12. Resultados obtenidos para el 12-04-2021 cuando el equipo no tiene PCM y para tres espesores distintos de parafina. a) Temperatura de salida del aire del canal superior, b) Temperatura de salida del aire del canal inferior, c) Calor útil a lo largo del tiempo de funcionamiento del colector, d) Energía acumulada a lo largo del tiempo de funcionamiento, e) Eficiencia global instantánea, f) Coeficiente global de pérdidas y g) Evolución de la temperatura de la capa de parafina y radiación en función del tiempo.

En el gráfico 7.12 se muestran los resultados obtenidos para el día 12 de abril, el cual es interesante puesto que, aunque el mismo es un día bastante malo considerando que se manifestó nublado casi en su totalidad a excepción de un pico de radiación entre las 10 y 12 horas, casi al mediodía solar, mostró sin embargo a diferencia de los primeros días analizados mejoras respecto al caso base en los valores de energía acumulada y eficiencia global.

El comportamiento de las temperaturas del aire analizadas en los gráficos 7.12 a y b son similares a los vistos hasta acá, cuando la radiación es buena, las temperaturas entregadas para el caso base son mayores que para los casos con parafina, cuando la radiación cae, esta situación se revierte manteniéndose temperaturas entre los 50 y 60 °C para el canal superior y entre 40 y 50 °C para el canal inferior por aproximadamente 2 horas más no siendo las diferencias entre los distintos espesores considerables en el canal inferior.

El pico en el calor útil de 1160 W para el caso base cae en un 47 % en promedio cuando incorporamos las diferentes capas de parafina, sin embargo la inercia térmica aumenta a tal punto que en este día particular donde la franja con radiación óptima es tan corta, al no tenerse parafina, el funcionamiento real del equipo es de solo 2 horas, a diferencia de cuando le incorporamos materiales de cambio de fase, pasando ahora el colector a entregar calor útil entre 200 a 400 W por aproximadamente 4 horas más. En el gráfico 7.12 – d es posible ver que la energía acumulada con parafina es casi el doble que cuando el equipo no tiene PCM pues la cantidad incidente de radiación sobre el sistema se da durante un breve tiempo, la parafina permite aprovechar mientras hay radiación de mejor manera la energía que incide, acumulando justamente parte de la misma para horas posteriores donde la eficiencia aumenta por encima del caso base, ver gráfico 7.12 – e y el coeficiente global de pérdidas disminuye respecto al mismo (gráfico 7.12 – f).

El gráfico 7.12 – g el cual muestra la evolución de la temperatura de la parafina en contraste a la radiación muestra una vez más como, si bien la incorporación de PCM aumenta la inercia térmica general del sistema, la temperatura de las parafinas evoluciona acorde al recurso solar. En este día ningún espesor logra pasar la temperatura por encima del punto de cambio de fase cayendo las temperaturas de las mismas cuando se observa que hay un pico mínimo de la radiación.

Finalmente se analizó el día 15 de abril en el gráfico 7.13, el que quizás fue el mejor día en cuanto a las condiciones de radiación, nublándose justo al final. Se observa para dicho día, en términos generales, el mismo comportamiento analizado para los primeros dos, donde se ve en el gráfico 7.13 - a y b el comportamiento de las temperaturas de la misma forma que el visto anteriormente, la caída de la energía acumulada y eficiencia respecto al caso base en el gráfico 7.13 - e y f respectivamente.

La disminución en el pico del calor útil se da para este día en un 37%, gráfico 7.13 – c, observándose nuevamente como una vez que cae la radiación, cuando se tiene parafina se extiende el tiempo de entrega de calor útil. El coeficiente de pérdidas, similar para los tres espesores, mejora respecto al caso base, gráfico 7.13 – g.

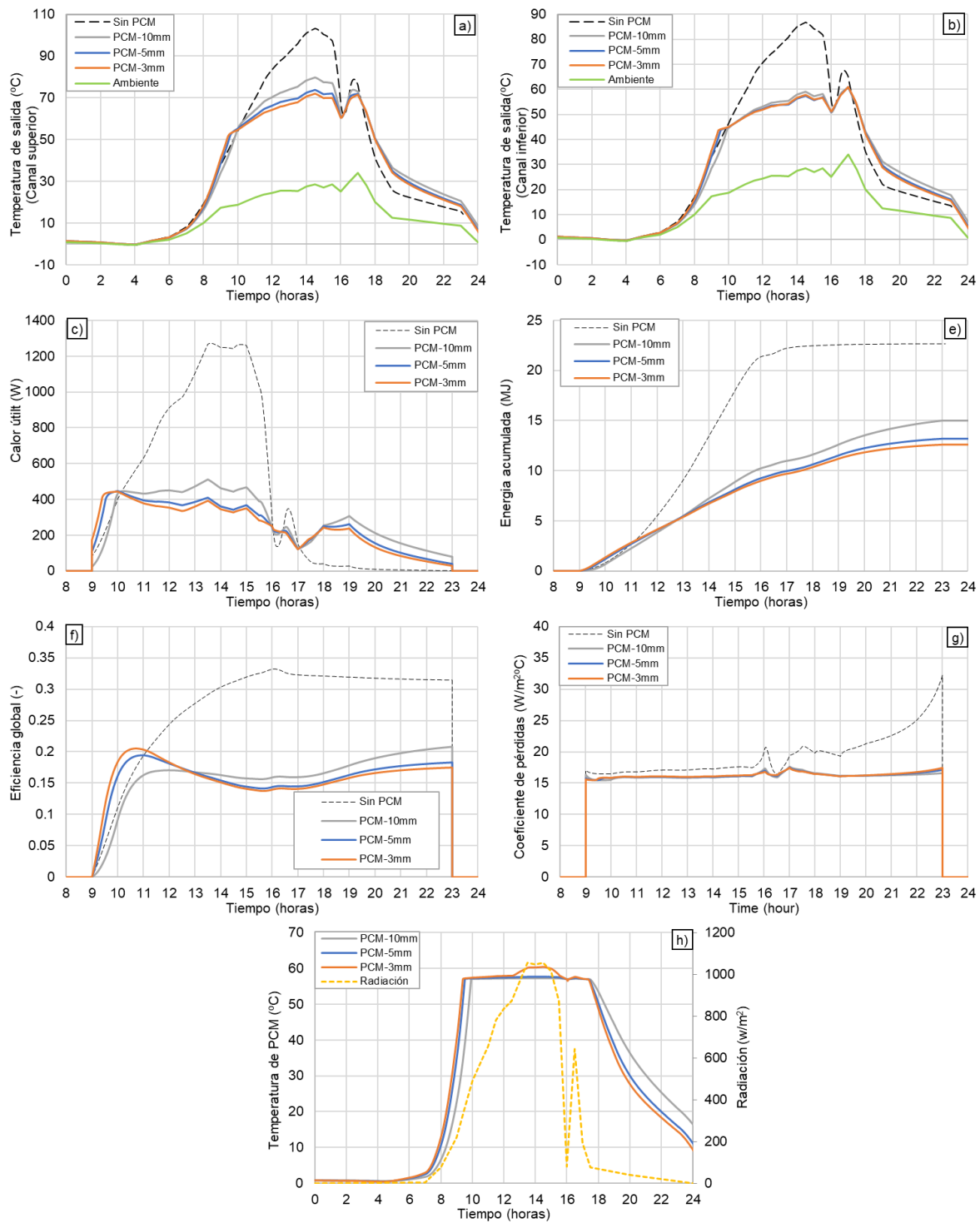


Gráfico 7.13. Resultados obtenidos para el 15-04-2021 cuando el equipo no tiene PCM y para tres espesores distintos de parafina. a) Temperatura de salida del aire del canal superior, b) Temperatura de salida del aire del canal inferior, c) Calor útil a lo largo del tiempo de funcionamiento del colector, d) Energía acumulada a lo largo del tiempo de funcionamiento, e) Eficiencia global instantánea, f) Coeficiente global de pérdidas y g) Evolución de la temperatura de la capa de parafina y radiación en función del tiempo.

Por último, la evolución de la temperatura de la parafina graficada en el gráfico 6.13 – h, permite ver que en este día donde el recurso solar fue mejor que para los otros tres, se observa de manera más notable un aumento en la temperatura para la capa de 3 mm de espesor más allá del punto de cambio de estado.

7.4. Modelación matemática y validación de la cámara de secado sin carga

La modelación numérica de la cámara de secado fue realizada en un archivo .dia (extensión del programa Simusol) de manera separada al colector solar. Esto independizó ambos modelos, permitiendo en un futuro acoplar la simulación de la cámara a otros tipos de colectores y viceversa, pero a su vez, optimizar los recursos de procesamiento del hardware, pudiendo en consecuencia construir los modelos con un mayor nivel de complejidad y precisión.

El modelo térmico de la cámara se construyó de forma tal que los datos de salida de la simulación del colector solar: caudal másico entregado y temperatura del aire de salida; son utilizados como datos de entrada. A su vez, los parámetros ambientales: radiación solar, velocidad del viento exterior y temperatura ambiente son los mismos en ambas simulaciones.

Para la validación del modelo de la cámara, se realizó en primera instancia la modelación y simulación de la misma sin carga de producto. En esta etapa se procedió a utilizar los días 21, 22, 28 de octubre y 15 de noviembre, ya analizados previamente en el apartado 5.4.2., realizándose en consecuencia, primero la simulación del colector solar de forma tal de generar los valores de entrada para la cámara. Si bien el modelo del colector ya fue validado, se corroboró el nivel de ajuste de los datos arrojados por la simulación, ver gráfico 7.14, con los medidos para dichos días, de forma tal que los datos utilizados posteriormente para la validación de la cámara sean lo más certeros posibles.

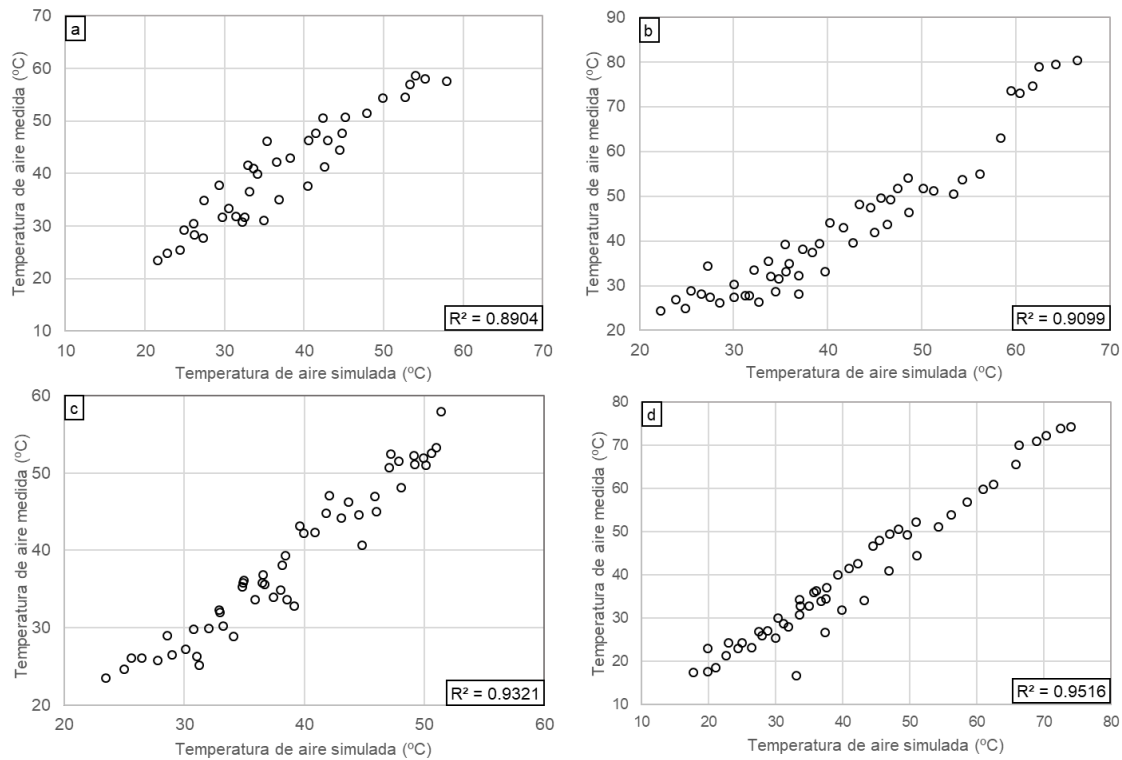


Gráfico 7.14. Comparación entre las temperaturas del aire de salida medidas experimentalmente y las obtenidas mediante simulación del colector solar para los días empleados en la validación de la cámara. a) 21 de Octubre b) 22 de Octubre c) 28 de Octubre y d) 15 de Noviembre

El aire caliente proveniente del colector solar ingresa a la cámara de secado por el sector inferior de la misma. Al ser de menor densidad en comparación con las condiciones atmosféricas, este aire se eleva y fluye a través de la cámara de secado, abandonando la misma por la chimenea tubular ubicada en la parte superior. Cabe aclarar que los flujos másicos de aire provenientes del sistema de colección solar (de dos canales) se unen en la salida del mismo antes de ingresar a la cámara, ver figura 7.8. En esta instancia de simulación, la energía térmica disponible en el aire en circulación, se transfiere hacia las paredes internas de la cámara abandonando el resto el recinto mediante el caudal másico a través de la chimenea. No obstante, el flujo de calor puede suceder en sentido inverso, es decir, desde las paredes de la cámara y chimenea hacia el aire interior. Este último caso es más probable de suceder en la chimenea, al incidir la radiación solar sobre ésta no estando la misma aislada térmicamente.

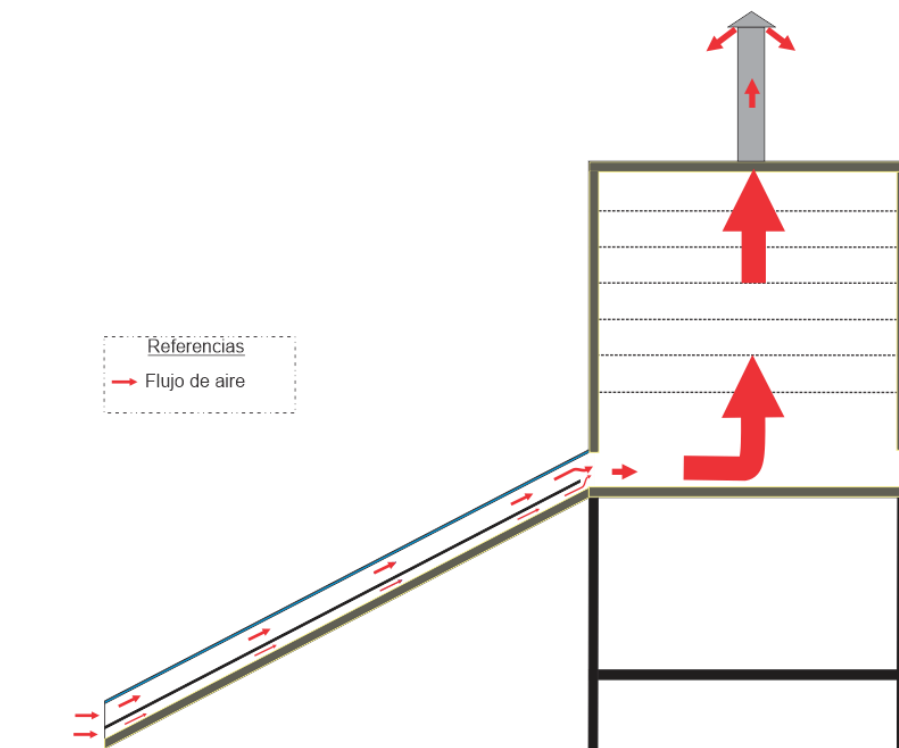


Figura 7.8. Dirección del flujo de aire en el equipo de secado.

Los materiales constructivos empleados en la cámara se encuentran detallados en la sección 5.3.2. cuyas propiedades térmicas asumidas en la simulación se detallan en la tabla 7.6.

Tabla 7.6. Propiedades de los materiales.

Propiedad	Carcaza exterior/ chimenea	Aislación	Carcaza interior
Densidad ρ (kg/m ³)	7,850	30	-
Conductividad λ (W/m °C)	-	0,04	-
Absortividad α (-)	-	-	-
Transmitancia τ (-)	-	-	-
Emisividad ε (-)	0,54	-	0,35

7.4.1. Hipótesis de modelización de la cámara vacía

Con el fin de optimizar el recurso de cálculo computacional, así como también obtener un modelo simplificado de fácil parametrización en cuanto a magnitudes físicas posibles de ser medidas, se consideraron las siguientes hipótesis de simulación:

- Las propiedades psicrométricas del aire no son consideradas en esta instancia de simulación.
- Debido a las dimensiones de la cámara, la masa de aire interior es representada físicamente mediante un único nodo térmico.

- Los flujos de calor son unidireccionales y en dos dimensiones.
- Los esfuerzos de corte producidos por la circulación del aire no se tuvieron en cuenta dado la baja velocidad con la que se desarrollan los fenómenos convectivos.
- No se consideran los vórtices y torbellinos que podrían originarse en cambios de secciones, esquinas, obstrucciones y accesorios dentro de la cámara.
- El régimen turbulento, laminar o transitivo se determina mediante el coeficiente adimensional de Rayleigh.
- La temperatura de las paredes se considera uniforme en toda la superficie de intercambio térmico.
- No se tuvieron en cuenta las pérdidas de aire e infiltraciones hacia/desde el exterior.
- Los materiales empleados son de composición homogénea, así como se desestimaron las rugosidades superficiales.
- El efecto conductivo de la carcasa metálica exterior y de la chimenea no se tuvo en cuenta debido al bajo espesor del material.
- Se omitieron los efectos de presurización/despresurización debido al viento externo, por lo que se mantiene la condición de circulación natural o semi forzada por el efecto chimenea.

7.4.2. Modelo físico y matemático de la cámara vacía.

Se partió de la simulación previa del colector solar realizada en un archivo .dia separado, cuyo modelo y su validación experimental se describió en la sección 7.1. El aire de entrada se representa mediante un nodo denominado “col”, ver figura 7.9, acoplado a una fuente de temperatura la cual es definida mediante una tabla, en la que se vuelcan como datos de entrada, los valores de temperatura obtenidos de la simulación del modelo del colector. Se introducen a su vez, también como datos de entrada y definidos en tablas, los valores de flujo másico de aire, también obtenidos mediante la previa simulación del colector.

Asumiendo que el caudal másico es constante a lo largo de su recorrido hasta abandonar la chimenea, su temperatura disminuye conforme entrega energía térmica hacia el entorno. Los mecanismos de transferencia de calor son principalmente convectivos en el interior, convectivos/radiativos en el exterior, y conductivos en la capa aislante.

El modelo plantea dos nodos puntuales de temperatura de aire: uno correspondiente a la cámara y el otro a la chimenea de salida. Para determinar la temperatura instantánea de la cámara, se establece el balance energético según la ecuación 7.25. De igual manera se procede para la temperatura en el interior de la chimenea mediante la aplicación de la ecuación 7.26.

Referencias:

-  Radiatividades
-  Convectividades
-  Conductividades
-  Flujo Másico
-  Ganancia Solar

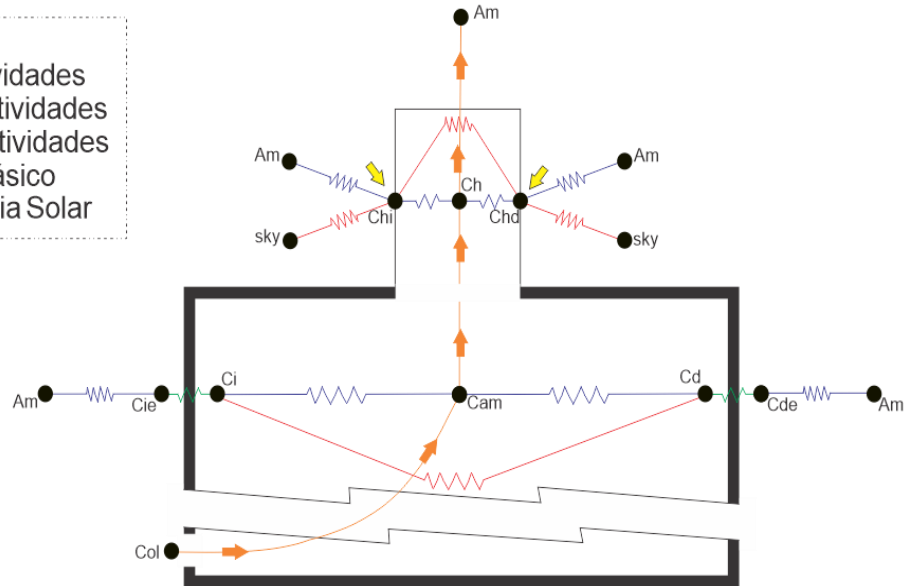


Figura 7.9. Nodos térmicos y flujos de intercambio energético en el modelo de la cámara vacía.

$$m_{mp} C_{pai} \frac{\partial T_{cam}}{\partial t} = h_{cd} A_{cd} (T_{cd} - T_{cam}) + h_{ci} A_{ci} (T_{ci} - T_{cam}) + \dot{m}_{ai} C_{pai} (T_{col} - T_{cam}) + \dot{m}_{ai} C_{pai} (T_{ch} - T_{cam}) \quad \text{Ecuación 7.25}$$

$$\quad \text{Ecuación 7.26}$$

De manera general, los coeficientes convectivos se obtienen a partir de la determinación del número de Nusselt, según la ecuación 7.27.

$$h_i = \frac{N_u k_{ai}}{D_h} \quad \text{Ecuación 7.27}$$

Dónde:

N_u : Es el número de Nusselt.

D_H : Corresponde al diámetro hidráulico del recinto considerado y que, para una sección tubular como lo es la chimenea, coincide con el diámetro geométrico;

k_{ai} : Es la conductividad térmica del aire.

Para el tratamiento del número de Nusselt, se consideró que el tipo de mecanismo por el cual se produce la circulación de aire es del tipo natural (Mealla y Morales, 2018), por lo que N_u se determina mediante la ecuación 7.28.

$$N_u = 0.68 + 0.51 R_a^{1/4} \quad \text{Ecuación 7.28}$$

Dónde:

R_a : Es el número de Rayleigh, estimado según la ecuación 7.29.

$$R_a = \frac{g D_H^2 C_{pai} \beta L^3 (T - T_\infty)}{\nu k_{ai}}$$

Ecuación 7.29

Para la determinación de los flujos de energía térmica entre la envolvente exterior (cámara y chimenea) y el medio ambiente/cielo, se emplearon las ecuaciones clásicas de la transferencia de calor (Duffie y Beckman, 2013; Bergman et al., 2011), principalmente convectivas y radiativas, como así las ecuaciones que establecen el flujo de calor por conducción a través de las paredes de la cámara (material aislante).

7.4.3. Validación experimental de la cámara sin carga.

Se realizó la simulación de la cámara sin carga empleando como entrada los datos de temperatura del aire de salida y caudal másico de la simulación del colector. Se contrastó el perfil de temperaturas simuladas para el nodo T_{cam} con aquellas medidas para los días 21, 22, 28 de octubre y 15 de noviembre, ver gráfico 7.15., obteniéndose para todos los días niveles de correlación significativas.

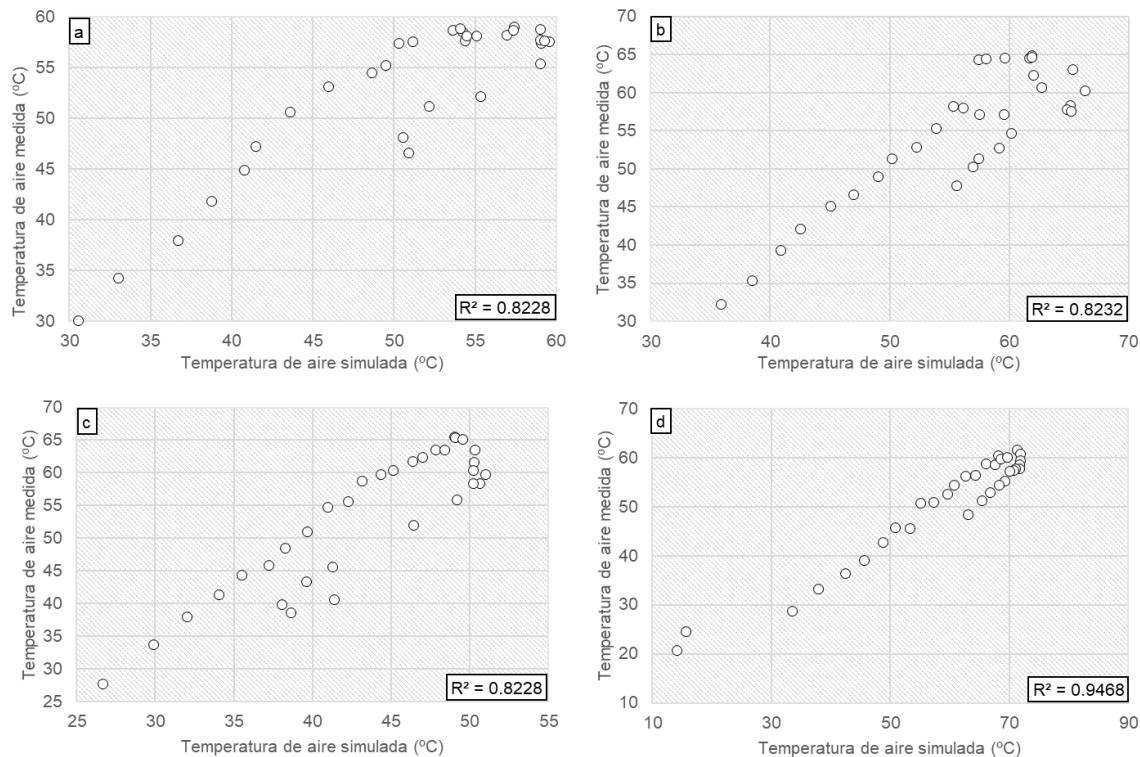


Gráfico 7.15. Comparación entre las temperaturas del aire medidas en la cámara cuando esta se encontró vacía y las obtenidas mediante la simulación del modelo de la cámara para los días: a) 21 de Octubre b) 22 de Octubre c) 28 de Octubre y d) 15 de Noviembre.

Se determinaron en la tabla 7.7, diferentes parámetros estadísticos para las relaciones de correlación estudiadas mediante el empleo de Infostat, siendo para todos los días el p-valor menor a 0.005 lo cual respalda la existencia de relaciones estadísticamente significativas entre los valores

medidos y simulados. Se determinó a su vez el error estándar (σ_x), estadístico utilizado para la construcción de límites de predicción al indicar la desviación estándar de los residuos, así como el error absoluto medio (ϵ) el cual es el promedio de los residuos.

Tabla 7.7. Parámetros estadísticos del proceso de validación del modelo computacional.

Día	R ² (%)	p-valor	σ_x (°C)	ϵ (°C)
21 de Octubre	82.28	0.0000	3.35	2.83
22 de Octubre	82.32	0.0000	4.22	3.47
28 de Octubre	82.28	0.0000	4.50	3.86
15 de Noviembre	94.68	0.0000	2.58	2.24

7.5. Modelación matemática y validación de la cámara de secado con carga.

El modelo termo-físico de la cámara con carga se realizó incorporando producto al modelo de cámara vacía expuesto y validado en la sección anterior. En esta nueva instancia de simulación, los diferentes mecanismos de transferencia de calor se ven modificados, debido a que parte de la energía térmica contenida en el aire en circulación es absorbida por el producto el cual en consecuencia libera agua en forma de vapor. Desde el punto vista energético, ocurre la circulación de aire seco en simultáneo con la migración de vapor de agua desde el producto hacia la cámara y posteriormente al ambiente. Se incorporan entonces al modelo de cámara vacía los circuitos de vapor según la figura 7.10.

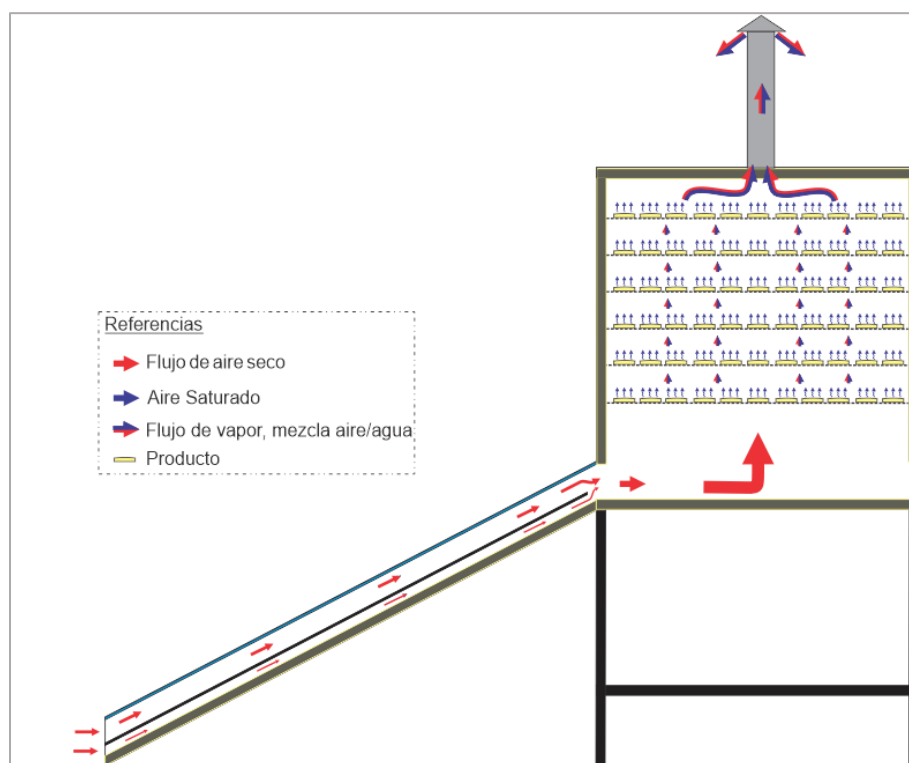


Figura 7.10. Flujo de aire en el modelo completo de simulación.

7.5.1. Hipótesis de modelación

De igual forma que en la sección anterior, y con el fin de optimizar el recurso computacional y obtener un modelo simplificado, se tuvieron en cuenta las siguientes hipótesis de simulación.

- Se consideraron las propiedades psicrométricas del aire.
- Debido a las dimensiones de la cámara, tanto la masa de aire interior como la del producto a secar, son representadas físicamente mediante un único nodo térmico para cada una.
- Los flujos de calor son unidireccionales y en una dimensión.
- Los esfuerzos de corte producidos por la circulación de la mezcla aire/vapor no se tuvieron en cuenta dado la baja velocidad con la que se desarrollan los fenómenos convectivos.
- No se consideran los vórtices y torbellinos que podrían originarse en cambios de secciones, esquinas, obstrucciones y accesorios dentro de la cámara.
- El régimen turbulento, laminar o transitivo se determina mediante el coeficiente adimensional de Rayleigh.
- La temperatura de las paredes se consideró uniforme en toda la superficie de intercambio térmico.
- No se tuvieron en cuenta las pérdidas de aire e infiltraciones hacia/desde el exterior.
- Los materiales empleados son de composición homogénea, así como se desestimaron las rugosidades superficiales.
- El efecto conductivo de la carcasa metálica exterior y de la chimenea no se tuvo en cuenta debido al bajo espesor del material.
- Se omitieron los efectos de presurización/despresurización debido al viento externo, por lo que se mantiene la condición de circulación natural o semi forzada por el efecto chimenea.
- El producto en cámara se considera homogéneo en composición, cómo así de geometría invariable.
- La pérdida de vapor del producto se realiza desde la superficie del mismo, en la cual el aire en contacto se encuentra en condiciones de saturación a la temperatura del producto.

7.5.2. Modelo térmico

En la figura 7.11, el aire de entrada es representado mediante el nodo denominado “col”. Este aire entrega su energía a la cámara, tal como lo hace cuando la misma está vacía. En un circuito paralelo, se tiene el nodo “Tp” que representa la temperatura del producto, asociado a su masa “mp”. A partir de este nodo se plantean dos corrientes energéticas: una correspondiente a la convección entre la superficie expuesta del producto y la cámara de secado, y la otra correspondiente a la migración de vapor hacia el recinto. El balance energético en el nodo “Tp” está dado por la ecuación 7.30.

$$(C_{ps} + C_{pa} X) M_s \frac{\partial T_p}{\partial t} = h_{fg} M_s \frac{\partial X}{\partial t} + A_t h_c (T_{cam} - T_p) \quad \text{Ecuación 7.30}$$

Referencias:

-  Radiatividades
-  Convectividades
-  Conductividades
-  Flujo Másico
-  Ganancia Solar
-  Flujo de vapor

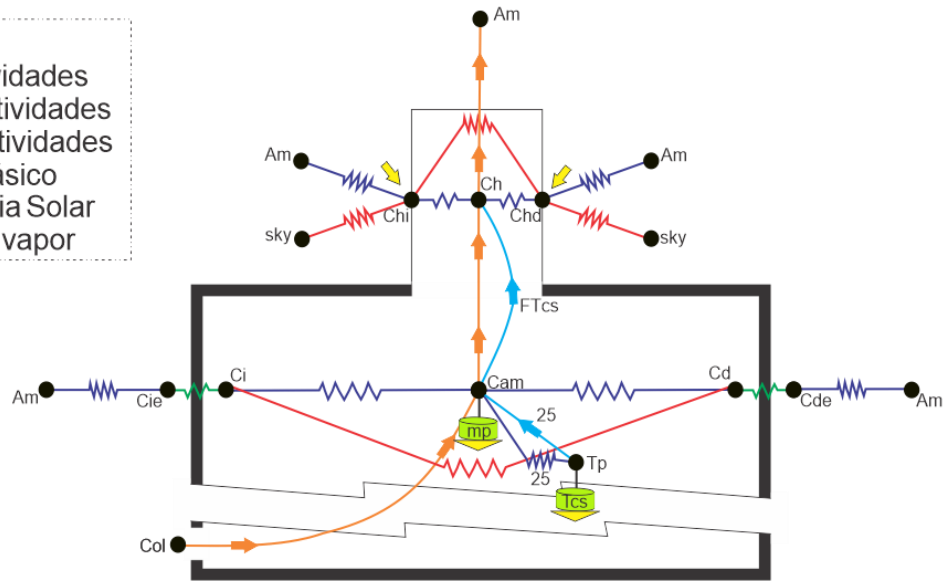


Figura 7.11. Nodos térmicos y flujos de intercambio energético en el modelo de la cámara con producto.

El término del primer miembro corresponde a la potencia térmica necesaria para el cambio de temperatura del producto (calor sensible), y en consecuencia la energía que se almacena en el mismo, siendo C_{ps} el calor específico de la masa seca y C_{pa} el calor específico del agua líquida, X es la humedad en base seca del producto como función del tiempo, h_{fg} calor de cambio de fase del agua, M_s masa seca del producto, A_T área total del producto, h_c coeficiente convectivo entre el producto y el aire de la cámara.

El comportamiento higroscópico del producto se plantea según la metodología propuesta en Saravia Mathon (2010), en la cual se determinó la velocidad de secado de forma experimental, obteniendo así el coeficiente convectivo del producto h_c y el coeficiente de difusión h_d del agua a través de la superficie del producto A_T , banana en este caso. Según estos autores, la velocidad de secado de los trozos de banana es función de h_d y de la diferencia entre las humedades absolutas de saturación del producto (en su superficie) y de la cámara de secado, como muestra la ecuación 7.31.

$$v_s = h_d A_T (W_s - W_c) \quad \text{Ecuación 7.31}$$

La humedad absoluta de saturación del producto W_s es función de la presión de saturación p_s del aire circundante en la superficie del producto, y esta presión depende de la temperatura de saturación, considerada como la del producto. De forma general, las ecuaciones 7.32, 7.33 y 7.34 determinan las magnitudes de interés en lo que respecta a presión de saturación y humedad absoluta Saravia Mathon (2010).

$$p_s = 610.7 \cdot 10^{\left(\frac{7.5 T}{273.12 + T}\right)} \quad \text{Ecuación 7.32}$$

$$W_s = \frac{0.622 p_s}{p_a - p_s} \quad \text{Ecuación 7.33}$$

$$W = H_r W_s \quad \text{Ecuación 7.34}$$

Dónde:

P_a : Es la presión atmosférica a la altura de referencia

H_r : Es la humedad relativa.

W : Es la humedad absoluta de una mezcla aire-vapor.

La determinación de los coeficientes h_c y h_d se realizó de manera experimental, siguiendo la metodología propuesta por Saravia Mathon (2010). Se utilizaron los datos medidos durante el proceso de secado de banana (ver sección 5.4.4). Se calcularon los valores de humedad en base seca X los cuales fueron ajustados a los valores obtenidos por Saravia Mathon (2010) mediante el empleo de una regresión del tipo potencial, ver gráfico 7.16. La expresión obtenida mediante dicho ajuste fue empleada posteriormente para el cálculo del coeficiente de difusión h_d según la ecuación 7.35 obtenida a partir del trabajo algebraico de la ecuación 7.31.

$$h_d A_T = \frac{v_s}{(W_{ps} - W_c)} \quad \text{Ecuación 7.35}$$

Dónde:

W_{ps} : Es la humedad absoluta del aire en la superficie del producto bajo la hipótesis de que este aire se encuentra a la temperatura del producto.

W_c : Es la humedad absoluta del aire interior de la cámara de secado, cuyo valor de $W_c=0.011$ se obtiene mediante el empleo de la tabla psicrométrica considerando valores promedios de humedad relativa y temperatura del aire de la cámara.

El gráfico 7.16 muestra los resultados de la medición de X para un secado de tres días consecutivos, en el mismo se omitieron las horas nocturnas, o de no funcionamiento del equipo, a los fines de simplificar la obtención del coeficiente de difusión. La ecuación 7.36 es la regresión para X en función del tiempo obtenida con un $R^2=0.954$.

$$X = 1.73913 \times 1.103^{-t \times 1.58} \quad \text{Ecuación 7.36}$$

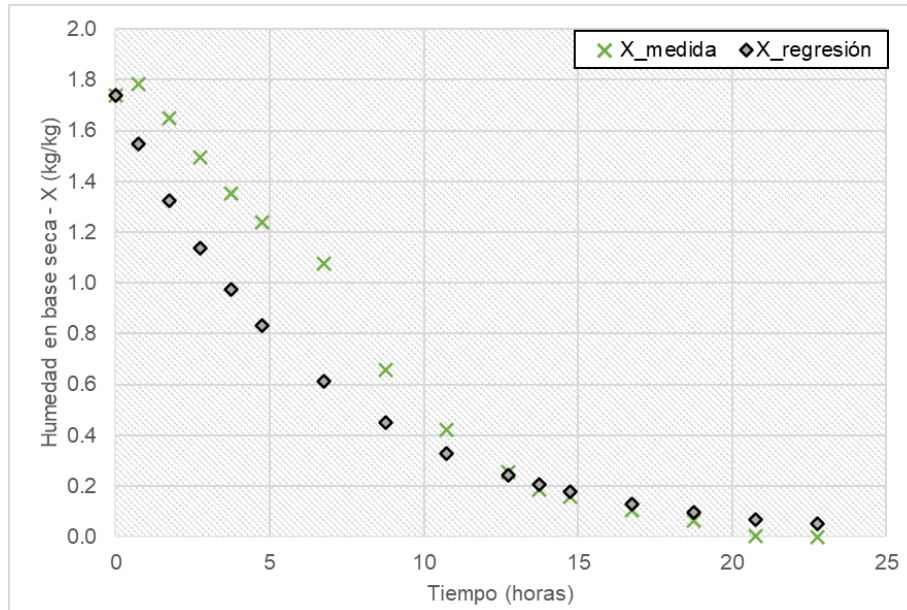


Gráfico 7.16. Comparación entre la curva obtenida a partir de la regresión potencial realizada (rombos negros), con la curva trazada a partir de los valores de humedad en base seca (X) calculados a lo largo del proceso de secado realizado con el secador indirecto desarrollado (cruces verdes).

Se procedió a realizar un ajuste similar entre los valores de temperatura de producto medidos durante el secado y los obtenidos en el trabajo de Saravia Mathon (2010), ver gráfico 7.17, obteniéndose la regresión de la ecuación 7.37 con un $R^2=0.93$.

$$T_p = \frac{(A \times t + B)}{t + C} \quad \text{Ecuación 7.37}$$

Dónde:

A, B y C: Son coeficientes de ajustes cuyos valores son 57, 25 y 1.388 respectivamente.

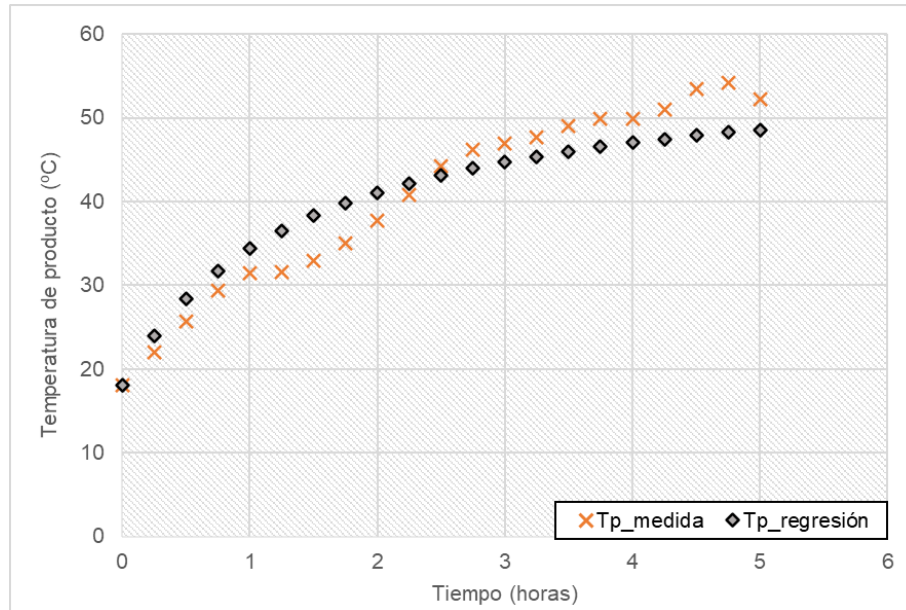


Gráfico 7.17. Comparación entre la temperatura de producto medida (cruces naranjas) y las obtenidas mediante la regresión realizada (rombos negros)

Para obtener la presión de saturación del aire circundante en la superficie del producto se emplea la ecuación 7.32, presión que luego es utilizada en la ecuación 7.33 para la determinación de la humedad absoluta de dicho aire circundante, resultando en las ecuaciones 7.38 y 7.39.

$$p_{sp} = 610.7 * 10^{\left(\frac{7.5 T_p}{273.12 + T_p}\right)} \quad \text{Ecuación 7.38}$$

$$W_{sp} = \frac{0.622 p_{sp}}{p_a - p_{sp}} \quad \text{Ecuación 7.39}$$

El cálculo de $h_d A_T$ (ecuación 7.35) permite determinar los valores del gráfico 7.18.

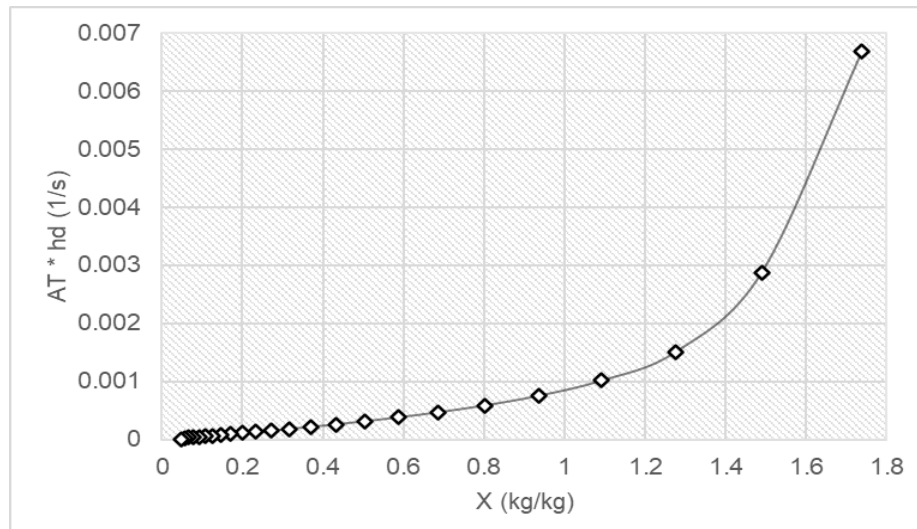


Gráfico 7.18. Valores obtenidos para ahd para su utilización en la simulación

La determinación del producto $A_t h_c$ se realiza mediante la ecuación de balance energético 7.30, para lo cual se requiere obtener las expresiones $\frac{\partial X}{\partial t}$ y $\frac{\partial T_p}{\partial t}$, tomando las regresiones de las ecuaciones 7.36 y 7.37 respectivamente. Los valores obtenidos se observan en el gráfico 7.19.

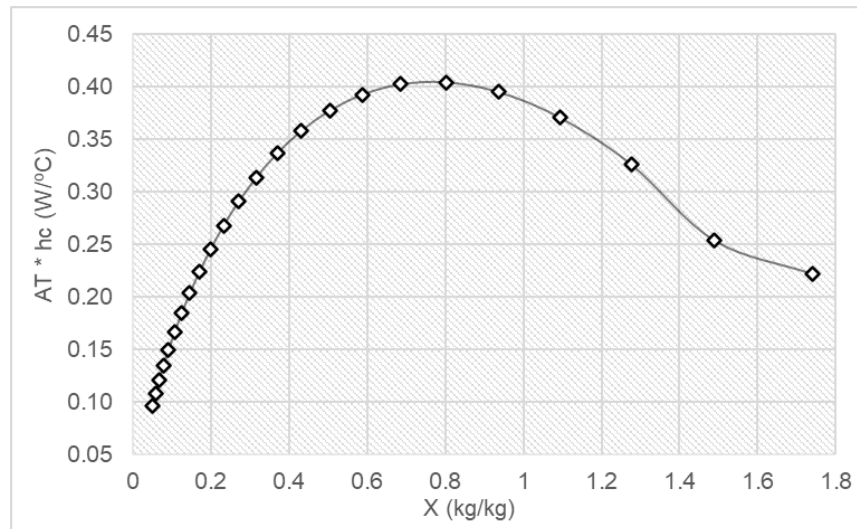


Gráfico 7.19. Valores obtenidos para Ah_c para su utilización en la simulación

Dentro del programa Dia es posible combinar distintos tipos de modelos (físicos, térmicos, mecánicos, entre otros) permitiendo vincularlos en un mismo archivo. Para la simulación aquí planteada, se empleó un circuito de vapor para representar las corrientes energéticas transferidas a través del proceso de evaporación del agua liberada por el producto. En la figura 7.12. se observa el circuito de vapor empleado tomado y adaptado de Saravia Mathon (2010) y Saravia et. al (2007) donde los nodos W_{ce} , W_p y W_{cs} representan los valores de humedades absolutas del aire de entrada, del aire circundante al producto y de la cámara respectivamente. Los símbolos trapezoidales representan fuentes de humedad absoluta, cuyos valores dependen de las respectivas presiones de saturación. Se considera la migración de vapor desde el producto hacia la cámara de secado, representada mediante la resistencia difusiva "120" la cual es dependiente de h_d . El nodo " W_{cs} " se asocia a una masa de vapor de igual denominación y ésta última representa la humedad absoluta del aire contenida en la cámara de secado. Desde la entrada hacia la cámara se tiene el flujo de vapor denominado " FW_{ce} ", seguido del flujo de vapor " FW_{cs} " hacia el ambiente exterior o salida de la cámara.

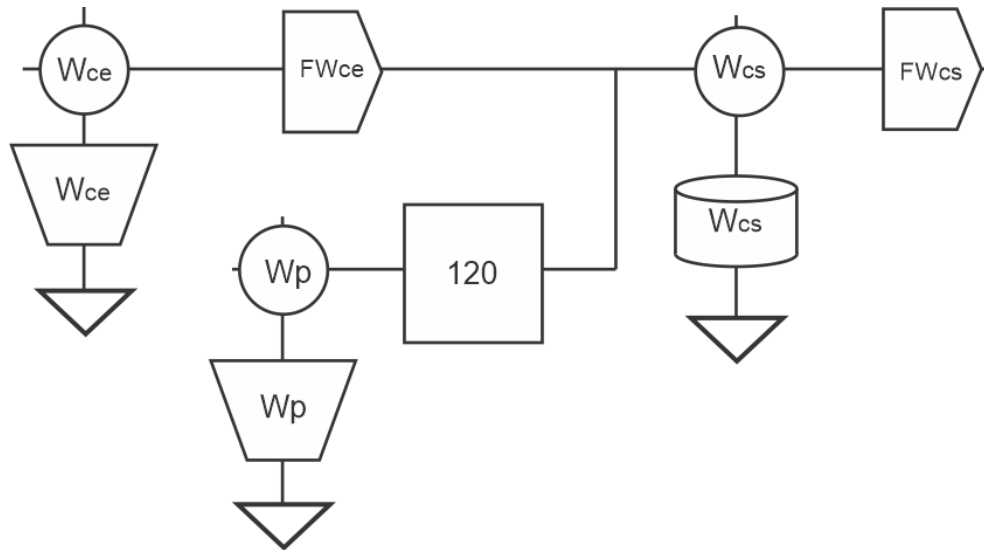


Figura 7.12. Circuito de vapor empleado para la simulación de la cámara con producto, tomado y adaptado de Saravia Mathon (2010) y Saravia et. al (2007).

7.5.3. Validación experimental de la cámara con producto.

Se realizó en última instancia y al igual que para las etapas anteriores, la validación del modelo completo, es decir incluyendo carga de producto. Para ello, se emplearon las mediciones realizadas durante el secado de banana según lo explicado en la sección 5.4.4. Se simuló el equipo colector, de forma tal de obtener los datos de caudal másico y temperatura del aire de salida, los que luego fueron introducidos en la cámara. Al ser una instancia de validación, se corroboró nuevamente un adecuado nivel de ajuste del modelo del colector solar para dichos días, ver gráfico 7.16, entre las temperaturas de salida simuladas y las medidas. Se determinaron a su vez los parámetros estadísticos característicos detallados en la tabla 7.8 donde se observa un p-valor menor a 0.005 determinando la existencia de una relación estadísticamente significativa entre valores medidos y simulados

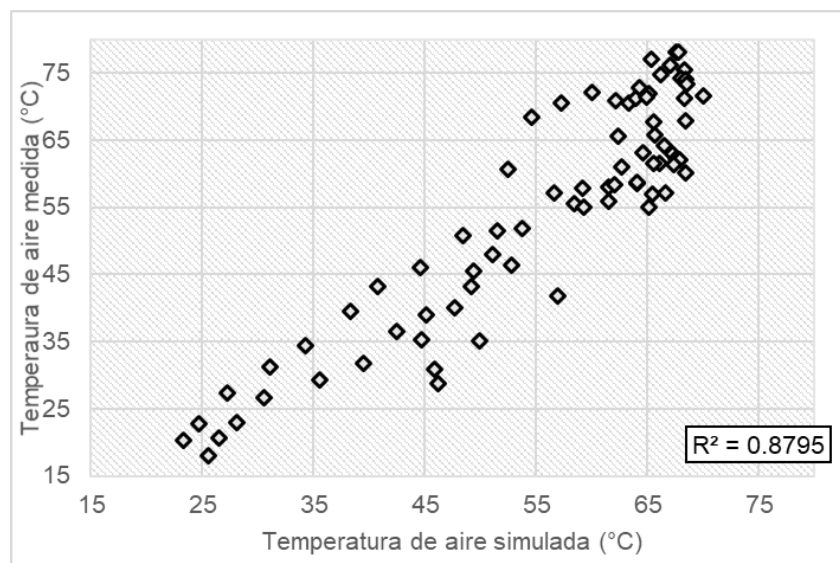


Gráfico 7.16. Ajuste del modelo computacional del colector para los días completos durante los cuales se realizó secado de banana.

Tabla 7.8. Parámetros estadísticos del proceso de validación del modelo computacional del colector para los días de secado de banana.

Día	R^2 (%)	p -valor	σ_x (°C)	ε (°C)
4, 5 y 6 de Mayo	87.95	0.0000	0.1327	0.1038

La validación de la cámara se realizó, por un lado, al igual que para la cámara vacía, mediante la comparación de la evolución de la temperatura medida versus la simulada del aire circundante al producto dentro de la misma, incluyéndose en esta instancia la comparación de la evolución de la temperatura del producto medida frente a la simulada. Debido a que el modelo computacional no contempla estados transitorios, pudiendo estos generar ruido en la simulación, y teniendo en cuenta que el proceso de secado se realizó durante dos días y medio, comenzando el proceso durante el mediodía del 4/5/2022, ya que durante la mañana del mismo se prepararon las bananas para su carga; es que se decidió emplear para la validación experimental solo los días completos de proceso al no lograrse el estado estacionario durante el primer medio día.

En la tabla 7.9 es posible observar los parámetros estadísticos obtenidos tanto para la cámara como para el producto, en ambos casos se obtuvo un p -valor menor a 0.05 determinando la existencia de una relación estadísticamente significativa de tipo logarítmica cuyas ecuaciones de regresión se muestran en el gráfico 7.17 en el cual es posible observar cómo los puntos obtenidos para el día 4 que no fueron considerados (pintados en naranja), se dispersan levemente de la tendencia de regresión obtenida.

Tabla 7.9. Parámetros estadísticos del proceso de validación del modelo computacional de la cámara.

	R^2 (%)	p -valor	σ_x (°C)	ε (°C)
<i>Cámara</i>	88.10	0.0000	2.97	2.42
<i>Producto</i>	85.59	0.0000	3.16	2.61

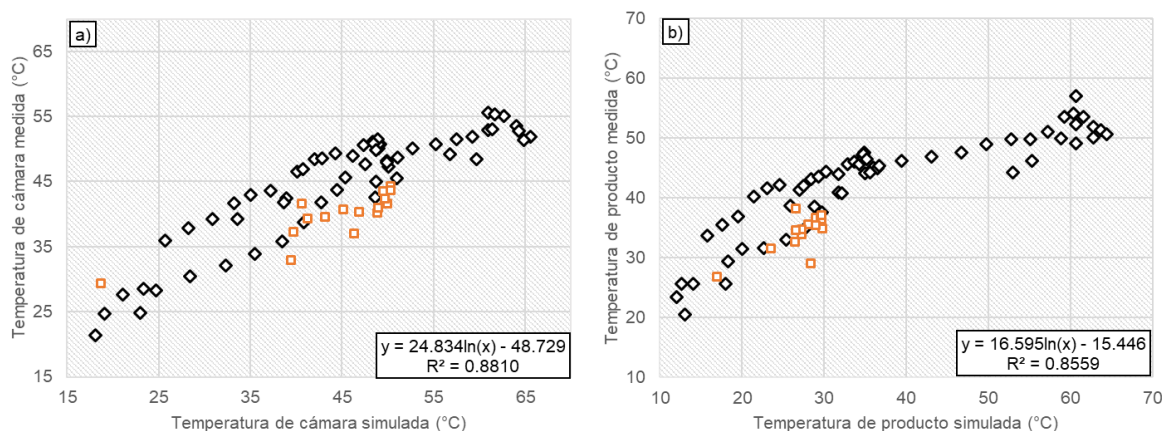


Gráfico 7.17. Validación experimental del modelo de cámara con carga. a) Ajuste temperatura de cámara simulada versus la medida, b) ajuste obtenido entre la temperatura de producto simulada versus medida.

El R^2 de ambos casos puede ser considerado como aceptable, aunque posible de ser mejorado, por un lado, mediante la optimización de los coeficientes Ahd y Ahc y por otro, discretizando la cámara en más de un nodo térmico. El gráfico 7.18 muestra la temperatura del producto medida en función del tiempo en tres puntos distintos dentro de la cámara, *temp. 1* correspondiente a las medidas tomadas en los productos ubicados en la parte inferior de la cámara, *temp. 2* en la zona central de la cámara y *temp. 3* en la bandeja superior. En dicho gráfico es posible observar que, cuando recién comienza el proceso de secado, el gradiente térmico dentro de la cámara es pronunciado, alcanzándose diferencias de casi 10 grados entre el punto más caliente y el más frío, dicha diferencia tiende a disminuir a medida que el proceso avanza, debido a la disminución de agua en evaporación, tendiendo la temperatura a unificarse en toda la cámara. Es por esto que cuando se simula la cámara vacía con un único nodo se obtienen mejores ajustes que cuando la misma está cargada.

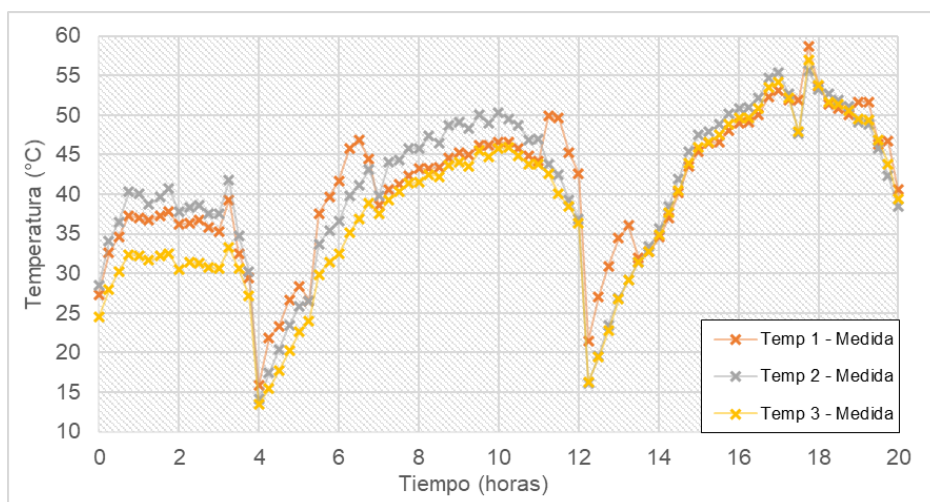


Gráfico 7.18. Evolución de la temperatura del producto en función del tiempo medida en tres puntos diferentes dentro de la cámara de deshidratación.

Se validó a su vez, y de manera separada, el circuito de vapor (figura 7.12) contrastando la evolución del peso del producto medido frente al simulado, de forma tal de determinar la existencia de correlación entre las variables con nivel de ajuste significativo. El gráfico 7.19 – a muestra en consecuencia, la existencia de una relación de tipo lineal con un $R^2=0.9867$ determinando un ajuste casi perfecto, lo cual se puede ver a su vez en el gráfico 7.18 – b, en el cual se encuentran contrastados la evolución del peso en función del tiempo, tanto medida como simulada, observándose un comportamiento casi idéntico entre la simulación y la experimentación.

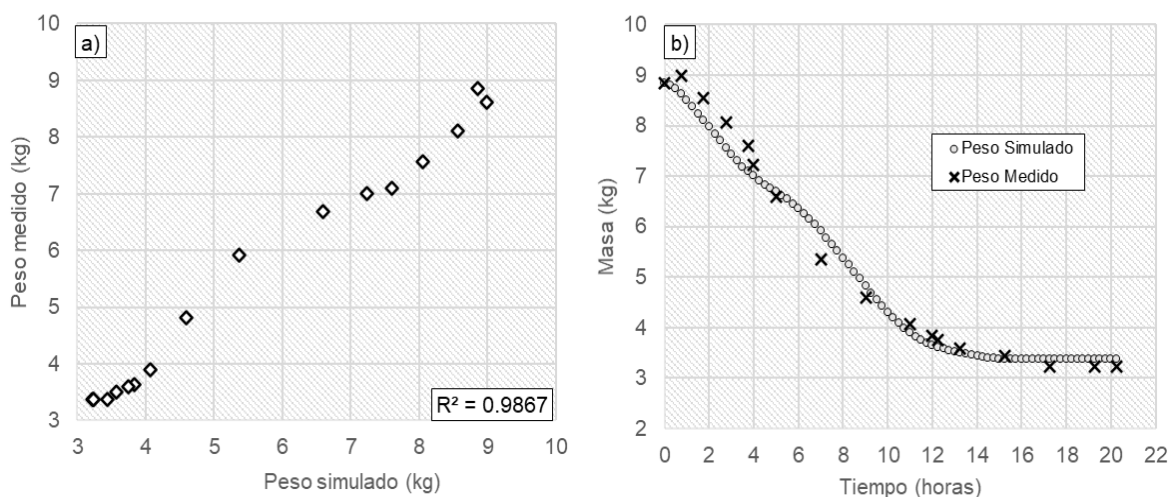


Gráfico 7.19. a) Regresión lineal obtenida entre el peso del producto secado medido experimentalmente, frente al peso simulado. b) Contraste de la masa en kg medida a lo largo del proceso de secado frente a la obtenida mediante la simulación

El modelo térmico-vapor ya validado permite poder evaluar bajo diferentes condiciones ambientales y carga de banana cuanto tiempo insumiría el realizar el proceso de secado de manera completa convirtiéndose en una buena herramienta para la toma de decisiones y diagrama de acciones. Se comparó en consecuencia, y a forma de cierre del presente capítulo, cuanto tiempo requeriría el secar tres cargas diferentes de producto: 4.4 kg, 8.8 kg y 17.7 kg bajo dos condiciones de día diferente, óptimo y nublado, ver tabla 7.10.

Tabla 7.10. Comparación de cargas realizadas para tres masas iniciales diferentes de banana y cuatro días de condiciones diferentes.

Día	5/5/2022			22/10/2021			9/2/2022			23/3/2022		
Condición	Óptima			Óptima			Nublado			Nublado		
Masa Inicial (kg de producto)	4.4	8.8	17.6	4.4	8.8	17.6	4.4	8.8	17.6	4.4	8.8	17.6
Masa Final (kg)	1.7	3.4	6.7	1.7	3.4	6.7	1.7	3.4	6.7	1.7	3.4	6.7
Tiempo de secado (horas)	35.8	38.6	60.4	36.2	39	61.5	37.2	40.1	63.4	35.8	38.7	60

<i>Temperatura máx. producto (°C)</i>	63.9	63.6	63.2	66.5	66.4	65.6	72.1	71.8	53.4	76.0	75.7	75.2
<i>Temperatura promedio producto (°C)</i>	30.8	28.9	24.7	33.5	31.4	26.6	33.4	30.4	24.9	36.3	33.4	29.3
<i>Temperatura máx. cámara (°C)</i>	64.6	64.4	63.9	67.7	67.4	66.3	75.1	74.5	63.4	77.1	76.7	76.1
<i>Temperatura promedio cámara (°C)</i>	35.3	33.4	29.1	38.1	36.0	31.1	38.6	35.7	29.9	41.7	39.0	34.4
<i>Energía latente (Mj)</i>	6.5	13.1	26.1	6.5	13.1	26.1	6.5	13.1	26.1	6.5	13.1	26.1

La utilización de modelo para la comparación de carga permitió observar cómo varia el tiempo de secado en función de la carga, tal como se ve en la tabla 7.10, en la cual no se notaron diferencias cuando se secó 4.4 kg y 8.8 kg, a diferencia de cuando se llevó al doble la cantidad de producto (17.6 kg), duplicándose a su vez el tiempo requerido para su secado también al doble. Se fijó de esta manera un tiempo máximo óptimo de secado igual a 40 horas para definir la capacidad máxima en kg de producto húmedo que es posible secar y que permita la obtención de un alimento de calidad para su almacenamiento y comercialización. Se fue modificando en consecuencia, para cada uno de los días estudiados, la cantidad de masa de producto inicial colocado en el equipo, observando cuanto tiempo insume cada una de estas condiciones iniciales de carga. Se determinó finalmente una capacidad final máxima de 12 kg de producto fresco, pudiendo variar la misma levemente en función de las condiciones predominantes del clima durante el proceso de deshidratación.

La comparación de carga permitió por otro lado observar que independientemente de cuanto producto se desee secar, tanto las temperaturas de la cámara como la del producto, no se modifican de manera sustancial, manteniéndose estas siempre en un rango apropiado para la correcta deshidratación.

- CAPITULO 8 -

TRANSFERENCIA TECNOLÓGICA

8.1. Transferencia tecnológica

Como etapa final del presente trabajo de desarrollo tecnológico se realizó la entrega en la localidad de San Ramón de la Nueva Orán, del equipo diseñado y construido, a la agrupación de mujeres “Ypa Yvi”. Debido a que el uso de un secador solar, así como los conceptos relacionados a la aplicación de dicha energía en procesos de conservación de alimentos era algo nuevo al momento de entregarles el equipo, es que se realizó en el marco de la transferencia un taller de capacitación en la temática.

En el transcurso de la misma se realizó una introducción teórica general a lo largo de la cual se presentaron los principios básicos relacionados al secado solar profundizándose en la razón por la cual la deshidratación de alimentos permite alargar la vida útil de los mismos; se expusieron a su vez las ventajas y desventajas del secado solar con deshidratadores respecto al secado tradicional realizado en canchones al aire libre haciéndose hincapié en la ventaja de incorporar tecnologías de deshidratación en el proceso, especialmente cuando el mismo se hace con fines comerciales, se charló a su vez sobre las ventajas y desventajas de la deshidratación solar respecto a la realizada en hornos eléctricos. Se introdujo finalmente a las mujeres asistentes en el concepto de curvas de secado realizándose una explicación sobre los parámetros principales a tener en cuenta durante el proceso de deshidratación que deben ser controlados para obtener productos finales de calidad.

A continuación de dicha introducción, se mostraron diferentes tipos de secadores solares existentes con sus respectivas diferencias en el funcionamiento haciéndose principalmente diferencia entre los de tipo directo e indirecto, así como entre los de tipo pasivos y activos. Se presentaron a su vez alternativas de diseño y de materiales constructivos utilizadas en otras experiencias en secado solar desarrolladas en Latinoamérica. Finalmente se explicitó sobre cómo funciona el equipo transferido, clasificándolo dentro de las categorías presentadas al principio de la jornada. La explicación del funcionamiento se hizo con detenimiento en cada una de las partes del mismo, charlando sobre cuál es la función de cada una de éstas, así como cuáles son los cuidados a tener en cuenta para evitar su deterioro ver figura 8.1.

Al momento de la transferencia, debido a cuestiones coyunturales de los gobiernos de turno y de la situación pandémica COVID-19 atravesada de manera reciente, las mujeres dejaron de disponer el espacio de trabajo con el que contaban, continuando con las actividades de producción de mermeladas y deshidratados en el domicilio particular de la referente de la agrupación Francisca Cabezas. En consecuencia, el equipo fue instalado de manera provisional en el patio de la productora en el cuál, si bien hay incidencia de sol sobre el sistema de colección, las paredes que delimitan el patio del domicilio proyectan rápidamente sombras sobre el mismo durante las primeras horas de la mañana y la tarde, acortando en unas dos a tres horas el día solar. Es por lo anterior que se acordó pensar en posibilidades que permitan mejorar la cantidad de sol incidente sobre el equipo, así como evaluar posibles lugares alternativos para llevarlo.



Figura 8.1. Explicación de las partes del equipo y el funcionamiento de cada una de éstas.

Finalmente, se había previsto para el día del taller, realizar pruebas de secados con excedentes de productos que las mujeres tuvieran disponibles, etapa que finalmente no pudo realizarse debido a que en la época en la que se llevó el deshidratador solar aún no contaban con excesos productivos de ningún tipo para ser procesados y secados. Se pactó realizar dichas pruebas en un encuentro posterior, entendiendo que la mejor manera de aprender a usar el equipo es mediante la práctica. Más allá de este inconveniente, y con el objetivo de que las mujeres pudieran empezar a probar el deshidratador cuanto antes, es que se realizó una explicación general de cómo utilizar el equipo, como prepararlo y limpiarlo, como cargar y descargar las bandejas, como y cuando utilizar el sistema auxiliar, ver figura 8.2, que formas de controlar el proceso de secado cuando el mismo excede los límites superiores admisibles de temperatura, así como los cuidados a tener en cuenta para guardar el deshidratador cuando no sea utilizado de forma tal de extender su vida útil lo máximo posible. Se charló a su vez sobre conceptos básicos de manipulación de alimentos y limpieza del lugar para asegurar la calidad e inocuidad de las frutas deshidratadas.



Figura 8.2. Explicación de cargado y descargado de bandejas y utilización del sistema auxiliar.

Para mejor entendimiento del taller en general, se acompañó el mismo con la proyección de diapositivas y la entrega de material impreso entregándose la “Guía de uso de secaderos solares para frutas, legumbres, hortalizas, plantas medicinales y carnes” (Almada et al., 2005), la guía “Deshidratación y desecado de frutas, hortalizas y hongos. Procedimientos hogareños y comerciales de pequeña escala” (De Michelis y Ohaco, s/f) y el manual de usuario del equipo, ver figura 8.3 y anexo D, de autoría propia realizado para acompañar el proceso de transferencia en el cual además de cuestiones propias al equipo, contiene de manera resumida los conceptos de secado vistos durante el encuentro. En dicho manual, se incorporó a modo de anexos la caracterización de diferentes alimentos en cuanto a humedad inicial y rendimiento de secado, así como sugerencias sobre formas de preparar los mismos para su secado, sugerencias de pretratamientos para mejorar la apariencia final, sugerencias de cómo cortarlos y almacenarlos ya deshidratados, entre otras.

Luego de este primer encuentro, se realizó una nueva visita a “Ypa Yvi” en el mes de abril del 2023. En esta instancia, debido a que no encontraron espacios mejor preparados para instalar el equipo, el mismo permaneció en lo de Francisca Cabeza habiendo sido levantado del suelo casi medio metro permitiendo esta medida mejorar el tiempo de incidencia solar sobre el sistema de colección, ver figura 8.4 (entre las 10 am y las 17 según lo que nos expresó Francisca). Construyeron a su vez una escalera para poder acceder con más comodidad a la cámara de secado.



Figura 8.3. Tapa del manual de usuario del equipo realizado para ser entregado junto a la transferencia del equipo. Ver el manual completo en el anexo D.

Entre ambos encuentros, las mujeres realizaron pruebas de uso secando hojas verdes y zanahoria. Al momento de comenzar a usarlo, obtuvieron resultados satisfactorios a la hora de secar perejil manifestando inclusive haber logrado un mejor producto que cuando realizan el mismo proceso en los hornos eléctricos. El perejil fue obtenido en un día completo de secado. Cuando realizaron, por el contrario, deshidratado de zanahoria insumiendo su proceso más de un día, se encontraron con algunas dificultades. Según lo manifestado por las productoras, al finalizar el primer día de secado todo marchaba bien, pero durante el segundo, en el cual hubo mucho sol y temperaturas ambientales elevadas, la zanahoria se “quemó” por lo que tuvieron que descartarla. Es debido a esto, que se volvió a pensar junto a ellas los mejores mecanismos para poder controlar el proceso ante estas situaciones.

En esta nueva instancia, debido a que el tiempo no nos acompañó presentándose grandes precipitaciones durante la jornada, no fue posible la utilización del deshidratador solar. Se procedió sin embargo a procesar banana que tenían disponible para ser secada en los hornos eléctricos. Esto permitió charlar sobre diferentes pretratamientos posibles de realizarse tanto a la banana como a otras frutas, sobre cuidados a tener en la manipulación de los alimentos, en sugerencias de como cortar la banana y envasarla luego del secado, ver figura 8.5. Mientras se preparaba el producto se pudo también continuar hablando de la importancia que le ven ellas al poder utilizar el horno solar debido a que los costos de electricidad son cada vez más elevados siendo en consecuencia necesario que el proceso de transferencia continúe hasta lograr que las mujeres puedan efectivamente utilizar con soltura el equipo solar.



Figura 8.4. Equipo levantado para mejor incidencia del sol. Atrás se ve en negro la escalera construida para mejor acceso a la cámara de secado.

Se plantearon pasos a seguir entre los cuales las mujeres se comprometieron a continuar probando el equipo, utilizando el sistema auxiliar el cual aún no ha sido probado. Se planteó, con el objetivo de disminuir considerablemente la utilización de energía eléctrica en el proceso, ir pensando posibilidades para combinar el equipo solar con los hornos eléctricos que ya tienen, así como evaluar alternativas para mejorar el sistema auxiliar en caso de que el mismo sea insuficiente debido a la

gran humedad relativa de Orán. El próximo encuentro se fijó para la época invernal esperando que las condiciones del tiempo acompañen para poder concretar las pruebas de secado con el equipo.



Figura 8.5. Secado y envasado de banana y mango junto a las mujeres de “Ypa Yvi”.

Finalmente, se observó que lo más importante para que comiencen a utilizar con más frecuencia el secador solar, además de que existan condiciones del tiempo óptimas, es continuar concientizando a las mujeres respecto a las diferencias en el tiempo del proceso cuando se utiliza el sistema solar frente al eléctrico, siendo importante remarcarles que, aunque el proceso en general es mayor con el deshidratador solar, no así el tiempo requerido para el proceso de deshidratación en sí. Esto pudo determinarse cuando se conversó con las mujeres sobre cuánto tiempo requiere el secado de por ejemplo banana en el horno eléctrico, el cual dependiendo de la carga inicial les insume entre 16 a 18 horas. En el deshidratador solar, el tiempo total de secado durante el cual está efectivamente extrayéndose humedad es similar al eléctrico siendo el tiempo total del proceso mayor debido a que durante la noche el mismo se ve interrumpido.

- CAPITULO 9 -

CONCLUSIONES

9.1 Conclusiones

Se está viviendo en la actualidad una crisis climática cuyos efectos sobre el medio ambiente y la sociedad se han vuelto más tangibles que nunca generando un replanteo general del ser humano respecto a la forma de relacionarse con el medio ambiente y a los tipos y formas de consumos, lo que puede evidenciarse en el surgimiento de nuevas tendencias entre la que es posible mencionar la alimentación sustentable. La misma, entendida como un concepto de abordaje holístico, debe ser complementada con nuevas herramientas que permitan mitigar y adaptarse al cambio climático. La diversificación de la matriz energética, como estrategia en dicho contexto, es ineludible si queremos lograr sistemas de producción que tienda a minimizar las emisiones de gases de efecto invernadero.

Dentro de las nuevas tendencias de alimentación, surgen nuevos gustos y exigencias donde los consumidores empiezan a buscar cada vez más, productos de calidad alimenticia e inocuos para la salud, pudiéndose nombrar a la frutas y hortalizas como importantes y centrales dentro de estas nuevas dietas. La producción de las mismas para cumplir dichos requerimientos debe ser de manera más eficiente que la actual, en donde se estima que alrededor del 50% de la producción se pierde, implicando desperdicio de alimentos en sí y de los recursos involucrados en su producción.

La aplicación de secado solar de alimentos es entonces planteada como un mecanismo que permite vincular dentro de la alimentación sostenible como objetivo, la mejora en la eficiencia de los procesos productivos mediante la disminución de las pérdidas de alimentos y la diversificación de la matriz energética a partir de la aplicación de la energía solar térmica; siendo en la actualidad materia de amplia aplicación a nivel latinoamericano, y aunque de larga data su implementación, aun objeto de estudio y mejora.

Es en función de lo antedicho y a partir de la identificación de la problemática ambiental y económica de los pequeños y medianos productores de la región subtropical de Salta, relacionada a la pérdida de producción a causa de las diferentes dinámicas de mercado que imposibilitan muchas veces vender la totalidad de los productos producidos en fresco, que se realizó la propuesta de introducir el secado solar en la zona por un lado como forma de conservación de dichos productos pero por otro también como una posibilidad de generar valor agregado teniendo como ventaja ser una alternativa tecnológica de fácil construcción y aplicación, aún en zonas sin acceso a fuentes de energía convencionales, realidad que se da muchas veces en pequeñas localidades del NOA argentino. Se realizó de esta manera a lo largo del presente trabajo, el diseño, construcción, evaluación experimental y computacional y finalmente transferencia de un equipo de secado híbrido, pensado para funcionar principalmente de manera solar, pero equipado con un calentador eléctrico que permita continuar con el secado aun cuando no se disponga de niveles de radiación adecuados.

Si bien la tecnología una vez construida y transferida puede ser utilizada para alimentos en términos generales, es importante a la hora de definir cuestiones de diseño seleccionar un producto con el cual trabajar debido a que cada alimento tiene cinéticas de secado, humedades iniciales, formas de presentarse, formas de pre- tratarse y temperaturas máximas admisibles, entre otras cuestiones, particulares a cada uno. Se estudió en consecuencia la oferta productiva del área de

estudio con el objeto de determinar cuales son los principales cultivos hortofrutícolas de la zona en cuestión, así como cuales son aquellos entre los que se producen, que mayores excedentes generan. Se seleccionó la banana (*Musa var. nanica*) a partir del mencionado estudio, para realizar el presente trabajo; esto debido a que es el cultivo de mayor importancia en la zona a causa de su abundancia y disponibilidad (definido como sobre oferta en la matriz FODA del sector), características que facilitan su utilización en el desarrollo tecnológico el cual a su vez respondería a alguna oportunidades identificadas para el sector productivo entre las que se pueden mencionar la introducción de mejoras tecnológicas poscosecha y desarrollo agroindustrial

Se realizó a su vez el relevamiento de antecedentes respecto a la existencia de experiencias en la región que realicen la transformación de productos frutícolas mediante la utilización de energías renovables entendiendo que son estas experiencias las que verdaderamente interesaban para el presente desarrollo tecnológico encontrándose una única experiencia en la bibliografía, pero sobre la cual no fue posible encontrar mayor información en etapas posteriores. En consecuencia de lo anterior, se optó por realizar el diseño del equipo tomando como referencia modelos ya existentes aplicados en zonas más secas de la provincia de Salta como monte y puna y en otras regiones latinoamericanas a la que se le incorporaron modificaciones. Se planteó que el equipo sea principalmente solar, pero debido a las condiciones meteorológicas imperantes en la zona donde se aplicará, fue necesario incorporar un sistema auxiliar eléctrico para evitar deterioro de los alimentos por interrupción del proceso, especialmente al comienzo del proceso

Con el objeto de analizar sistemas de secado que mejor se adapten a la zona climática, se realizó una evaluación bibliográfica sobre diferentes experiencias de secado solar a nivel Latinoamérica de forma tal de encontrar antecedentes en el área que permitan establecer puntos de partida para el diseño del equipo. Dentro de la revisión realizada, se encontró un gran número de trabajos orientados al estudio y determinación de la viabilidad del proceso dentro de determinadas regiones climatológicas específicas de aplicación, siendo las mismas diversas.

Se encontró un gran caudal de autores dedicados al estudio de la utilización de determinados materiales en la construcción de equipos, principalmente recuperados y/o reciclados, y su influencia en la eficiencia de las tecnologías. Dichos estudios están orientados a que los costos de la construcción y aplicación de secadores solares sean económicos y accesibles, especialmente para productores de pequeña y mediana envergadura o aquellos que puedan llegar a estar en áreas aisladas y sin acceso a fuentes de energía convencionales, ofreciéndose a partir de este tipo de investigaciones la posibilidad de construir equipos de secado con los materiales que se tengan disponibles en el lugar.

Debido a que, en muchas situaciones el destino de la producción es pensado con fines comerciales, o el caudal de la materia prima es abundante y urge su rápido procesamiento a causa de la alta caducidad de los alimentos a ser procesados, es que numerosos investigadores se han dedicado a tratar de hallar mecanismos que mejoren la eficiencia del proceso, focalizados en las

desventajas del mismo, buscando el desarrollo de alternativas que pueda realmente competir con sistemas a base de energías convencionales en cuanto al tiempo y calidad final de secado.

El principal desafío identificado entre los numerosos estudios, y sobre el cual si bien aún hay múltiples alternativas ninguna ha sido replicada, es el lograr un sistema de secado que funcione de manera continua, es decir generar una propuesta tecnológica, principalmente solar, que permita continuar con el proceso de secado tanto cuando las condiciones no son óptimas durante el día, como durante la noche. En esta área investigativa, es común el estudio e incorporación de sistemas de acumulación de calor.

Fueron hallados también trabajos que se dedican a estudiar propuestas que mejoren el sistema de secado de manera general, habiendo quienes realizan la experimentación mediante la construcción de prototipos de manera directa y quienes optan por la utilización en primera instancia de modelos térmicos computacionales que permitan prever de qué manera pueden influir la incorporación de determinadas modificaciones sobre la eficiencia de los equipos. Dichos modelos permiten el ahorro de recursos y tiempo, sin embargo, para que estos sean aplicables de manera óptima, deben ser previamente validados experimentalmente.

Es posible a partir de la gran cantidad de trabajos encontrados, reafirmar la viabilidad del secado solar en múltiples lugares de Latinoamérica con condiciones climáticas muy diversas, para escalas de producción amplias y numerosos tipos de productos frutihortícolas; citado como de gran importancia en un contexto de cambio climático, donde el uso de energías renovables es de interés en casi todos los ámbitos de la vida moderna. Se observó sin embargo que los artículos siguen siendo estudios de caso muy puntuales y que, si bien el método de deshidratación solar es de larga data, aún no se observa ningún tipo de estandarización tecnológica a diferencia de otros tipos de sistemas de aprovechamiento solar como por ejemplo el caso de los calefones solar.

Respecto a esto último, quizás mediante una mayor interacción entre los distintos investigadores, sería interesante el obtener parámetros de diseño generalizados que puedan ser aplicados por cualquier persona independientemente de donde se pretenda realizar la experiencia a partir de la obtención de correlaciones como por ejemplo: radiación incidente y área de colección vs. potencia térmica entregada; potencia térmica entregada por el equipo vs. impacto sobre las propiedades psicométricas del aire y capacidad de evaporación de agua; producto a ser secado vs. tipo de tecnología; cantidad de producto vs. potencia térmica necesaria y tiempo de secado; entre otras. En síntesis, obtener parámetros de diseño generalizados y transferibles. En este punto, la utilización de softwares de simulación térmica puede ser una forma de facilitar dicha parametrización.

La revisión bibliográfica realizada permitió por un lado observar que el secado solar es de gran interés en cuanto a una alternativa viable para la generación de valor agregado a las producciones, minimizando los impactos del proceso sobre el ambiente, pero a su vez posible de ser implementado en zonas aisladas y a bajos costos. Por otro lado permitió establecer puntos importantes a ser trabajados en la presente tesis como la incorporación de un sistema auxiliar que permita no interrumpir el proceso, la construcción y utilización de un modelo térmico computacional para evaluar

la influencia de determinadas modificaciones y utilización de sistemas de acumulación sobre su eficiencia e intentar obtener relaciones entre variables de entrada y salida que parametricen el equipo construido.

El presente desarrollo tecnológico fue realizado a partir de un estudio de caso trabajándose con la agrupación de mujeres “Ypa Yvi” la cual al momento del desarrollo ya se encontraba realizando el deshidratado de productos mediante la utilización de hornos eléctricos con los consiguientes altos costos productivos. Debido a que las frutas deshidratadas por la agrupación tienen un destino comercial, se consideró importante el estudio de la cinética de la banana a 3 velocidades de aire de secado, dos presentaciones de grosor y 4 pretratamientos diferentes, con el objetivo de evaluar su influencia en el proceso en sí y en la apariencia final.

Se construyó para dicha evaluación una estufa pequeña de secado la cual fue suficiente para un estudio general de la cinética, sin embargo el empleo de un equipo específico que permita fijar condiciones de temperatura de manera estable dentro de la cámara hubiera permitido evaluar diferentes parámetros de manera más precisa, pues en este caso, solo fue posible regular la velocidad del aire de secado, siendo la temperatura de la cámara una consecuencia de la misma, obteniéndose mayores temperaturas de cámara a menores velocidades y viceversa. Por otro lado, para el empleo dentro del proceso de simulación, se pudo evaluar posteriormente que la obtención de los coeficientes de difusión y convectivos de la banana, debieron ser obtenidos en condiciones de laboratorio similares al equipo que se desee simular, esto es si se empleara un equipo convectivo, el flujo de aire empleado para la construcción de curvas de laboratorio deber ser también convectivo utilizándose finalmente para la validación de la simulación la curva obtenida durante el proceso de secado en el equipo ya construido al permitir mejores ajustes entre valores medidos y simulados.

La evaluación de la cinética en condiciones de laboratorio permitió descartar la utilización de rodajas de 1 cm al insumir considerablemente más tiempo que cuando la banana es cortada a 0.5 cm obteniéndose a su vez un producto de menor calidad y consistencia. Los pretratamientos con soluciones influyeron en la humedad inicial del producto pero no así en el tiempo total de secado. Si bien el metabisulfito de Na es el que mejor conserva el color, la dificultad para conseguirlo hace desaconsejable su uso. Se evaluó el uso de vino a modo de remplazo al tener metabisulfito de Na en su composición como conservante, sin embargo al afectar el mismo el color del producto por su composición intrínseca no se propone como un remplazo adecuado.

Como ya se mencionó en el capítulo 3, el tiempo de secado entre las distintas velocidades fue variable para las distintas situaciones estudiadas, siendo en algunos casos menor el tiempo de secado cuando más alta fue la velocidad de secado, pero en otras situaciones todo lo contrario. Esto puede deberse a que la influencia sobre el tiempo total que requiere secar un producto depende no solo de las condiciones del proceso en sí sino también de la fisiología y nivel de maduración del producto y de las condiciones ambientales. Se obtuvo que la humedad promedio de la banana en base húmeda es del 60%.

La etapa de diseño del deshidratador solar fue pensada y realizada en partes, trabajándose primero con el colector solar, proponiéndose un diseño innovador en cuanto a su geometría trapezoidal. Dicha modificación benefició la circulación pasiva del aire al aumentar la velocidad del flujo a través del mismo como consecuencia de su estrechamiento (principio de Bernoulli). A su vez, la forma trapezoidal incrementó en un 72% el área de captación. En esta etapa constructiva se utilizó como aislante fibra de vidrio encontrándose posteriormente la existencia de materiales más aptos para aplicaciones alimenticias como los aislantes térmicos dobles aluminizados.

Durante la evaluación experimental del colector, se encontraron dificultades para la medición de la velocidad del aire, pues los instrumentales utilizados presentaron rangos de temperatura de trabajo bajos, como el caso del anemómetro de hilo caliente TES 1241 cuyo rango de trabajo es entre -10°C y 60°C quedando muchas veces fuera de la temperatura del aire de salida con el consiguiente error en las mediciones. Es a partir de esto que queda como tarea pendiente el poder caracterizar nuevamente el equipo con instrumentales más adecuados, que por razones económicas no se pudo adquirir en durante la fase experimental.

Más allá de las dificultades encontradas durante el proceso de caracterización experimental, fue posible determinar el correcto funcionamiento del colector, su baja inercia y buenas capacidades para procesos de secado. Fue posible observar que, si bien las temperaturas de aire entregadas por el colector están por encima de los 80°C máximos que se pretenden para secado óptimo de banana, en la cámara se midieron posteriormente temperaturas siempre dentro del rango óptimo para procesos de deshidratación. Se pudo además estimar relaciones significativas entre las variables independientes del sistema, como ser la radiación, la temperatura del aire de entrada y la humedad con la temperatura del aire de salida del colector. Dichas relaciones se realizaron pensando en la posibilidad de parametrizar el diseño del equipo.

El diseño de la cámara se realizó en función de las curvas de secado, de la medición experimental de colector solar de aire, y de la capacidad de carga mínima pretendida de 10 kg, siendo de todos modos la capacidad real del equipo estimada posteriormente a partir de la simulación numérica computacional validada la cual resultó de 12 kg de producto húmedo por tanda. El diseño a partir de la definición de una carga pretendida se realizó teniendo en cuenta consideraciones de nivel de ocupación de producto por bandeja, es decir cuánto espacio es necesario para disponer determinada cantidad en peso de producto junto a un balance energético mediante la utilización de las curvas de secado y el estudio experimental del colector. El haber obtenido una capacidad de carga no tan lejana a la calculada permite deducir que el planteo para el diseño fue apropiado y bastante certero.

Una vez construida la cámara, fue evaluada bajo diferentes condiciones de funcionamiento: vacía, con bandeja de agua libre a distintas cargas y con banana. Dicha experimentación permitió establecer la existencia de un gradiente térmico dentro de la cámara de secado al comienzo del proceso de deshidratación, es decir cuando la cámara tiene producto, de aproximadamente 10°C por lo que el secado de alimentos nunca se da de manera totalmente homogénea en los distintos

niveles de bandejas dentro de la cámara siendo una buena recomendación el rotar las mismas al inicio de cada día de secado para procesos que duran más de un día.

Algo interesante que se determinó a partir de la evaluación experimental del equipo es que siempre que hubo buenas condiciones meteorológicas, las condiciones psicométricas del aire dentro de la cámara estuvieron dentro de los rangos óptimos. El correcto diseño de la chimenea es fundamental en sistemas pasivos debido a que errores en el mismo pueden determinar estancamiento del aire dentro de la cámara generando condiciones para la proliferación de microorganismos durante el secado. En el equipo aquí diseñado, la circulación del aire se vio doblemente beneficiada tanto por el diseño de tiraje como la forma del colector.

Durante la experimentación con agua libre, se realizaron balances energéticos que dieron siempre de manera favorable en cuanto a la energía entregada por el colector y la utilizada por el proceso de evaporación, es importante sin embargo considerar que cuando se realiza el secado de productos, la cantidad necesaria de energía será mayor que cuando se evalúa evaporación de agua libre, al estar ésta ligada de distintas formas dentro de los productos lo que implica más energía para romper dichas ligaduras y posterior evaporación.

El proceso de secado de banana pudo realizarse de manera exitosa sin la utilización del sistema auxiliar de secado, siendo necesario dos días y medio para el secado completo de la carga. Se incorporó al equipo una compuerta que permite cerrar el aire de entrada para evitar contrapresiones cuando se usa el equipo eléctrico, pero a su vez que permita disminuir la rehidratación durante la noche. El sistema auxiliar, el cual se previó al doble de potencia y queda como pendiente del presente trabajo, puede ser utilizado no solo cuando las condiciones no son óptimas si no para lograr que el equipo entre en régimen con mayor velocidad durante las primeras horas del día.

Las pruebas de secado con banana realizadas en la última instancia de evaluación experimental del equipo construido se hicieron de manera conjunta con un equipo directo de secado a los fines de comparar desde el punto de vista organoléptico los productos obtenidos por ambos sistemas secándose bananas pretratadas con los mecanismos estudiados en el capítulo 3, siempre cortando las rodajas con un grosor de 0.5 cm. Los distintos pretratamientos no tuvieron influencia significativa en el tiempo de secado, por lo cual es recomendable su aplicación especialmente si se pretende comercializar el producto.

La banana obtenida de ambos sistemas (directo e indirecto) fue sometida a un análisis de calidad mediante la realización de una encuesta organoléptica, una evaluación sensorial y análisis de color. Las pruebas de color realizadas mediante la metodología propuesta por Padrón – Perira (2009) resultaron ser una alternativa económica al no necesitarse instrumentales específicos que permiten de manera general detectar diferencias objetivas en el color. El pretratamiento con ácido cítrico, el cual puede ser remplazado de manera accesible con jugo de limón, fue el que mejor conservó el color de las muestras. No se evidenciaron influencias significativas entre el secado directo indirecto sobre el color considerándose como ventaja del sistema indirecto, la posibilidad de armar equipos de mayor carga. Queda como trabajo futuro el comparar la influencia de los dos tipos de sistemas

sobre la composición nutricional de las frutas, de forma tal de determinar si la incidencia directa del sol sobre el producto puede desnaturalizar ciertas vitaminas y/o componentes.

La encuesta realizada permitió reconocer un conocimiento general de la población acerca de la existencia de frutas deshidratadas habiendo el total de los encuestados, consumido en algún momento frutas deshidratadas. Estos resultados respaldan por un lado la existencia de nuevas tendencias sobre alimentación saludable, apareciendo en el último tiempo estos tipos de productos con mayor frecuencia en los mercados. Por otro lado, la mayoría de los participantes manifestó intención de consumir este tipo de productos, siendo la banana la fruta mayormente nombrada. En cuanto a este aspecto, fue posible observar la confusión existente respecto a que las bananas que se consiguen comúnmente en los comercios, las cuales son duras, son deshidratadas cuando en realidad las mismas son fritas, esto demuestra como el marketing puede generar desinformación, intencionalmente o no.

El hecho de que las frutas deshidratadas sean obtenidas mediante la utilización de energías renovables determinó en la mayoría una influencia sobre su decisión de compra de manera positiva, aspecto importante a tenerse en cuenta a la hora de diseñar el packaging del producto, por lo cual se les recomendó a las mujeres de la agrupación incorporar algún tipo de indicación respecto al uso de este tipo de energías en el proceso.

El análisis sensorial arrojó que el sabor es la característica más importante a ser considerada por los consumidores, aunque son las características visuales las que primero impactan a la hora de comprar un producto por primera vez. Nuevamente, se evidenció la influencia sobre el análisis sensorial realizado, la existencia de banana frita en el mercado la cual hasta el momento de la prueba creían que era deshidratada, comparándola inconscientemente. Este punto debiera ser abordado eventualmente por la agrupación “Ypa Yvi” a la hora de comenzar a introducir la banana deshidratada que produzcan para que la textura real de la pasa de banana no sea algo contraproducente.

Del análisis sensorial, se confirmó nuevamente la importancia de los pretratamientos cuando el producto se realiza con fine comerciales, pues independientemente de cuál sea, siempre resultó más agradable la banana pretratada que la que no tuvo pretratamiento. El que más gusto fue el realizado con bicarbonato seguido por el vino en el equipo indirecto y el ácido cítrico en el directo.

Debido a que el presente trabajo se entendió como una primera etapa en el desarrollo de una tecnología de deshidratado para zonas tropicales mediante el empleo de energías renovables, es que se construyó un modelo numérico computacional del equipo mediante el empleo de Simusol que permita continuar con su estudio de una manera más eficiente en cuanto a recursos y tiempo. El modelo se continuará empleando para estudiar el impacto de determinadas modificaciones sobre su eficiencia. La modelización numérica se dividió en dos esquemas individuales interconectados entre sí. Por un lado, el colector y por el otro la cámara. Los datos de salida de simulación del colector son luego empleados como entrada para la simulación de la cámara. Esta forma de plantear la simulación permitiría acoplar el modelo de colector con otros destinos, así como evaluar la cámara con otros tipos de sistema de colección. A su vez, el planearlos en dos hojas .dia separadas da la posibilidad

de complejizar y/o pulirlos con más libertad al no estar tan limitados debido a los recursos de procesamiento en comparación a que si se los hubieran planteado en un solo esquema térmico.

Si bien el ajuste estadístico entre valores simulados y medidos fue aceptable en todos los casos, es necesario y posible continuar mejorando las distintas simulaciones realizadas. Entendiendo que se trata de modelos discretos contruidos en segmentos, podría lograrse mejorar el ajuste mediante una mayor segmentación de los mismos, especialmente para el caso de la cámara la cual se simplificó mediante la modelización de un único nodo. Es importante sin embargo comenzar la construcción de los modelos de manera simple, cuestión que se buscó a lo largo de esta tesis, lográndose ajustes satisfactorios, con R^2 mayores a 0.8, para ser una primera aproximación de modelización del equipo. Queda en consecuencia pendiente, incorporar más nodos térmicos, así como contemplar mecanismos de transferencia de calor más detallados en cada punto del equipo.

El modelo computacional obtenido fue validado experimentalmente. El diagrama del colector fue utilizado luego de dicha validación para en una primera instancia determinar si la forma trapezoidal es efectivamente una mejora respecto a si el colector hubiera sido de forma convencional. Se corroboró de esta manera que, aunque las pérdidas al ambiente aumentan como consecuencia de una mayor superficie de intercambio con el mismo, la forma trapezoidal permite incrementa el caudal másico y mejorar las propiedades psicométricas del aire de secado siendo en el balance una mejora considerable respecto a los equipos rectangulares. Se puede plantear como contraparte a dicha geometría, la mayor dificultad constructiva y de instalación respecto al de tipo rectangular.

El modelo validado se usó a su vez para evaluar la incorporación de materiales de cambio de fase como sistemas de acumulación, atendiendo al hecho de que uno de los mayores desafíos encontrado en el estudio y aplicación de los colectores solares de aire a partir de la revisión bibliográfica realizada, es el extender su uso más allá de las horas de radiación. Dicho análisis realizado para tres espesores diferentes de capa de PCM permitió observar que su uso mejora las condiciones generales de inercia térmica del sistema manteniendo el mismo mejores condiciones en el aire entregado para secado durante más tiempo luego de que se produzca una disminución en el recurso solar.

Se observó que cuando mejores son las condiciones del día, la incorporación de parafina disminuye en términos generales el calor útil entregado y la energía acumulada como consecuencia de que dichos parámetros se obtienen a partir del cálculo del salto térmico entre el aire de entrada y el aire salida, pues al incorporar parafina, parte de la energía incidente es entregada al calentamiento de la parafina. Es en consecuencia importante observar que más que una disminución en dichos parámetros, la utilización de parafinas permite distribuir el uso de la energía incidente sobre el sistema de manera más uniforme a lo largo del día, siendo menor la energía entregada cuando más alto es el pico de radiación, puesto que la parafina en este punto almacena la misma, y mayor cuando la radiación disminuye, comenzando la parafina entregar energía, ampliando el tiempo de aplicación del sistema para secado por una franja mayor.

Es así que es posible determinar que, a partir del estudio paramétrico realizado, la utilización de parafinas más que acumuladores, funcionan de forma de reguladores de energía, siendo mejor dicha función, cuando mayor es la capa de PCM utilizada. El aumento en la inercia térmica permite que las condiciones psicrométricas del aire mejoren a su vez a lo largo del día, permitiendo amortiguar las grandes variaciones que se suceden en el aire entregado por el equipo al tener una inercia térmica muy baja al tratarse de colectores solares de aire. Esto es un punto muy favorable en cuanto al uso de PCM especialmente en procesos de secado. Un paso posterior a trabajar serían las consideraciones desde el punto de vista práctico en cuanto a las formas de contención de la parafina, pues, aunque aquí se ha planteado en forma de capa, sería difícil desde un punto de vista constructivo incorporar de dicha forma los materiales de cambio de fase a un equipo solar de aire.

En términos generales, la incorporación de parafina permite obtener un colector solar que entrega temperaturas más estables y en un rango apropiado para secado durante mayor tiempo, algo sumamente positivo para la deshidratación de alimentos. No obstante, la cantidad de energía térmica almacenada dependerá fuertemente de la irradiancia solar que incide en el colector, sobre todo durante las primeras horas, afectando en consecuencia la temperatura de sostenimiento en los horarios de la tarde/noche.

En cuanto a la transferencia del equipo, se identificó la importancia de acompañar todo el proceso de familiarización de las mujeres con el secado solar, las cuales, al estar habituadas a realizar el secado con hornos eléctricos, deben aprender a utilizar esta nueva tecnología amoldándose a las nuevas formas de control del proceso y tiempos de secado, los cuales son muchos mayores que cuando el proceso es de manera eléctrica. Es importante a su vez, capitalizar el empleo del secado solar desde el punto de vista comercial y de marketing, habiéndose sugerido a la agrupación la incorporación en el packaging de “Ypa Yvi” de algún tipo de sello que destaque la utilización de energías renovables en el proceso.

Finalmente es muy importante destacar que el presente trabajo de tesis se pensó como un proceso de desarrollo tecnológico planteado en términos de transferencia, lo que implicó el desarrollo técnico del equipo a lo largo del cual fueron realizándose diferentes modificaciones teniendo principalmente en cuenta el impacto de las mismas sobre la eficiencia del sistema, interactuando con la asociación solo en dos instancias, en la formulación del proyecto, y a la hora de realizar la transferencia en sí. A partir de esta forma de plantear el proceso, se generó como aprendizaje especialmente luego de haber entregado el equipo y haber entablado una interacción más fluida con Francisca Cabezas, referente de la agrupación, el identificar la importancia de un desarrollo no en términos unidireccional, (universidad – sociedad), si no a partir de una retroalimentación constante en donde los beneficiarios del desarrollo participen activamente de todo el proceso, siendo estos también proponentes de mejoras o modificaciones a partir de sus propios saberes. Dicha retroalimentación se entiende como algo sostenido en el tiempo sin principio ni fin sino como un círculo constante y sostenido. Es debido a este último aprendizaje que el trabajo con las mujeres de

Orán continuará más allá del presente trabajo de tesis, previéndose nuevos encuentros que permitan continuar adaptando la tecnología tanto al clima como a la forma de trabajo de “Ypa Yvi”.

BIBLIOGRAFÍA

Acuerdo de Paris (2015) Naciones Unidas.

Ahmad I. & Chwee C. (2004) P. Increasing Consumption of Tropical and Subtropical Fruits

Almeida I. B., Lima M. A. A., y Souza L. G. M. (2016). Desenvolvimento de secador solar construído a partir de material reciclável. *Holos*, 4, 197-205. DOI: 10.15628/holos.2016.2477.

Altendorf Sabine (2017). Perspectivas mundiales de las principales frutas tropicales. Perspectivas, retos y oportunidades a corto plazo en un mercado global pujante. FAO, food Outlook, bianual report on global food markets. November 2017.

Alves N. M. C., de Oliveira Rodrigues J., Silva T. A. A., Galle N. B. C., da Cruz Salina T. H., da Silva Moura A., da Silva K. L. M y de Almeida Borges C. J. (2020). Performance of solar dryer with thermal energy storage in brazilian cerrado region. *Brazilian Journal of Development*, 6(9), 64220-64235. DOI:10.34117/bjdv6n9-016

Alves R. A., Queiroz A. J. D. M., de Figueirêdo R. M., Silva W. P. D., y Gomes J. P. (2019). Solar drying of cowpea bean combined with drying in a heat accumulator dryer. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 23, 709-715. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v23n9p709-715>

Andión-Torres, R., Suárez-Rodríguez, J. A., & Bergues-Ricardo, C. C. (2012). Evaluación experimental de un secador solar tipo Gabinete para el secado de hollejo de naranja. *Tecnología Química*, 32(2), 223-233.

Araújo, C. V. M., Varella, F. K. D. O. M., y Vale, M. R. B. G. (2021). Construção de secador solar no semiárido nordestino utilizando materiais recicláveis. *Revista Brasileira de Energia Solar*, 12(1), 21-30.

Arroyo A. R. (2004) Diagnóstico productivo del departamento de Orán. Estación experimental de cultivos tropicales yuto. INTA Orán, Salta.

Aspurz Tabar, J. (2011). Obtención de curvas de secado de tomillo (*Thymus vulgaris*).

Ávila Gómez, A. E.; Mendoza Fandiño, J. M.; Beltrán Sarmiento y J. F. (2010). Evaluación energética de un colector solar de placa plana de doble cubierta Ingeniería y Desarrollo, núm. 27, enero-junio, pp. 93-112 Universidad del Norte Barranquilla, Colombia.

Bataller – Venta M., Cruz – Broche S. S. y García – Pérez M. A. (2010). *Revista CENIC Ciencias Biológicas*, Vol. 41, No. 3, pp. 155-164, septiembre-diciembre.

Bermúdez A., Narváez M., Cadena M. I. & Ayala-Aponte Alfredo (2013). Reducción de pérdida de calidad de melón (*Cuculis melo*) durante la congelación mediante aplicación previa de deshidratación osmótica. Escuela de Ingeniería de Alimentos. Universidad del Valle, Cali, Colombia.

Blankestein H. (2021). Alimentación orgánica. Un análisis de las tendencias del consumo de los alimentos orgánicos en Unión Europea según las teorías de Bourdieu.

British Petroleum (2019) statistical Review of World Energy. 2019. 68th Edition.

Briones V. (2015) Prácticas y agencia de los productores frutihortícolas. Un estudio de caso en Colonia Santa Rosa. Tesis de grado para obtener el título de Antropóloga. Facultad de Humanidades, Universidad Nacional de Salta.

- Cabrera Escobar J., Cabrera Escobar R., Guamán Lozada D., Cajamarca Carrazco D., Carrera Oña G., (2019). Design of an Indirect Solar Dehydrator of Fruits by Forced Convection. European Scientific Journal Vol 15, No18.
- Cáceres D. M., Soto G. y Barrientos M. (2007). Catálogo de tecnologías para pequeños productores agropecuarios 1 y 2. 1a ed. - Buenos Aires. Secretaría Agricultura, Ganadería, Pesca y Alimentación, 2007.
- Camacho-Martínez H. A., Antonio-Gordillo D. M., Robles-Ocampo J. B. y Sevilla-Camacho P. J. (2019). Deshidratador solar híbrido para el secado de plátano. Revista de Sistemas Experimentales, Vol.6 No.21 26 - 33.
- Campañone L. A., Mackeprang M., y Paola C. A. (2013). Aplicación de Energía Solar combinada con Microondas para la deshidratación de frutas y vegetales. In VII Congreso de Medio Ambiente.
- Carrier Air Conditioning Company. Handbook of air conditioning system design. (1980). Edición limitada. Editorial Macombo, Barcelona. ISBN 84-267-0115-9.
- Castillo Téllez M., Ovando Sierra J. C., Lezama Zárraga F. y Mez Álvarez D. C. (2019). Nut drying of India cultivated in Campeche, México through direct solar technologies and under controlled conditions. BISTUA REVISTA DE LA FACULTAD DE CIENCIAS BASICAS, 60-69.
- Catalá R. y Gavara R. (2001). Nuevos envases. De la protección pasiva a la defensa activa de los alimentos envasados. Arbor CLXVIII, 109 – 127 pp.
- Colamarino I. (2011) Producción de Bananas. Revista Alimentos Argentinos, Edición N° 50.
- Condorí M., Echazú R., Durán G. y Saravia L. (2008). Secador solar híbrido. Diseño y construcción. ASADES Vol. 12, Año 2008.
- Coronado A. P. (2007). Técnicas de almacenamiento y conservación de frutas y hortalizas frescas.
- Corvalán R., Horn M., Roman R. y Saravia L. (1999). Ingeniería del Secado Solar. Subprograma VI: Nuevas Fuentes y Conservación de la Energía. Capítulo 8. CYTED-D.
- Cruz I. G., Sauad J. J. y Condorí, M. Á. (2012). El deshidratado de los frutos de algarroba (Prosopis alba): análisis comparativo entre secador solar y métodos tradicionales del NOA. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente, 16.
- Da Costa Santos D., De Melo Queiroz A. J., De Figueirêdo R. M. y De Oliveira E. N. A. (2014). Drying of residual grains of annatto in a heat accumulator dryer combined with drying in a solar dryer. Boletim do Centro de Pesquisa de Processamento de Alimentos, 32(2). (1)
- Da Costa Santos D., De Melo Queiroz A. J., De Figueirêdo R. M. y De Oliveira E. N. A. (2014). Secagem solar de grãos residuais e farinha de grãos residuais de urucum. Biosci. j.(Online), 436-446. (2)
- da Silva Bontempo L. H., Castejon L. V. y dos Santos K. G. (2020). Secagem da casca de tangerina: cinética e desempenho do secador solar convectivo. Research, Society and Development, 9(6), e44963458-e44963458.
- da Silveira N. H., de Andrade Silva G. V., Pereira F. K., y Silva A. S. A. (2015). Secagem solar de coentro: efeito de pré-tratamentos e do processo sobre, os aspectos físicos-químicos. Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável, 10(4), 33.

- de Andrade Gomes Í., Medeiros P. G. P. y Grilo M. B. (2018). SECADOR SOLAR DE FRUTAS: ANÁLISE DE DOIS SISTEMAS. In VII Congresso Brasileiro de Energia Solar-CBENS 2018.
- Dellicompagni P., Franco J. and Flexer V. Reducción de emisiones en la industria de litio en la Puna Argentina mediante tecnologías solares de concentración. Acta de la XLII Reunión de Trabajo de la Asociación Argentina de Energías Renovables y Medio Ambiente Vol. 7, pp. 06.21-06.31, 2019. Impreso en la Argentina. ISBN 978-987-29873-1-2.
- Echazú R., Iriarte N., Morón M. J., Quiroga M. y Saravia L. (2001) Secado solar de carne de llamas. ASADES Vol. 5.
- Fagiani M. J., y Tapia A. C. (2018). Argentina: “Aprovechamiento integral del cultivo del banano y plátano (Fresco, procesamiento industrial y artesanatos)”. Estación experimental de cultivos tropicales yuto. INTA.
- FAO (2004). Conservación de Frutas y Hortalizas Mediante Tecnologías Combinadas.
- FAO (2011) Pérdidas y desperdicio de alimentos en el mundo. Düsseldorf, Alemania.
- FAO (2019). <http://www.fao.org/americas/noticias/ver/es/c/1193662/>. Página visitada el 8/04/2021.
- FAO (2020 - a). Las principales frutas tropicales. Análisis del mercado 2018. Roma.
- FAO (2020 - b) *Frutas y verduras – esenciales en tu dieta. Año Internacional de las Frutas y Verduras, 2021. Documento de antecedentes*. Roma. <https://doi.org/10.4060/cb2395es>
- FAO y OMS. 2020. *Dietas saludables sostenibles - Principios rectores*. Roma. <https://doi.org/10.4060/ca6640es>
- Finck-Pastrana, A. G. (2014). Nopal (opuntia lasiacantha) drying using an indirect solar dryer. *Energy Procedia*, 57, 2984-2993.
- Fonseca-Fonseca S., Andión-Torres R., Pacheco-Busquets O., Torres-Ten A., y Zenón-Cobián F. (2019). Diseño, construcción y evaluación sin carga de un prototipo de secador solar para el secado de Anamú. *Tecnología Química*, 39(1), 158-168.
- García Muñoz G. (2010). Métodos Alternativos de Conservación de Alimentos.
- García V., Iriarte A. A., Justinovich S., Angel L., y Heredia, T. (2015). Secadero solar forzado para productos agrícolas. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente-AVERMA*, 19, pp. 02.21 - 02.28.
- García P., Leon J., Cardenas L. y Giraldo J. F. (2018). Modelado numérico del proceso de secado solar de manzanas en el municipio de Nuevo Colón-Boyacá. *Rev. UIS Ing.*, vol. 17, no. 1, pp. 201-208. Doi: <https://doi.org/10.18273/revuin.v17n1-2018019>
- García L. E., Mejía M. F., Mejía D. J., y Valencia C. A. (2012). Diseño y construcción de un deshidratador solar de frutos tropicales. *Avances: Investigación en Ingeniería*, 9(2), 09-19.
- Guevara Blanco A. R. y Sabas Segura J. (2017). Diseño y construcción de un deshidratador solar para fresa. *Quinto encuentro de jóvenes investigadores*. Vol. 3.
- Gutiérrez C., Herrera M., Mansilla F. E., y Sisca, N. (2012). Secadero Solar Indirecto de Circulación Natural, Para Hierbas Aromáticas, Frutas y Verduras en la Ciudad de Pico Truncado. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 12, 02-01.
- Hernández-Gómez V., Olvera-García O., Guzmán-Tinajero P., y Morillón-Gálvez D. (2017). Secado de frutas y verduras con energía solar. *Revista de Sistemas Experimentales*, 4(11), 22-33.

- Hernández-Rodríguez J., Quinto-Diez P., Aguilar-Aguilar, J. O., Barbosa-Pool G. R., Razo-Pérez, W. R., y Toledo-Velazquez M. (2019). Secado solar de chicozapote (*Manilkara zapota*). *Científica*, 23(2), 135-139.
- Hernández-Rodríguez J., Quinto-Diez P., Barbosa Pool G. R., y Aguilar-Aguilar, J. O. (2017). Secado solar de frutas y verduras en Quintana Roo, México. *Revista Iberoamericana de Tecnología Postcosecha*, 18(1), 1-8.
- Hernández R, J., Martínez V, O., Quinto D, P., Cuevas D, J., Acosta O, R., y Aguilar, J. O. (2010). Secado de chile habanero con energía solar. *Revista Iberoamericana de Tecnología Postcosecha*, 10(2), 120-127.
- Herrero A. M. y Romero de Avila M. D. (2006). Innovaciones en el procesado de alimentos: Tecnologías no térmicas.
- IRENA. Global Energy Transformation. 2019 edition.
- Iriarte A., y Bistoni S. (2018). Secado de manzana en secadero túnel de laboratorio y en secadero solar en convección natural. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 22.
- Iriarte A., y Bistoni S. (2016). Diseño y simulación de un secadero solar doble paso para productos especiales. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente-AVERMA*, 20, 1-11.
- IYFV (2021). International year of fruits and vegetables 2021. Global Action Plan. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Rome, Italy.
- Kerkhoff A. J., Senn J., Condori M. A., y Mantulak M. J. (2012). Caracterización de tres deshidratadores solares-híbridos en misiones, determinación de rendimientos. *Salão do Conhecimento*.
- Koeppen, W. y Geiger, R. (1936). *Handbuch der klimatologie*. Gerbrüder Borntraeger, Berlin.
- Leiton-Ramírez Y., Mosquera-Vivas E., Ochoa-Martínez C. & A. Ayala-Aponte. (2016). Evaluación de propiedades físico-químicas en secado de naranja (*Citrus sinensis*) mediante liofilización: influencia del espesor.
- Liria Domínguez M. R. (2007). Guía para la evaluación sensorial de alimentos. Instituto de investigación nutricional. Consultora AgroSaluds. Lima.
- Machado A. V., de Oliveira E. L., de Oliveira J. A., Souza D. F. S. y de Freitas L. M. (2012). Modelagem e simulação da secagem solar do pedúnculo de caju. *Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável*, 7(3), 18.
- Martínez C. C. y Condorí M. A. (2017) Construcción de un secador solar con colector de matriz porosa. Mediciones de su eficiencia térmica. XXIV Simposio Peruano de Energía Solar y del Ambiente, Huas.
- Mealla-Sánchez L. E., y Morales-Olaciregui J. D. (2018). Evaluación del comportamiento térmico de secadores solares en régimen pasivo. *Tecnológicas*, 21(41), 29-44.
- Mendoza J., Insuasti R., Barrera O., y Navarro M. (2019). Diseño y Simulación de un Deshidratador Mixto Indirecto de Frutas/Design and simulation of an Indirect Mixed Fruit Dehydrator. *KnE Engineering*, 107-124.
- Mezquitillo-Bocanegra C., Ruiz-Camacho B. y Martinez-Alvarez O. (2014). Construcción y evaluación de un secador solar indirecto para el deshidratado de tomate saladatte. *Química hoy*. Vol.4 No.1.

- Ministerio de Economía. <https://www.argentina.gob.ar/economia/energia/energia-electrica/renovables>. Visitada el 11/10/2022
- Miranda S. A., y dos Santos K. (2020). Produção de cebola desidratada em secador solar convectivo de bandeja. *Universidade Federal do Triângulo Mineiro*. DOI: <https://doi.org/10.18554/rbcti.v5i2.3345>
- Molina, N. A. (2016). Análisis de costos y rentabilidad en la producción frutícola del norte argentino: Casos de frutas tropicales. INTA – Estación experimental agropecuaria bella vista centro regional corrientes. Publicación Técnica N°58 ISSN 1515-9299.
- Mondino, M. C. y Ferratto, J. (2006). El análisis sensorial: una herramienta para la evaluación de la calidad desde el consumidor.
- Moreno C., Curzel H., Mariconda L. y Marisa B. (2008). Secado solar, valor agregado para pequeños productores de orégano en el alto valle del río negro, Argentina. *Revista Iberoamericana de Tecnología Postcosecha Vol 15 (1):106-114*
- Nascimento A. L. A., da Silva L. C. R., Santos M. A., Pereira S., Chauca M. N. C. y Brandi I. V. (2015). Desenvolvimento de desidratador solar de alimentos com sistema de aquisição de dados em plataforma arduino. *Caderno de ciências agrárias*, 7(2), 29-34.
- Nunes A. G., y Pellegrino N. S. L. (2017). Tecnologias Sustentáveis: Desenvolvimento de um Secador Solar para Secagem de Frutas. *Revista Espacios*, 38(53), 9.
- Nunes A. G., Grilo M. B., Sales A. Q., Ribeiro B. F., de Castro Nascimento C. Á., y Maia, J. E. F. (2018). Secador Solar Usado na Secagem de Banana. In VII Congresso Brasileiro de Energia Solar-CBENS 2018.
- Oliveros Tascón C. E., Ramirez Gómez C. A., Tibaduiza Vianchá C. A., y Sanz Uribe J. R. (2017). Construcción de secadores solares tipo túnel con nuevos materiales. *Gerencia Técnica. Programa de Investigación Científica. Fondo Nacional del Café*.
- Oré García J., Janama Quispe K., Cerón Balboa O., Morales Morales O. y Pérez Sáez J. F. (2019) Snak Solar. XXVI Simposio Peruano de Energía Solar y del Ambiente, Ayacucho.
- Orjuela Castro J. A., Pinilla Ortiz A. L. y Rincón Murcia J. R. (2002). Aplicación de la tecnología de atmósfera controlada para la conservación de granadilla.
- Ospina Meneses S. M. y Cartagena Valenzuela J. R. (2008). La atmósfera modificada: una alternativa para la conservación de los alimentos. *Revista Lasallista de Investigación*, vol. 5, núm. 2, Julio – Diciembre, 2008, pp. 112-123. Corporación Universitaria Lasallista, Antioquia, Colombia.
- Padrón Pereira C. A. (2009). Sistema de visión computarizada y herramientas de diseño gráfico para la obtención de imágenes de muestras de alimentos segmentadas y promediadas en coordenadas CIE-L*a*b*. *Agronomía Costarricense* 33(2): 283-301. ISSN:0377-9424.
- Passamai V., Passamai M., Andolgi F., Passamai T. y Di Fonzo M. (2004). Secador – Invernadero solar en Cachi, Salta. *ASADES Vol. 8*.
- Passamai V., Sanchez B., Mendoza P., Dorado L., Valdez S. y Passamai T. (2006). Experiencias de secado sin radiación solar directa y a baja Temperatura. Comparación con el secado solar. *ASADES Vol. 10*.

- Paunero, I. (2012). Principales riesgos en el manejo de montes frutales y galpones de empaque de frutas en Argentina, con énfasis en la región del noreste de la provincia de Buenos Aires. <https://inta.gob.ar/documentos/principales-riesgos-en-el-manejo-de-montes-frutales-y-galpones-de-empaque-de-frutas-en-argentina-con-énfasis-en-la-region-del-noreste-de-la-provincia-de-buenos-aires>.
- Peinado-Martínez J. L., Vidal Herrera R., y Fernández, J. A. G. (2013). Deshidratación de alimentos utilizando energía solar térmica. *CULCyT: Cultura Científica y Tecnológica*, 10(50), 99-107.
- PLAN DE MEJORA COMPETITIVA CLUSTER DE FRUTOS TROPICALES DE SALTA. Argentina, Año 2010.
- PLAN DE MEJORA COMPETITIVA CLUSTER DE FRUTOS TROPICALES DE SALTA. Argentina, Año 2013.
- PLAN PROVINCIAL DE ENERGÍAS RENOVABLES. Gobierno de la Provincia de Salta. Argentina, Año 2014.
- Pontin M., Lema A., Ritta R., Sanmartino A. y Ghirardotto M. (2005). Secadero solar para frutas: Estudio de Caso. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*. Vol. 9.
- Quevedo Ramírez T. (2013). Agroindustria y concentración de la propiedad de la tierra: elementos para su definición y caracterización en el Ecuador. CLACSO. Quito, Ecuador.
- Queiroz M. R., y Nebra S. A. (2001). Theoretical and experimental analysis of the drying kinetics of bananas. *Journal of food Engineering*, 47(2), 127-132.
- Recio Colmenares R. B., Recio Colmenares C. L., y Pilatowsky Figueroa I. (2019). Estudio experimental de la deshidratación de tomate verde (*Pysalis ixocarpa* brot) utilizando un secador solar de tipo directo. *BISTUA REVISTA DE LA FACULTAD DE CIENCIAS BASICAS*, 17(1), 76-86.
- Ramírez Sandoval S. A., Gutiérrez Sánchez H. C., Solóriz Díaz G., Galván González S. R., Mendoza Covarrubias C., y López López Garza V. (2014). Modeling and experimental studies on an indirect type natural convection solar food-dryer. In 2014 IEEE International Autumn Meeting on Power, Electronics and Computing (ROPEC) (pp. 1-6). IEEE.
- Rochín V. R. (s.f.). La física de la chimenea solar. Instituto de física, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Rodriguez S. G., Santos D. S., Lima F. D. C., Silva G. F. y Monteiro L. F. (2015). Estudo da secagem solar de resíduos enriquecidos de caju. *Anais do VII SIMPROD*.
- Roig Vila D. (2020). Hacia una alimentación sostenible: un esfuerzo multidisciplinario. *Nutrición Hospitalaria*. DOI: <http://dx.doi.org/10.20960/nh.03356>
- Rodriguez Villamil D. A. y Bohorquez Mariño J. L. (2016). Diseño de un Colector Solar de Placa Plana Para la Deshidratación de Productos Agroindustriales.
- Salvo A., Echazú R., Binda C., Franco J., Dellicompagni P. (2021). Gabinete UVC – Solar fotovoltaico para esterilización de objetos. *Acta de la XLIII Reunión de Trabajo de la Asociación Argentina de Energías Renovables y Medio Ambiente* Vol. 8, pp 185-196, 2021 ISBN 978-987-29873-1-2

- Salvo A., Dellicompagni P. & J. Franco. (2020). Diseño, construcción y ensayo de un colector de aire trapecoidal para deshidratado de frutas. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*. Vol. 24, pp. 100 – 108, 2020 ISSN 2314-1433.
- Salvo A., Dellicompagni P., Sarmiento N., Franco J. y Echazú R. (2018). Simulación y validación de un secadero solar directo pasivo mediante simusol. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 22, 73-83.
- Sandoval-Torres, S., Rodríguez-Ramírez, J., Méndez-Lagunas, L., & Sánchez-Ramírez, J. (2006). Rapidez de secado reducida: Una aplicación al secado convectivo de Plátano Roatán. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 5(1), 35-38.
- Saravia Mathon, L. R. (2010), Secado solar de productos agroalimentarios en Iberoamérica/ Luis Saravia Mathon y Rafael Espinosa. – 1ª ed. – Salta.
- Sarli, R. R., Gonzalez S. I. y Ayres N. (2015). Análisis FODA. Una herramienta necesaria. Facultad de odontología. UNCuyo. Volumen 9 N°1.
- Sarmiento N., Belmonte S., Dellicompagni P., Franco J., Escalante K. y Sarmiento J. (2018). A solar irradiation GIS as decisión support tool for the Province of Salta, Argentina. *Renewable Energy*. DOI: 10.1016/j.renene.2018.07.081
- Seminario L., Williams S. & J. Acuna. (2014). El ozono y su aplicación en la conservación de alimentos. <https://www.researchgate.net/publication/228391008>
- Souza Coelho B. E., Ferreira Moraes Da Silva L., Da Silva Santana Novaes M., Dos Santos Melo de Sousa K., y Silva Machado N. (2018). Cinética de secagem da manga “tommy aktins” em secador solar de baixo custo e com convecção forçada de ar. In *Anais do 5º Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia-CONTECC, Anais do 5º Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia, Maceió-AL*.
- Soglia L., y Sales J. (2018) Painel solar para auxílio do secador cilíndrico.
- Taco A. P., Tejada E. P., Falcón V. C. y Calla J. C. G. (2019) Secado del aji panca en un secado solar fotovoltaico de tubos al vacío. *XXVI Simposio Peruano de Energía Solar y del Ambiente*, Ayacucho.
- Statgraphics Centurión XVI.
- Talens Oliag, P. (2017). Evaluación del color y tolerancia de color en alimentos a través del espacio CIELAB.
- Torres J., Hernández O., Arce G. y Vizuet J. (2016). Secado de nopal (*Opuntia ficus*) utilizando secador solar con sistema de reflectores. *Revista De Energía Química Y Física*, 3(6), 39-46.
- Torres-Gallo R., Miranda-Lugo P. J., y Martínez-Padilla K. A. (2017). Design and construction of a hybrid system of heating air by combustion of biomass and solar radiation, using phase change material (PCM) as a source of thermal storage, for cassava drying. *Tecnológicas*, 20(39), 71-83.
- Ullah F., Mansoor K. K., Min K., Ninghui L., Jun Y. and Xingsheng W. Numerical Simulation on Thermal Performance of Flat Plate Solar Collector with Double Glass Covers. *Journal of Applied Sciences*, 17 (10): 502 – 510, 2017.

- Valencia Alonso M. (2014). Diseño, construcción y evaluación de un prototipo de secador solar para el proceso de secado de tomate.
- Vázquez – Briones M. C. y Guerrero – Beltrán J.A. (2013). Recubrimientos de frutas con biopelículas. Temas selectos de Ingeniería de Alimentos 7 – 2 (2013):5-14
- Vieira J. C., Viana V. y Figueiredo R. (2016). Controle de temperatura do secador com incidência solar indireta utilizando micro controlador de baixo custo. Semana de Pesquisa e Extensão da Universidade Tiradentes-SEMPESq-SEMEX, (18).
- Yahia E. M. & Flores R. A. (2001). Tratamientos físicos en poscosecha de fruta y hortaliza.
- Zulkifle I, Alwaeli A. H. A., Ruslan H. M., Ibarahim Z., Hj Othman M. Y. & K. Sopian. (2018). Numerical investigation of V-groove air-collector performance with changing cover in Bangi, Malaysia. Case Studies in Thermal Engineering 12 (2018) 587–599. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2018.07.012>.