



inifap



SITS



Zacatecas
GOBIERNO DEL ESTADO
2021-2027

ESCENARIOS FAVORABLES PARA LA RÉPLICA Y ADOPCIÓN DE SISTEMAS DE SECADO SOLAR CON MIRADA AL DESARROLLO TERRITORIAL Y LA MITIGACIÓN DE LA PÉRDIDA Y DESPERDICIO DE ALIMENTOS

Néstor Manuel Ortiz-Rodríguez¹, Jesús Águila-León², Emilio De los Ríos Ibarra³

¹ Instituto de Energías Renovables, Universidad Nacional Autónoma de México. Privada Xochicalco s/n, Temixco CP. 62580, Morelos, México.

² Departamento de Estudios del Agua y de la Energía, Centro Universitario de Tonalá Universidad de Guadalajara, México.

³ Soluciones Integrales de Tecnologías Sustentables, Mérida, Yucatán, México.

*Autor de correspondencia: nmorr@ier.unam.mx

23 de noviembre de 2024

Resumen

En el presente documento se analizan los sistemas de secado solar como una solución sostenible para la mitigación de la pérdida y desperdicio de alimentos (PDA), especialmente para frutas y hortalizas, los cuales son productos altamente perecederos. Se aborda la importancia de estas tecnologías en la reducción del impacto ambiental, el mejoramiento de la seguridad alimentaria y el fortalecimiento del desarrollo territorial. Se destacan en este informe tres escalas de adopción tecnológica: pequeños productores, medianos productores y agroindustrias, ajustándose estas escalas a las capacidades y necesidades específicas de cada nivel. Además, se consideran también escenarios de temporalidad: producción continua, cosechas únicas y múltiples cosechas, para la selección de las tecnologías apropiadas. Los secadores tipo invernadero son los adecuados para pequeños productores, mientras que los sistemas híbridos y distribuidos benefician a la agroindustria. El análisis presentado en este informe subraya la importancia de estrategias como un financiamiento accesible, la capacitación técnica, las redes de colaboración y las adaptaciones tecnológicas según un contexto regional. La experiencia en Zacatecas obtenida por el proyecto demuestra que la implementación exitosa de estos sistemas es capaz de replicarse en otras regiones, generando así beneficios económicos, sociales y ambientales. Se concluye que los sistemas de secado solar son una herramienta clave para promover cadenas de valor sostenibles y reducir la PDA en comunidades agrícolas.

1. Introducción

1.1. Contexto y Antecedentes

Actualmente la humanidad se enfrenta a problemáticas de ámbito mundial como la inseguridad alimentaria (hambre), abasto de energía sustentable y el deterioro del medio ambiente (cambio climático). Una alternativa de solución para incidir simultáneamente en las problemáticas antes mencionadas consiste en reducir la pérdida y desperdicio de alimentos (PDA), incluida la pérdida post-cosecha, a lo largo de las diversas cadenas de producción y suministro (VijayaVenkataRaman, Iniyan, y Goic 2012) (Mustayen, Mekhilef, y Saidur 2014). Las frutas y hortalizas, fuentes esenciales de vitaminas, antioxidantes y fibra, son alimentos indispensables para la salud humana (Prasanna, Prabha, y Tharanathan 2007). Sin embargo, su alta perecibilidad y características fisiológicas las convierten en uno

de los grupos más vulnerables a las pérdidas post-cosecha, especialmente en regiones como Zacatecas, México.

La PDA en todo el sistema alimentario tiene un impacto negativo en el medioambiente debido al uso de energía, agua, tierra y otros recursos naturales relacionados a su la producción. Se estima que la PDA consume alrededor del 25% de toda el agua utilizada por la agricultura cada año (Searchinger et al. 2019); 23% de todas las tierras de cultivo, equivalente a todas las tierras de cultivo en África (Kummu et al. 2012); mientras que genera alrededor del 8% de las emisiones globales anuales de gases de efecto invernadero (GEI). Las huellas ambientales incrustadas en el desperdicio de alimento pueden afectar a su vez a la biodiversidad (FAO 2011) (FAO 2019). Según estimaciones de la FAO, la PDA representa pérdidas económicas que pueden ser de aproximadamente 490 mil millones de dólares por año (Hanson et al. 2017). La PDA también es un problema moral ya que casi el 12% de la población del mundo padece hambre (Lohnes y Wilson 2018) y alrededor del 25% tienen deficiencias nutricionales debido a la pobreza y los sistemas alimentarios poco desarrollados (Swinburn et al. 2019). Hoy en día, una de cada cuatro personas sufre de inseguridad alimentaria de moderada a severa, lo que significa que el acceso a la cantidad y calidad de alimentos esenciales no puede garantizarse constantemente durante todo el año (Damiani et al. 2021). La cantidad promedio mundial de desperdicio de alimentos per cápita por año contiene 18 dietas saludables, lo que significa que puede cumplir con la ingesta dietética diaria recomendada de 25 nutrientes para una persona durante 18 días (Chen, Chaudhary, y Mathys 2020). También se han identificado desafíos relacionados con la gestión de residuos, debido a los problemas ambientales y sanitarios que pueden provocar la degradación incontrolada de la fracción orgánica del desperdicio de alimentos. A pesar de las implicaciones sociales, ambientales y económicas, las PDA siguen siendo altas. Antes de la pandemia por COVID-19, se estimaba que cerca de un 30% de los alimentos del mundo se perdían o desperdiciaban cada año; esta estimación, aunque preliminar, permitió aumentar la conciencia sobre el tema (FAO 2011). Análisis más recientes estiman que se pierde un 14% de los alimentos producidos (FAO 2019). Sin embargo, un análisis cualitativo indica que la pérdida y desperdicio de alimentos ha empeorado durante la pandemia (FAO y CEPAL 2020).

Según datos de SEMARNAT con base a un estudio del Banco Mundial (2018), en México se ha calculado que se desperdician aproximadamente 20.4 millones de toneladas de alimentos al año, mismos que podrían cubrir la demanda de 7.4 millones de personas en pobreza y carencia alimentaria (SEMARNAT 2017). En México el promedio nacional de desperdicios fue de 37.11% (2013). La cantidad de alimentos desperdiciados en México genera 36 millones de toneladas de CO₂, lo que equivaldría a las emisiones anuales de 16 millones de vehículos, y por esta misma causa se estima la pérdida de 40 mil millones de litros de agua (SEMARNAT 2017).

En los países menos desarrollados, la mayoría de las pérdidas ocurren principalmente al principio de la cadena de valor, especialmente en el manejo y procesamiento post-cosecha (Chegere 2018). La Confederación Nacional de Agrupaciones de Comerciantes de Abasto (CONACA), en México, calcula que es en la etapa de post-cosecha la que representa mayores pérdidas en el país (CONACYT 2016). Las pérdidas en la cosecha y la post-cosecha tienden a ser mayores para los cultivos perecederos, como frutas y verduras, así como en las regiones de bajos ingresos (Fabi et al. 2020).

Las frutas y verduras son fuentes ricas en fitoquímicos, nutrientes y minerales (Yahia, Celis, y Svendsen 2017) (Brodowska 2017), con un claro impacto beneficioso para la salud humana (Veerman, Barendregt, y Mackenbach 2006). Sin embargo, se caracterizan por ser muy perecederas debido a su alto contenido humedad que oscila entre el 80 y el 95% (Aggarwal, Mohite, y Sharma 2018; Siddiqui, Sultana, y Das 2019). Alrededor de la mitad (45-55%) de la producción mundial se pierde o desperdicia desde el

momento en que se cosechan hasta que llegan a los consumidores, en comparación con el 35, 30 y 20% de los mariscos, cereales y carnes, respectivamente (Aggarwal, Mohite, y Sharma 2018) (Lufu, Ambaw, y Opara 2020), por lo tanto, las frutas y verduras son las que más contribuyen al desperdicio de alimentos y representan aproximadamente el 38% del desperdicio mundial de alimentos en masa (Chen, Chaudhary, y Mathys 2020). En México el promedio nacional de desperdicios fue de 37.11% (2013), entre los alimentos agrícolas más desperdiciados están guayaba (58%), mango (55%), aguacate (54%), plátano (54%) y nopal (53%) (FAO 2015b). La pérdida o desperdicio de frutas y verduras, no solo genera la pérdida del valor funcional, nutricional (Spiker et al. 2017) y económico de estos alimentos; sino también, el desperdicio indirecto de recursos (energía, agua, tierra) con un impacto negativo al medio ambiente (Chen, Chaudhary, y Mathys 2020). Además, se ha descubierto que la reducción de las pérdidas de alimentos, en especial de frutas y verduras, tiene el mayor impacto en la seguridad alimentaria (Kuiper y Cui 2020).

Los investigadores sostienen que las soluciones para mitigar la PDA no se pueden planificar e implementar para una etapa o aspecto específico de forma aislada, ya que requieren un enfoque participativo (Strotmann et al. 2017), deben ser sistemáticas (Tromp et al. 2016) y deben atender a los aspectos sociales, económicos y ambientales de la PDA (Alamar et al. 2018). Las soluciones que se destacan en las investigaciones de la PDA se pueden tipificar en términos generales como estrategias operativas, de comportamiento y relacionadas con las políticas (Chauhan et al. 2021). Entre las soluciones de tipo operacional importantes para la minimización de PDA destacan las estrategias de prolongar la vida útil y el impulso a la recuperación y reutilización en la industria alimentaria.

Los bancos de alimentos son una alternativas para mitigar la pérdida y desperdicio de alimentos, mediante el acopio y la redistribución de alimentos recuperados antes de su vencimiento (FAO 2015b). La recuperación de los alimentos desperdiciados para alimentar a las personas tiene el potencial de mejorar los resultados de salud humana, con impactos directos en la mejora de la seguridad alimentaria y nutricional y la sostenibilidad ambiental (Shafiee-Jood y Cai 2016). La recuperación de alimentos se considera una forma adecuada de gestionar los alimentos próximos a su fecha de caducidad y de mejorar las condiciones de las personas con inseguridad alimentaria (Muriana 2015). En 2018, la red de bancos de alimentos de México rescató mediante donaciones 118.2 ton de alimentos de los cuales el 44% fueron frutas y verduras (BAMX 2020). Sin embargo, este tipo de programas pueden atender más a las necesidades de los donantes que a las de los receptores y, por lo tanto, pueden proporcionar alimentos en cantidades, tipos o lugares no deseados o en momentos no deseados (Neff, Kanter, y Vandevijvere 2015). Alexander y Smaje reportaron que el 40% de los alimentos recuperados por un banco de alimentos más tarde fueron a los vertederos (Alexander y Smaje 2008). Además, la logística de redistribuir alimentos percederos limita las posibilidades de ampliar una cobertura más equitativa y prioritaria.

Una estrategia complementaria a la redistribución de alimentos “frescos” para evitar la PDA es la elaboración de nuevos productos mediante procesos de preservación. Los procesos de conservación, como el enlatado, la pasteurización, la esterilización, las tecnologías de embalaje y secado, contribuyen a prolongar el tiempo de conservación de los productos, lo cual reduce las pérdidas y el desperdicio en la cadena de alimentos (Langelaan et al. 2013). Mediante el enfoque de elaborar nuevos productos no sólo se disminuyen las pérdidas, sino también, se revalorizan los alimentos al brindar valor agregado para su comercialización. Entre los métodos de conservación, el secado tiene ventajas técnicas y el menor costo asociado para el procesamiento, envasado, transporte y almacenamiento en comparación con los alimentos enlatados y congelados (Rahman 2007). Además, un producto seco puede ser distribuido con una cobertura más amplia, equitativa y prioritaria.

El secado ciertamente puede recomendarse como una técnica simple y ampliamente utilizada para ayudar a mitigar la PDA. Sin embargo, el secado comprende una operación unitaria importante e intensiva en energía (Masanet et al. 2008), ya que la mayoría de los alimentos requieren el secado de al menos una parte del producto en alguna etapa durante el procesamiento (aproximadamente el 34% en peso de los productos del mundo, (Dev y Raghavan 2012)). Las técnicas de secado industrial existentes consumen entre el 10% y el 25% de la energía utilizada en la industria de procesamiento de alimentos (A.S. Mujumdar 2015), que se obtiene principalmente de fuentes de combustibles fósiles (Menon, Stojceska, y Tassou 2020). El secado por aire caliente o por convección (CD) es el método más sencillo y antiguo de secado de alimentos (H. Sabarez 2016). La mayor parte del secado en los países en desarrollo se realiza al sol o con aire caliente. Mientras en los países desarrollados, se practican numerosas técnicas de secado mejoradas, como secado en tambor, secado por aspersión, liofilización y secado por radiación infrarroja, etc (Hasan Masud et al. 2020a). Todos estos métodos plantean preocupaciones sobre su alto requerimiento de energía y su consecuente contribución de emisión de gases de efecto invernadero cuando provienen de fuentes de energía no renovable (Motevali, Minaei, y Khoshtagaza 2011; Motevali et al. 2014; Kaveh et al. 2020; Menon, Stojceska, y Tassou 2020). También, han surgido preocupaciones sobre la disponibilidad y retención de nutrientes esenciales y funcionales de protección contra enfermedades después de someterse a diferentes condiciones de procesamiento (Azeez et al. 2019). Ya que la calidad de los alimentos secos se ve afectada por el estado de los alimentos frescos, el método de preparación y las condiciones de secado (Oliveira, Brandão, y Silva 2016a; Karam et al. 2016; Omolola, Jideani, y Kapila 2017; Salehi y Aghajanzadeh 2020).

Desde un punto de vista medioambiental, los impactos negativos de las soluciones para reducir las PDA deberían ser menores que los beneficios (FAO 2015a). De aquí la importancia de la implementación de técnicas de conservación de alimentos basadas en energías renovables que ayuden a mitigar el problema de la PDA junto con la reducción de la presión sobre la energía mundial.

La energía solar se puede utilizar en varios procesos, como el secado, calefacción, cocción y destilación. En particular, el secado solar se ha usado en el sector agrícola para conservar granos, frutas y verduras (Lamidi et al. 2019). Además, de reducir las pérdidas de productos y prologar la vida de anaquel de los productos alimenticios. El secado solar ofrece otras ventajas, como alimentos nutritivos en comparación con los alimentos ultra procesados. De hecho, contiene una gran cantidad de vitaminas, fibra, minerales e hidratos de carbono, y un bajo contenido de grasa que los hace saludables (El Hage et al. 2018). Este atributo, es muy necesario en un país con problemas de salud como la obesidad y la diabetes, como México (OPS-OMS 2015).

Además, el secado brinda flexibilidad económica de los agricultores (El-Sebaii y Shalaby 2012), al contar con alternativas para preservar y revalorizar los excedentes agrícolas y los productos que no cumplen con los estándares de comercialización, ya que los excedentes se venden a precios bajos durante los períodos de cosecha y los productos de tercera calidad se abandonan en los campos agrícolas. También, el secado solar puede abrir nuevos mercados e ingresos en los que ofrece oportunidades de empleo. En la actualidad, la demanda de tecnología de secado está aumentando principalmente en las plantas medicinales, la agricultura y las industrias alimentarias (Prakash et al. 2016).

En este contexto, el uso de sistemas de energía solar para mitigar la pérdida en los procesos post-cosecha y generar valor agregado en los productos agropecuarios, resulta una solución integral para abatir simultáneamente las tres problemáticas (antes mencionadas). En especial, el uso energía solar para la deshidratación de productos perecederos del sector agropecuario.

1.2. Importancia de los Sistemas de Secado Solar

El secado de alimentos es una técnica ancestral que ha evolucionado con la integración de tecnologías modernas. Este proceso, que implica la reducción de la humedad en productos frescos, es crucial para prolongar su vida útil, reducir pérdidas y agregar valor a los alimentos. A diferencia de métodos intensivos en energía como el secado por aire caliente o la liofilización, el secado solar ofrece una alternativa económica y ambientalmente sostenible, especialmente en países con altos niveles de irradiación solar, como México.

En el Estado de Zacatecas, una implementación extensiva de sistemas de secado solar no solo podría reducir las pérdidas de los productos vegetales frescos, sino que también tiene el potencial de transformar la dinámica económica y social de las comunidades rurales. Para los pequeños productores de la región, estas tecnologías abren la posibilidad de conservar excedentes, revalorizar productos hortícolas rechazados por el mercado fresco y de acceder a nuevos mercados a través de productos revalorizados mediante el secado solar. Para el sector de la agroindustria, estas tecnologías representan una solución eficiente para el manejo de volúmenes grandes de producción y para la diversificación de productos procesados.

El secado solar además de su impacto económico tiene beneficios importantes para la sostenibilidad ambiental. Al utilizar fuentes de energía renovable, se contribuye a la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y se disminuye la dependencia a combustibles fósiles en los procesos de conservación y procesamiento de alimentos (Motevali, Minaei, y Khoshtagaza 2011; Rahman 2007).

1.3. Objetivos del informe

El presente informe tiene como objetivo el analizar los escenarios favorables para la réplica y adopción de sistemas de secado solar en Zacatecas, con un enfoque específico en:

1. **Tecnologías apropiadas según la escala del proyecto:** Identificar las soluciones adecuadas para los pequeños productores rurales y agroindustrias considerando sus capacidades económicas, necesidades técnicas y el contexto regional al que se enfrentan.
2. **Temporalidad del secado:** Evaluar la influencia de la estacionalidad de productos hortícolas en la implementación y la operación de los sistemas de secado solar, así como proponer estrategias para la maximización de su efectividad durante los picos de cosecha.

Este análisis no solo busca la mitigación de las pérdida y desperdicio de alimentos en Zacatecas, sino también el establecer un modelo replicable en otras regiones del país, promoviendo el desarrollo territorial sostenible y fomentando cadenas agroalimentarias resilientes y eficientes.

2. Marco teórico y conceptual

2.1. Sistemas de Secado Solar y sus principios fundamentales

Los sistemas de secado solar representan una tecnología esencial para la reducción de pérdidas postcosecha en la cadena de valor agrícola, especialmente en frutas y verduras, que son altamente perecederas. Estos sistemas funcionan a partir del aprovechamiento de la energía solar para extraer humedad de los productos mediante transferencia de calor y masa, lo que prolonga su vida útil, en algunos casos conserva sus propiedades nutricionales y organolépticas, y facilita su transporte y comercialización.

Clasificación de los sistemas de secado solar

El uso de la energía solar para el secado puede realizarse mediante el tradicional secado al sol a cielo abierto o con sistemas de secado solar mejorados. El secado solar a cielo abierto es un proceso que se practica en todo el mundo donde los alimentos están expuestos al viento y los rayos solares. En este método, la energía térmica radiante que proviene del sol se utiliza para secar los alimentos. Los alimentos se esparcen en una fina capa por todo el suelo o sobre las bandejas. Este método aún sigue siendo utilizado por agricultores rurales, sin embargo, tiene limitaciones inherentes: las grandes pérdidas de cosechas se producen por el secado inadecuado, ataques de hongos, insectos, invasión de aves y roedores, lluvia inesperada y otros efectos meteorológicos (Ekechukwu y Norton 1999) (Norton 2021), así como de la intermitencia de la radiación solar. Estas limitaciones conllevan a obtener un producto de baja calidad que en la mayoría de los casos no cumple con la inocuidad mínima y disminuye la posibilidad del productor agropecuario para negociar un precio competitivo. Además, se requieren largos períodos de secado, grandes áreas para extender el producto a secar y una gran cantidad de horas-hombre implicadas en el proceso.

Los sistemas de secado solar (SSS) mejorados o tecnificados evitan algunos de los principales inconvenientes del secado solar tradicional. Sin embargo, persiste el inconveniente de la dependencia de la intensidad de la radiación solar que no siempre está disponible y es intermitente. Para abordar este inconveniente se pueden usar SSS híbridos, en los que la energía solar se combina con otras fuentes de energía, como el combustible fósil (Ortiz-Rodríguez et al. 2020), la biomasa (Hamdani, Rizal, y Muhammad 2018a) y la geotermia (Ananno et al. 2020). Otra alternativa es la integración de sistemas de almacenamiento de energía termosolar.

Los SSS se clasifican, en términos generales, en dos grandes grupos: sistemas activos (convección forzada) y sistemas pasivos (convección natural) (Ekechukwu y Norton 1999). En convección natural (NC) el movimiento del aire ocurre por diferencias de densidad dentro de la cámara de secado. En la convección forzada, (FC), el movimiento de aire a lo largo de la cámara de secado se logra mediante un extractor de aire o ventilador alimentado eléctricamente mediante la red o con paneles fotovoltaicos. Se pueden identificar tres subclases distintas de los sistemas de secado solar activo o pasivo. Estas subclases varían principalmente en la disposición de diseño de los componentes del sistema y el modo de aprovechamiento del calor solar para el calentamiento del producto: secadores solares de tipo **distribuido, integral y mixto** (Ekechukwu y Norton 1999), (Fudholi et al. 2010), (Prakash y Kumar 2013), (Kumar y Khatak 2016). Los dos primeros también son denominados secadores solares en modo **indirecto y directo**, respectivamente. En el presente trabajo se usa la denominación de secadores distribuidos e integral, con el objetivo de diferenciar con los términos de calentamiento directo e indirecto de aire. El modo distribuido es aquel en el que el colector solar y la cámara de secado son unidades separadas. Mientras que en el modo integral la unidad de captación de energía solar es una parte integral de la cámara de secado. El modo mixto combina algunas características de los tipos distribuidos e integral, por lo tanto, los productos a secar están expuestos directa e indirectamente a la energía solar. En la Figura 1 se esquematiza la clasificación de secadores solares.

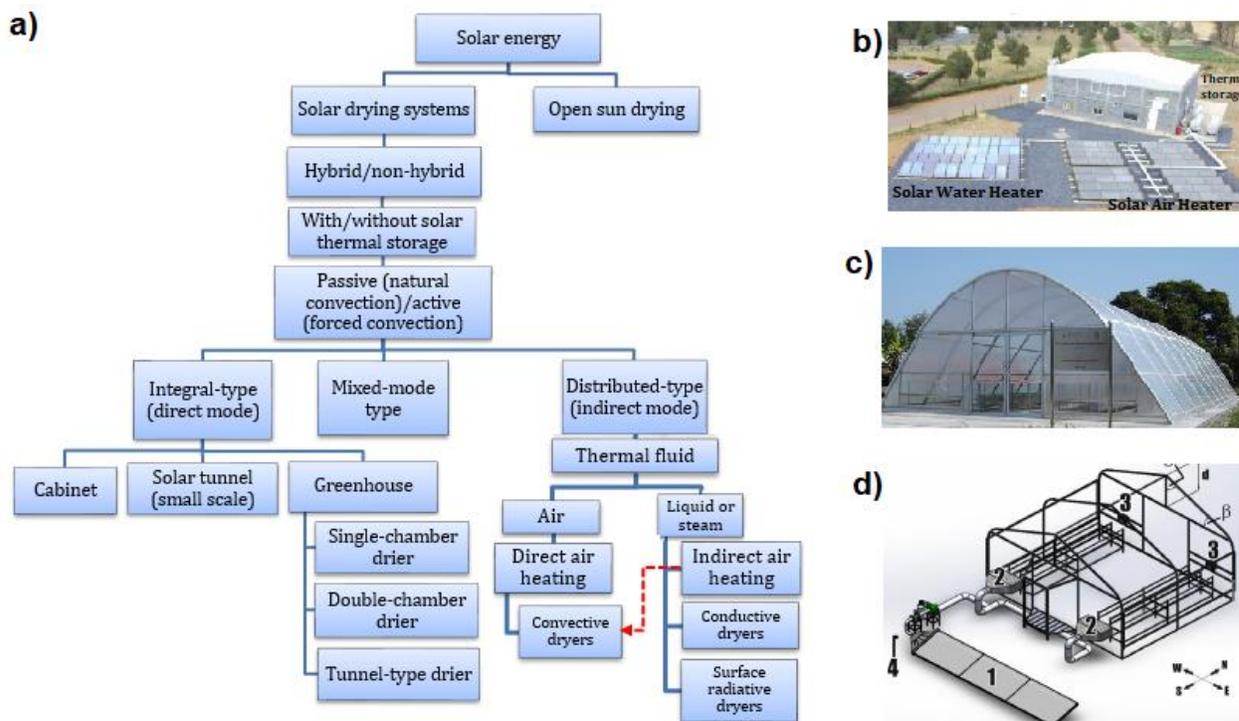


Figura 1 a) Clasificación de los secadores solares. Sistemas de secado solar: b) distribuido con calentamiento directo e indirecto de aire (García-Valladares et al. 2020b), c) integral tipo invernadero (Serm Janjai 2012) y d) mixto (Román-Roldán et al. 2019).

Secadores solares distribuidos

En los Secadores Solares Distribuidos (SSD), la radiación solar incide sobre un colector y calienta un fluido de trabajo que pasa en su interior. Normalmente, el fluido de trabajo usado en las aplicaciones de secado es el aire. Los DSD que utilizan aire, se denominan Sistemas de Secado Solar de Calentamiento Directo de Aire (SSS-CDA). Mientras, los que utilizan un fluido líquido o vapor para calentar indirectamente el aire como medio de secado, se denominan Sistemas de Secado Solar de Calentamiento Indirecto de Aire (SSS-CIA) (García-Valladares et al. 2019) (Ortiz-Rodríguez et al. 2020).

En los SSS-CDA de gran capacidad, el aire ingresa a los colectores solares mediante convección forzada de un ventilador que trabaja a succión y pasa a través de ellos aumentando su temperatura. Posteriormente, un sistema de ductos recoge el caudal de aire del campo de colectores solares y lo direcciona hacia la cámara de secado. Normalmente, estos sistemas cuentan con filtros a la entrada de los colectores para evitar la entrada de polvo e insectos al sistema. En los SSS-CIA se requiere de equipos auxiliares (intercambiadores, termotanques, bombas, etc) con la finalidad de calentar indirectamente el aire necesario para el secado. En ambos sistemas, el aire caliente fluye a través de la cámara de secado en contacto con la superficie del producto húmedo y elimina la humedad.

Las cámaras de secado para los SSD básicamente pueden ser de tipo gabinete, túnel y rotativo. Los secadores solares estilo gabinete para producir productos agrícolas secos de alta calidad ha sido ampliamente evaluada, sin embargo, son nulos los trabajos reportados en otros tipos de secadores. Uno de los principales problemas en las operaciones de secado es la falta de uniformidad en el contenido de humedad del producto seco final, que es más evidente en los sistemas de secado industrial a gran escala (H. T. Sabarez 2018). La cámara de secado en secadores convectivos debe ser diseñada para permitir que

el aire caliente fluya homogéneamente sobre el material de secado mediante la orientación y distribución adecuada del aire que permita una distribución uniforme de la temperatura y de secado.

Los SSD en modo activo han sido reportados superiores en velocidad de secado y calidad de secado (Kumar y Khatak 2016; El-Sebaai y Shalaby 2012); además son los más adecuados para secar grandes cantidades (Belessiotis y Delyannis 2011). Estos sistemas de secado tienen las siguientes ventajas: menor tiempo de secado, mayor control en la humedad final del producto, menores pérdidas por las inclemencias del tiempo, una capacidad de carga compacta y mayor productividad (kg/h). Su principal desventaja es el alto costo de capital inicial para la cámara de secado, el campo del colector y todo el equipo auxiliar necesario, como ductos, tuberías, ventiladores, instrumentos de medición y control. Además, se requiere de personal calificado para operar el proceso de secado (Belessiotis y Delyannis 2011), (Patil y Gawande 2016). Se puede encontrar una revisión de la literatura sobre SSD para el secado de alimentos en (Shrivastava, Kumar, y Baredar 2014) (A. B. Lingayat et al. 2020).

Secadores solares integrales

En los secadores solares integrales (SSI), se utilizan cubiertas transparentes o translúcidas para permitir la transmisión de la radiación solar directamente sobre los productos a secar. En estos secadores, las pérdidas por convección del viento se reducen por la cubierta y, por lo tanto, se puede aumentar la temperatura en su interior. Se pueden clasificar básicamente por la cámara de secado en secadores tipo gabinete, túnel solar e invernadero. Al igual que los SSD, los SSI tipo invernadero tienen un gran potencial ya que puede ser utilizado a escala industrial debido a su capacidad de procesamiento de producto (S. Janjai et al. 2009). Sin embargo, a diferencia de los SSD se caracterizan por ser de bajo costo, fácil de fabricar y de diseño simple (Prakash y Kumar 2014). Además, el invernadero puede funcionar como sistema de cultivo o como secador en periodos desfasados. La multifuncionalidad mejora la tasa de retorno de la inversión inicial. Por ejemplo, en México en algunos sistemas de producción de chiles para consumo en seco, se utilizan invernaderos como almácigos durante la producción de las plántulas (diciembre-abril) y como sistemas de secado durante la temporada de cosecha (agosto-noviembre), ver Figura 2 A y B.

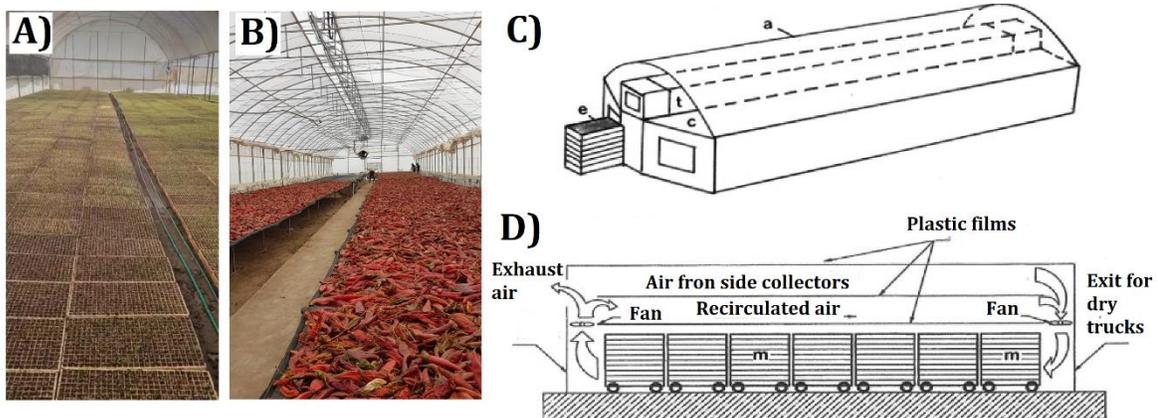


Figura 2 Invernadero multifuncional: A) almácigo y B) secador. C) Túnel de secado cubierto por lámina de plástico transparente, con carros para el material. D) Sección transversal del secador de túnel

Para el secador de invernadero en modo activo, existen dos fuentes de energía, a saber, el déficit de saturación del aire y la radiación solar global incidente (Condorí y Saravia 1998). Los secadores solares tipo invernadero en modo de convección forzada son adecuados para cultivos con alto contenido de

humedad, mientras en modo convección natural son mejor para los cultivos con bajo contenido de humedad (Singh, Shrivastava, y Kumar 2018).

Normalmente, las cubiertas de los invernaderos se prefieren de policarbonato alveolar porque tienen espacios de aire entre sus capas que funcionan como un aislante para mitigar la pérdida de calor con el ambiente. Además, se ha demostrado que policarbonato puede proteger la calidad de los productos de la radiación UV (Arekornchee, Uthai, y Phataweerat 2014). Respecto al piso se prefiere para aplicaciones comerciales de concreto que permite una mayor inocuidad y un mejor manejo de los productos a secar. Además, el concreto funciona como un material de almacenamiento térmico que va dosificando durante la noche la energía sensible acumulada durante el día (Ortiz-Rodríguez et al. 2021). El material a secar en el invernadero, normalmente se acomoda en mesas hechas de malla, de tal forma, que se forme una capa fina de producto y el aire caliente pueda estar en contacto con el producto tanto por arriba como por abajo. También suele poner el producto sobre láminas de plásticas en el piso de tal manera que se maximice el área de captación solar y se tenga una mayor productividad por área. En algunas ocasiones el producto se pone en estantes verticales con múltiples bandejas, para aumentar la productividad por área. No obstante, tanto sobre el piso como en estantes, se puede llegar a tener secado no uniforme debido a la no uniformidad del calentamiento y la circulación del aire. Se puede encontrar una revisión de la literatura sobre SSI tipo invernadero en (Singh, Shrivastava, y Kumar 2018) (Srinivasan y Muthukumar 2021) (Mhd Safri et al. 2021).

En la Tabla 1 se presenta un resumen comparativo entre los SSD y el SSI tipo invernadero.

Tabla 1 Comparación entre los SSD y los SSI tipo invernadero

Criterio	SSI tipo invernadero	SSD
Económico	Simple y menos costoso de fabricar que el secador indirecto para la misma capacidad.	Complejo y más costoso de fabricar debido a los diferentes componentes (colectores, cámara de secado y equipos auxiliares).
Fenómeno de transporte de calor dominante.	La transferencia de calor radiativa es el fenómeno dominante. Algunos diseños cuentan con dispositivos para promover la convección forzada, sin embargo, las mismas dimensiones del invernadero y el acomodo del producto a secar en una sola capa limitan el contacto convectivo del aire en la superficie del producto a secar.	En estos sistemas depende del tipo de secador al cual este acoplado: convectivo, conductivo y radiativo. En los secadores convectivos se puede lograr una mayor velocidad del aire en contacto con el producto a secar debido a la mayor densidad volumétrica del producto por área de cámara de secado. Sin embargo, esto se logra a expensas de un alta caída de presión en sistema en comparación los invernaderos.
Eficiencia de transferencia de calor.	La radiación solar se aprovecha de forma eficiente al incidir directamente la energía sobre el producto y no requerir de un medio de transferencia de calor.	La eficiencia energética del sistema de secado depende de la eficiencia térmica de cada uno de sus componentes, así como del aislamiento de los mismos para minimizar las pérdidas de energía.
Eficiencia de secado.	Menor eficiencia de secado. Normalmente, las velocidades del aire en las proximidades del producto a secar son bajas en comparación con SSD.	Mayor eficiencia de secado. Mayor absorción de humedad por kg de aire seco.
Potencia del sistema de ventilación	La potencia requerida para la convección forzada del aire al interior de un secador requiere motores de baja potencia menores 2 HP.	La potencia requerida para la convección forzada del aire en todo el sistema requiere motores de alta potencia mayores a 2 HP.
Versatilidad de operación la mayor parte del año.	El uso de la infraestructura del invernadero la mayor parte del año para cultivo o secado mejora los beneficios económicos.	Si los productos a secar son estacionales, la infraestructura no tiene la versatilidad de poder operar todo el año.
Capacidad de carga de la cámara de secado (kg de producto/m ² de cámara de secado).	Para un secado uniforme se requiere que el producto a secar este expuesto a la luz solar. Por lo tanto, el área de secado es menor o igual a la superficie del invernadero. Recordando que la cámara de secado en el interior del invernadero. En este sentido, la densidad de carga es pequeña en comparación con los SSD.	Para un secado uniforme se requiere una buena distribución del flujo de aire y un acomodo uniforme del producto a secar (idealmente capa fina). La densidad de carga es mayor, ya que normalmente se cuenta con estantes de secado que contienen varias bandejas (m ²) separadas en la misma área dentro de la cámara de secado. Esto incrementa el área de secado por m ² de la cámara de secado.
Espacio para una misma capacidad de producción	Requieren mayor área que el área requerida para la cámara de secado de los SSD.	Requieren menor área de cámara de secado. Sin embargo, normalmente requieren una mayor área de captación solar.

Control	La temperatura y humedad al interior se puede controlar variando la renovación del aire. Sin embargo, es más complicado controlar la velocidad del aire en las proximidades del producto. Así como temperatura del mismo.	Se puede tener un mayor control de las variables de entrada de operación del proceso (flujo de aire, temperatura y humedad).
Calidad del producto	Algunos parámetros de calidad del producto, especialmente el color, se deterioran cuando el producto se expone directamente a la luz solar o al sobrecalentamiento.	El producto a secar no se encuentra expuesto a la luz solar, por lo tanto, algunos componentes fotosensibles de los alimentos no sufren cambios significativos en especial los responsables del color.
Intermitencia de radiación diurna.	Son menores susceptibles a los cambios bruscos en el comportamiento inestable de la radiación en días altamente nublados. Ya que son capaces de amortiguar los cambios de temperatura debido a la gran inercia térmica. Por lo tanto, los secadores tipo invernaderos pueden operar durante varios días con nubosidades esporádicas sin generar condiciones desfavorables en su recinto.	Son más susceptibles a los cambios bruscos en el comportamiento de la radiación. Ya que son menos capaces de amortiguar los cambios de temperatura, de tal manera, que pueden promover la pérdida de energía al inyectar aire fresco a un sistema caliente sin ganancia de energía. Es obvio, que un control para apagar y encender el sistema podría ayudar, sin embargo, poco practica y no recomendable para motores de gran potencia (par de arranque).

Secado continuo con respaldo de energía

Los principales aspectos a lograr en el secado de gran capacidad son minimizar el tiempo de secado y satisfacer el requisito de calidad del producto. Es importante mantener la tasa de secado lo más alta posible y asegurar una producción continua, ya que el utilidades económicas está directamente relacionado con los costos de secado por kilogramo de producto seco (Condorí et al. 2017). Además, las mayorías de industrias de secado existente requieren un flujo de energía continuo durante las 24 horas, los 365 días del año. En consecuencia, los SDS deben integrar sistemas de respaldo de energía para garantizar el secado continuo.

El secado continuo se refiere a mantener una tasa de remoción de la humedad mínima hasta alcanzar el contenido de humedad deseado y bajo condiciones seguras que eviten el crecimiento microbiano. En particular, las prácticas de secado inapropiadas y subóptimas a lo largo de la cadena de valor de los alimentos han provocado pérdidas significativas de ingresos; además el secado deficiente también ha contribuido a la contaminación por aflatoxinas, un importante problema de seguridad alimentaria y salud pública (Udomkun et al. 2020). Las aflatoxinas son metabolitos secundarios producidos hongos a una temperatura en el rango de 12 a 40 °C y son compuestos altamente tóxicos. Esta es una de las razones por las que el proceso de secado debe continuar hasta que el producto alcance la humedad de almacenamiento segura. También es importante asegurarse de que un secador no desarrolle una condición de funcionamiento que promueva el crecimiento microbiano. Por ejemplo, un secador solar puede desarrollar una condición propicia para el crecimiento de moho, especialmente por la noche (Chiewchan, Mujumdar, y Devahastin 2015).

Incluso en un secador con suministro continuo de energía se puede operar en condiciones favorables (baja temperatura, oscuridad y alta humedad) para el crecimiento de microorganismos como hongos. Por lo tanto, el suministro de energía durante el secado debe garantizar las condiciones adecuadas de temperatura y humedad relativa. Para un secado continuo se requiere un suministro continuo de energía

en especial en productos con alto contenido de humedad y con tiempos de secado prologados (>6 h). Esto representa un desafío para los SDS altamente dependientes del recurso solar de naturaleza periódica e intermitente. Además, la intensidad de la radiación incidente adecuada ($\approx 600 \text{ W/m}^2$) para el encendido de los SDS solo está disponible cuando mucho hasta 6 horas al día (entre los trópicos). Cabe destacar, que la intensidad y las horas sol disponibles también varían por lo cambios estacionales y por la posición geográfica de un país en particular.

En los SDS el proceso de secado se puede interrumpir por baja irradiación (nubosidad o contaminación atmosférica), por las lluvias repentinas y por la noche cuando la radiación solar no está disponible, resultando en un proceso intermitente de secado, y, por consiguiente, puede resultar en una mala calidad del producto. Para superar estos inconvenientes se puede integrar un sistema de almacenamiento térmico a los SDS como respaldo de energía. En estos esquemas partes de la energía solar recibida por los colectores solares es almacenada para usarse posteriormente en las horas de baja o nula radiación solar. Como ya se ha discutido en secciones anteriores, los STES son preferibles, no obstante, tienen su propia lista de limitaciones. El almacenamiento de calor es esencial para cumplir con el requisito de demanda de calor continuo (Ismail, Yunus, y Hashim 2021). Sin embargo, para procesos que continúan durante la noche o durante periodos de insolación insuficiente, frecuentemente se ha encontrado que proporcionar calefacción auxiliar es más viable económicamente que proporcionar suficiente almacenamiento de energía que permitiría lograr fracciones solares cercanas a la unidad (Norton 2021).

Aunque algunos autores manejan el término secado solar híbrido para señalar las diferentes combinaciones con el tipo de energía (térmica y eléctrica), tipo de fuente (renovable y no renovable) y tipo de tecnología (infrarrojo, bomba de calor, microondas, etc). En sistemas de secado con un mix energético se puede distinguir entre: i) los sistemas de secado convencionales asistidos con energía solar y ii) los sistemas de secado solar híbridos. En los primeros básicamente el diseño se realiza para integrar tecnologías de energía solar como respaldo a los procesos convencionales de secado. En los segundos se diseñan sistemas de secado para operar con tecnologías de energía solar y en los cuales las otras fuentes de energía son un respaldo o auxiliar. En el presente trabajo se hace una clara distinción del concepto secado solar híbrido como aquellos SDS que integran unidades auxiliares energía térmica de otras fuentes energéticas renovables y no-renovables con la finalidad de complementar la energía necesaria que garantice el secado continuo. En las unidades auxiliares con fuentes no renovables se prefieren los combustibles gaseosos como GLP y gas natural en comparación con los sólidos y líquidos. Esto se debe a la combustión más completa y a la flexibilidad para el control y automatización en los tiempos arranque y paro debidos a los cambios de demanda de energía. En los secadores convectivos el aire puede calentarse directa o indirectamente en las unidades auxiliares de energía. En el calentamiento directo los gases de combustión se mezclan con el aire que se usa como medio de secado; mientras, en el indirecto los gases de combustión transfieren su calor indirectamente al aire un intercambiador de calor. En la industria se prefieren las unidades auxiliares de calentamiento directo usando combustibles gaseosos debido a la mayor eficiencia energética, salvo en los casos de existir una normatividad que los prohíba. No obstante, además del impacto negativo al medio ambiente, también se tiene la desventaja de abasto en zonas aisladas y a la inestabilidad de los precios. Por lo tanto, dependiendo de la rentabilidad del proyecto se debe hacer un esfuerzo por la integración de fuentes renovables.

Existen unidades auxiliares con calentamiento por resistencia en las cuales se produce energía térmica al pasar una corriente eléctrica a través de un conductor diseñado específicamente. El uso de estos es limitado ya que en la mayoría de los casos el suministro eléctrico proviene plantas convencionales y es más costosa la electricidad. No obstante, la electricidad de los auxiliares eléctricos puede provenir de fuentes renovables como la solar y eólica; permitiendo lograr un sistema de secado 100% de fuentes renovables. Otras unidades auxiliares con fuentes renovables es el uso bombas de calor geotérmicas y

quemadores de biomasa. En el caso bombas de calor geotérmicas, el calor se obtiene de las corrientes de pozos geotérmicos, agua subterránea caliente y calor residual recuperado de una planta geotérmica. Los activos geotérmicos de baja a media entalpía con temperaturas inferiores a 150 °C pueden ser potenciales para las aplicaciones de secado (Hasan Masud et al. 2020b). En estos sistemas se requiere el uso de un intercambiador de calor para el calentamiento indirecto del aire. En los quemadores de biomasa se realiza la combustión de subproductos agrícolas y forestales para el calentamiento del aire. Cuando se trata de productos alimenticios se prefiere el calentamiento indirecto del aire con intercambiadores de calor, mientras, en algunos productos agroindustriales como el caucho se ha reportado el uso de calentamiento directo con los gases de combustión (Dejchanchaiwong et al. 2017). Los quemadores de biomasa tienen la capacidad para utilizar recursos locales baratos para ayudar con los requisitos de energía y tener un bajo costo de construcción y operación. También, se puede dar un mejor manejo a los residuos de alimentos y las partes no comestibles de los productos agrícolas, ya que se pueden utilizar en sistemas de conversión de energía como la producción de biogás y los biocombustibles (Giroto, Alibardi, y Cossu 2015) (Dahiya et al. 2018) (Esparza et al. 2020). Estos nuevos productos pueden suministrar la energía de las unidades auxiliares en los SDS. Más información respecto a otros tipos de tecnología híbrida de secado solar se puede consultar la revisión reciente de (Jha y Tripathy 2020).

Se han diseñado y desarrollado varios tipos de secadores solares híbridos utilizando calentadores eléctricos ((Nonclercq et al. 2009), (Boughali et al. 2009), (Wang et al. 2018)), biomasa ((Prasad et al. 2006), (Dhanuskodi, Wilson, y Kumarasamy 2014), (Yassen y Al-Kayiem 2016), (Hamdani, Rizal, y Muhammad 2018b)) y LP o natural quemadores de gas ((Smitabhindu, Janjai, y Chankong 2008), (Gudiño-Ayala y Calderón-Topete 2014), (Oueslati, Ben Mabrouk, y Marni 2014), (Anum, Ghafoor, y Munir 2017), (Anum, Ghafoor, y Munir 2017), (Zoukit et al. 2019), (Amjad et al. 2020)) para secar diversos productos alimenticios. También se han desarrollado secadores solares híbridos que integran un sistema de almacenamiento térmico (biomasa: (Madhlopa y Ngwalo 2007), (Leon y Kumar 2008), eléctrico: (Hossain, Amer, y Gottschalk 2008), (Amer, Hossain, y Gottschalk 2010), (Reyes, Mahn, y Vásquez 2014), (Daghigh y Shafieian 2016), gas LP: (Murali et al. 2020)). Las obras anteriores se caracterizan porque la mayoría de secadores solares tienen una capacidad de carga baja (<50 kg) y un área de captación solar de menos de 20 m². Smitabhindu y colaboradores desarrollaron un modelo de optimización de un SDS híbrido (gas GLP) combinado con un modelo económico. Los resultados arrojaron valores óptimos del área del colector de 26 m² para una capacidad de secado de 250 kg de banano (Smitabhindu, Janjai, y Chankong 2008). En la mayoría de los trabajos antes mencionados no se evaluó la operación de secado del producto de forma continua durante las horas sin sol. En consecuencia, tales diseños no son apropiados para el procesamiento de alimentos a escala semi-industrial o industrial, en donde el suministro de energía debe ser constante para garantizar una operación continua y una mayor productividad.

Los SDS que integran respaldos de energía con almacenamiento térmico y/o fuentes auxiliares se pueden utilizar para el secado continuo y reducir así la cantidad total de energía proveniente de combustibles convencionales. Cabe señalar, que requieren sistemas para controlar el campo de captación solar, el sistema de almacenamiento/auxiliar de energía y el mismo proceso de secado. Por lo tanto, los SDS con respaldo de energía incrementaran pueden aumentar los costos de capital de inversión y mantenimiento.

2.2. Innovaciones en procesos de secado

Enfoque de Innovación para la eficiencia energética

La búsqueda de innovaciones en los procesos de secado se centra en optimizar el uso de recursos energéticos, reducir los costos operativos y garantizar una mayor sostenibilidad. Los sistemas tradicionales de secado, aunque efectivos en ciertas escalas, suelen enfrentar desafíos relacionados con la intermitencia de la radiación solar, la dependencia de combustibles fósiles y la falta de control preciso sobre las condiciones de secado.

Existen muchos métodos de secado convencional, como la convección forzada de aire caliente (HACD), el secado al vacío (VD), liofilización (FD) y secado a cielo abierto (OSD). Sin embargo, la mayoría de estas técnicas implican un tiempos de secado prolongados y una gran cantidad de energía (Moses et al. 2014); lo que resulta en una mala calidad de los productos secos (Oliveira, Brandão, y Silva 2016b), (Omolola, Jideani, y Kapila 2017) (a excepción de FD (Aydin y Gocmen 2015)). Más del 85% de los secadores industriales son de tipo HACD (Arun S. Mujumdar 2006), porque son mucho más simples y fáciles de operar, además de su menor costo de capital (por el momento) (H. T. Sabarez 2018). Sin embargo, tienen una eficiencia energética menor al 50% (Tsotsas y Mujumdar 2011) y contribuyen al 90% de los costos generales del proceso de producción (Kluczek y Olszewski 2017). La ineficiencia del HACD se debe principalmente al uso de aire como agente intermedio para el transporte del calor y a la energía perdida en el aire parcialmente humidificado en la descarga (Berk 2018). Los secadores térmicos empleados en las industrias de procesamiento de alimentos aprovechan la energía térmica derivada de la electricidad o de los recursos energéticos convencionales (Jha y Tripathy 2017). Una forma comúnmente utilizada en los países en desarrollo es calentar el aire con una llama directa (los gases de combustión están en contacto con los alimentos deshidratados) o con resistencias eléctricas. En los secadores convectivos convencionales que usan energía eléctrica la eficiencia energética máxima ideal que se puede alcanzar es de coeficiente de desempeño (COP, por sus siglas en inglés) de 1. Sin embargo, desde un enfoque de eficiencia energética el COP puede aumentar con el uso de bombas de calor. Existe una tendencia hacia la intensificación del proceso de secado a bajas temperaturas mediante tecnologías no convencional como secado con bomba y por microondas; así como de tecnologías emergentes basadas en electrotecnología, calentamiento óhmico y ultrasonido (Menon, Stojceska, y Tassou 2020), (Acar, Dincer, y Mujumdar 2020), (H. Sabarez 2021a). Estas tecnologías se caracterizan por el uso intensivo de electricidad.

Integración de bombas de calor en procesos de secado

Los secadores tipo bomba de calor (HPD, por sus siglas en inglés) se han consolidado como una alternativa eficiente y sostenible frente a los secadores convencionales de aire caliente para la deshidratación de alimentos. Una de sus principales ventajas es su alta eficiencia energética, alcanzando hasta un 95%, en comparación con otras tecnologías como el secado al vacío que alcanza menos del 70% ; y los secadores de aire caliente que alcanzan entre un 35% y 40% (Perera y Rahman 1997). Esto se debe a la capacidad de los sistemas HPD para utilizar calor del ambiente o residual y usarlo durante el proceso de secado (H. Sabarez 2021b).

Aunque las bombas de calor pueden funcionar con energía térmica o eléctrica, las impulsadas por electricidad son las más comunes y accesibles en aplicaciones comerciales. La descarbonización del proceso de secado es esencial, en el ámbito industrial se proyecta una creciente adopción de tecnologías emergentes impulsadas por electricidad proveniente de fuentes de energía renovable distribuida, como la fotovoltaica, eólica y geotérmica (Ortiz-Rodríguez et al. 2022a). Por tanto, los secadores HPD representan una tecnología innovadora y respetuosa con el medio ambiente para la industria alimentaria,



inifap



SITS



Zacatecas
GOBIERNO DEL ESTADO
2021-2027

contribuyendo a la reducción del consumo energético y la huella de carbono en los procesos de secado (Defraeye 2014).

Clasificación de secadores tipo bomba de calor

Los sistemas HPD se dividen en categorías según su diseño y modo de operación, cada uno optimizado para diferentes aplicaciones:

1. Ciclo cerrado: Recirculan el aire dentro de la cámara de secado, maximizando la recuperación de calor.
2. Ciclo abierto: Utilizan aire fresco del ambiente, pero su eficiencia depende de las condiciones climática.
3. Ciclo parcialmente abierto: Combinan recirculación con ingreso de aire fresco, logrando eficiencias superiores al 39%.
4. Fuente de aire: Integran energía solar u otras fuentes renovables para aumentar la sostenibilidad del proceso.

Principios de funcionamiento y ventajas del ciclo parcialmente abierto

El ciclo parcialmente abierto, utilizado en aplicaciones agroindustriales, es una opción destacada por su balance entre eficiencia energética y control de calidad:

- Recuperación de calor: Intercambiadores aire-aire optimizan el uso de energía al transferir calor del aire húmedo expulsado al aire fresco entrante.
- Control avanzado: Reguladores de humedad y temperatura aseguran un proceso uniforme y acelerado.
- Reducción de costos: La reutilización de calor minimiza la necesidad de energía adicional, favoreciendo la sostenibilidad económica del sistema.

Componentes de un secador tipo bomba de calor

1. Compresor: Eleva la temperatura del refrigerante para transferir calor al aire del secador.
2. Condensador: Calienta el aire utilizado en el secado.
3. Evaporador: Extrae calor del aire expulsado y del ambiente.
4. Intercambiador de calor: Maximiza la eficiencia energética mediante la recuperación de calor.
5. Cámara de secado: Diseñada para flujos de aire controlados y uniformes.
6. Controladores avanzados: Garantizan condiciones óptimas durante el proceso.

Impacto y perspectivas

La incorporación de bombas de calor en procesos de secado no solo reduce el impacto ambiental, sino que también promueve la adopción de tecnologías avanzadas en el sector agrícola:

- Sostenibilidad: Al integrarse con fuentes de energía renovable, las HPD permiten procesos de secado 100% sostenibles.
- Réplica tecnológica: Su diseño modular facilita la adopción en distintas escalas productivas, desde pequeños agricultores hasta agroindustrias.
- Reducción de pérdidas: Al garantizar un secado continuo y uniforme, las HPD minimizan los riesgos de contaminación microbiana y pérdida de calidad.

La implementación de secadores tipo bomba de calor representa una solución integral para optimizar los procesos de deshidratación en cadenas agrícolas, promoviendo la eficiencia energética, la sostenibilidad y la competitividad en mercados locales e internacionales.

3. Escalas de producción y tecnología

3.1. Diferencias entre pequeños, medianos y grandes productores en el sector agroalimentario

La escala de producción en el sector agroalimentario influye en la selección, adopción y aplicación de tecnologías de conservación postcosecha. Este factor impacta las estrategias productivas, comerciales y las capacidades para implementar soluciones tecnológicas sostenibles. Dentro de este contexto, los productores se pueden clasificar en tres grupos principales: pequeños, medianos y grandes productores (agroindustria).

Pequeños productores

- Recursos limitados: Los pequeños productores, que generalmente operan en comunidades rurales, enfrentan restricciones económicas y técnicas que dificultan la adopción de tecnologías avanzadas.
- Focalización local: Su producción está orientada al consumo propio o mercados locales, donde los requerimientos de calidad y trazabilidad son menos estrictos, pero los márgenes de ganancia también son más reducidos.
- Dependencia de mano de obra familiar: La participación de la familia en las actividades productivas requiere que las tecnologías sean fáciles de operar y mantener, adaptándose a las habilidades disponibles en estas comunidades.
- Impacto directo en el desarrollo comunitario: Con estas soluciones tecnológicas además de mejorar la productividad se fortalecen la seguridad alimentaria local y se permite a los pequeños productores diversificar su oferta con productos procesados mediante el deshidratado solar.

Medianos productores

- Escala de transición: Los productores medianos se clasifican entre los pequeños productores y la agroindustria, representando de esta manera una categoría intermedia con características y necesidades muy particulares. La producción de estos productores está orientada tanto a mercados locales como regionales y con un enfoque hacia la comercialización en volumen moderado.
- Capacidades financieras y tecnológicas: Aunque no disponen de los recursos robustos que la agroindustria tiene, estos productores tienen acceso a sistemas de financiamiento y una mayor capacidad para la inversión en tecnologías semiindustriales.
- Mercados diversificados: En esta escala, la oferta incluye a productos frescos y a procesados con estándares de calidad permiten competir en mercados regionales y, en algunos casos especiales, incluso internacionales.
- Infraestructura intermedia: Los productores medianos cuentan con capacidad logística y de almacenamiento, aunque ciertamente enfrentan desafíos en términos de eficiencia y acceso a tecnologías de avanzada.
- Oportunidades de crecimiento: La adopción de las tecnologías para secado adecuadas a esta escala puede potenciar la participación en cadenas de valor más complejas, permitiendo actuar como puente entre pequeños productores y grandes compradores.

Grandes productores (agroindustria)

- Economías de escala: La agroindustria trabaja con un enfoque orientado a la alta productividad, optimizando los costos unitarios y maximizando la rentabilidad.
- Infraestructura avanzada: Disponen de instalaciones automatizadas, con cadenas de frío y redes logísticas para asegurar la calidad y trazabilidad de los productos a lo largo de toda la cadena de suministro.

- Acceso a mercados internacionales: Los grandes productores deben cumplir con estrictas normativas de calidad e inocuidad alimentaria, lo que les obliga a adoptar tecnologías avanzadas.

Sinergias entre las escalas

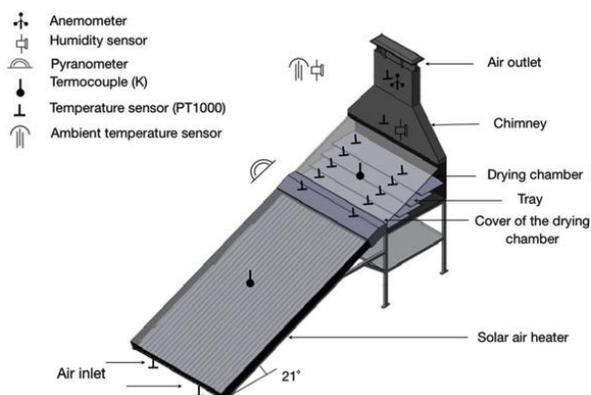
La coexistencia de estas tres categorías de productores abre oportunidades para el fortalecimiento del sector agroalimentario:

- Transferencia de conocimiento y tecnología: Los grandes productores y los productores medianos pueden actuar como catalizadores en la adopción de tecnologías para los pequeños productores, mediante programas de capacitación y la realización de alianzas estratégicas.
- Integración en cadenas de valor: Los productores medianos y pequeños tienen la capacidad de abastecer a la agroindustria con insumos procesados de alta calidad mediante el deshidratado solar fortaleciendo así las cadenas de suministro regionales.
- Desarrollo sostenible: La implementación de las tecnologías de secado solar en todas las escalas para la reducción de pérdidas postcosecha, la generación de valor agregado y la sostenibilidad ambiental de la región.

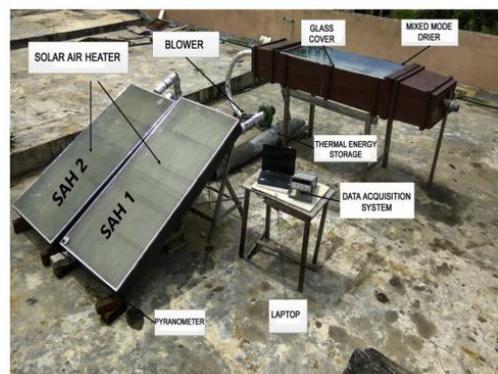
Cada una de las escalas enfrenta desafíos específicos y requiere de soluciones tecnológicas adaptadas a sus realidades. Al considerar estas diferencias entre cada escala, es posible diseñar estrategias más inclusivas para el fomento de la adopción de tecnologías limpias y la integración en cadenas de valor sostenible.

3.2 Tecnologías apropiadas según la escala

El desarrollo tecnológico del secado solar se ha orientado hacia dos vías: i) secadores simples de baja potencia, baja eficiencia y de vida útil corta, pero económicos; ii) secadores de grandes capacidades, altas eficiencias, mayor durabilidad y por consiguiente más costosos (Othman et al. 2006). Recientemente Kamfa y colaboradores, realizaron un análisis de 45 artículos de revisión sobre secado solar publicados entre 1994-2019 y concluyeron que la gran mayoría de la investigación se centra en secadores agroalimentarios simples de pequeña escala (ver, Figura 3) más apropiados para uso personal y aplicaciones rurales en comunidades menos desarrolladas y, en muchos casos, el enfoque de los desarrollos se centran en la conservación de alimentos para aliviar la pobreza. Además, identificaron una gran brecha para la incorporación de colectores solares térmicos existentes o ligeramente modificados a los procesos de secado industrial (Kamfa et al. 2020). Para hacer frente a la gran cantidad de frutas y verduras que desperdician en la cadena de suministro de alimentos es necesario que los sistemas de secado solar puedan procesar un volumen de alimentos más allá de la capacidad de un diseño familiar o de pequeña escala.



a) Secador solar de tipo mixto



b) Secador solar de tipo mixto con almacenamiento de energía

Figura 3 Secadores solares tipo mixto de pequeña capacidad a) sin almacenamiento (Erick César et al. 2020) y b) con almacenamiento (Lakshmi, Muthukumar, y Nayak 2020).

Se reconoce que las tecnologías de secado solar se han investigado ampliamente mediante estudios experimentales, teóricos y numéricos. Sin embargo, hay muy poca información disponible sobre el desarrollo y la investigación de sistemas de secado solar demostrativos con un enfoque en aplicaciones agroindustriales de gran capacidad (Ortiz-Rodríguez et al. 2020). A la fecha son pocos los trabajos de enfocados en el secado solar para aplicaciones industrial (Pirasteh et al. 2014; Kamfa et al. 2020; A. Lingayat, Balijepalli, y Chandramohan 2021).

La selección de tecnologías para los sistemas de secado solar (SSS) debe adaptarse a las características específicas de los usuarios finales y sus demandas productivas, considerando factores como el acceso a recursos, capacidades técnicas y escala operativa. Con este enfoque, las tecnologías de SSS se clasifican en tres escalas principales según su capacidad de procesamiento (Ortiz-Rodríguez et al. 2022b):

1. **Pequeña escala:** Equipos diseñados para autoconsumo, producción a pequeña escala o investigación, con capacidades menores a 50 kg por ciclo.
2. **Mediana escala:** Sistemas piloto o semi-industriales, adecuados para capacidades de 50 a 1000 kg por ciclo.
3. **Gran escala:** Infraestructura industrial diseñada para capacidades superiores a 1000 kg por ciclo, con tecnologías avanzadas que garantizan eficiencia y continuidad.

A continuación, se detalla la tecnología adecuada para cada escala.

Pequeños productores rurales

Los pequeños productores rurales enfrentan desafíos como recursos financieros limitados, acceso restringido a tecnologías y dependencia de la mano de obra familiar. Las tecnologías propuestas para este segmento deben ser económicas, sencillas de operar y adaptables a condiciones locales.

- Tecnologías de bajo costo y fácil mantenimiento:
 - Los sistemas de secado solar directo son ideales para este grupo debido a su diseño sencillo y bajo costo. Estas estructuras utilizan bandejas de secado en gabinetes con cubiertas transparentes que maximizan la captura de radiación solar.



inifap



SITS



Zacatecas
GOBIERNO DEL ESTADO
2021-2027

- La construcción puede realizarse con materiales disponibles localmente, como madera, láminas de plástico, y vidrio reciclado, reduciendo costos de instalación.
- Requieren mantenimiento básico, como limpieza regular y verificación de ventilaciones.



Figura 4 Secadores solares directos: A) cubierta de plástico y estructura de madera; B) cubierta de policarbonato y estructura de metal

- Sistemas modulares y portátiles:
 - Los sistemas modulares permiten ampliar la capacidad de secado según las necesidades estacionales, optimizando el uso de los equipos en función de la producción.
 - Los diseños portátiles son particularmente útiles en regiones donde las parcelas están dispersas, permitiendo trasladar el equipo a distintas ubicaciones durante la temporada de cosecha.

Estas tecnologías ofrecen a los pequeños productores la oportunidad de procesar excedentes, mejorar la calidad de sus productos y diversificar su oferta en mercados locales. Esto no solo reduce pérdidas, sino que también fomenta ingresos adicionales y el desarrollo económico de las comunidades rurales.

Medianos productores

Los productores medianos representan una categoría intermedia con características y necesidades específicas. Este grupo suele contar con recursos técnicos y financieros moderados, así como acceso a mercados regionales, lo que les permite adoptar soluciones tecnológicas más avanzadas.

- Sistemas de capacidad media y semi-industriales: Secadores solares integrales tipo invernadero
 - Estos secadores tienen capacidad de entre 50 y 1000 kg por ciclo, adecuados para medianos productores con volúmenes moderados de producción.
 - La construcción de estos secadores puede ser modular y escalable, lo que permite ajustar la capacidad según las necesidades estacionales y el crecimiento productivo.
 - Pueden incorporar ventilación forzada para acelerar el proceso de secado, mejorando la eficiencia y reduciendo el tiempo en comparación con los métodos tradicionales.
 - Su implementación es relativamente accesible en términos de costos iniciales y mantenimiento, especialmente si se emplean materiales locales en su construcción, como plástico de invernadero y estructuras de madera o metal.



Figura 5 Secado solar integral tipo invernadero de policarbonato

- Su implementación es relativamente accesible en términos de costos iniciales y mantenimiento, especialmente si se emplean materiales locales en su construcción, como plástico de invernadero y estructuras de madera o metal.
- Este tipo de sistemas también puede ser acoplado a sistemas de respaldo para operar de forma híbrida, especialmente en temporadas de alta demanda o condiciones climáticas adversas.

Janjai y colaboradores desarrollaron un invernadero que incorporó un quemador de gas LPG de 100kW para suministro de aire caliente durante los días nublados o lluviosos a través de unos conductos debajo de las mesas de secado, ver Figura 6. Los resultados satisfactorios de los Secadores solares integrales tipo invernadero-híbridos han puesto en marcha un programa para la difusión de este tipo de secador en la industria alimentaria en Tailandia (Serm Janjai 2012).



Figura 6 Una vista pictórica del quemador (a) y las guías de aire (b).

- Oportunidades de escalamiento:
 - Los secadores solares indirectos, pueden ser otra opción viable para este grupo, ya que permiten un control más preciso de temperatura y flujo de aire, mejorando la calidad y uniformidad del secado. Además, los secadores indirectos son necesarios cuando los materiales a secar son fotosensibles. Por lo tanto, esta tecnología permite competir con



inifap



SITS



Zacatecas
GOBIERNO DEL ESTADO
2021-2027

estándares más altos de calidad, facilitando su integración en cadenas de valor nacionales e internacionales.

- Además de los sistemas de secado indirecto, otra de las opciones tecnológicas a esta escala en el secador tipo bomba de calor.

Al adoptar estas soluciones, los productores medianos pueden mejorar su competitividad, diversificar su oferta y acceder a mercados más amplios, contribuyendo al fortalecimiento de las economías locales.

Productores grandes (agroindustria)

La agroindustria opera en escalas mucho mayores, con requerimientos más estrictos en términos de eficiencia, capacidad y calidad del producto final. Este segmento demanda tecnologías avanzadas que garanticen continuidad y precisión en el proceso.

- Infraestructura de alta capacidad:
 - Los sistemas de secado solar distribuidos (secadores solares indirectos) e híbridos con capacidades superiores a 1000 kg por ciclo son los más adecuados para la agroindustria. Estos sistemas permiten un control completo de las variables del proceso, como temperatura, flujo de aire y humedad.
 - Su diseño incluye cámaras de secado automatizadas, fabricadas con materiales higiénicos como acero inoxidable, que cumplen con regulaciones internacionales de seguridad alimentaria.



Figura 7 Cámara de secado tipo túnel semicontinua con interiores de acero inoxidable.

- La integración de sensores, controladores automáticos y monitoreo remoto optimiza la operación y minimiza los costos energéticos.

En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se presenta un SSD-CDA con calentadores solares de aire, este sistema tiene una capacidad de carga de 450 kg de productos agrícolas y fue instalado en Huacalera Argentina (Condorí et al. 2017). El absorbedor de los calentadores solares fue fabricado de lámina galvanizada pintada de negro; mientras que la cubierta de policarbonato alveolar de 4 mm de espesor.



inifap



SITS



Zacatecas
GOBIERNO DEL ESTADO
2021-2027



Figura 8 Fotografía de un SDS-DAH semi-industrial para productos vegetales (Condorí et al. 2017).

- Tecnologías híbridas:
 - Los sistemas híbridos combinan energía solar con fuentes de energía complementarias, como biomasa, asegurando un funcionamiento continuo durante condiciones climáticas desfavorables o en horarios nocturnos.
 - La biomasa puede provenir de residuos agrícolas, reduciendo costos y promoviendo la economía circular dentro de la agroindustria.
 - Estas tecnologías también contribuyen a reducir la huella de carbono del sector, alineándose con tendencias de sostenibilidad globales.

Condorí y colaboradores, presentaron el diseño, construcción y pruebas de un secador solar indirecto híbrido de biomasa y energía solar (Condorí et al. 2010). El sistema, ubicado en San Carlos, provincia de Salta, Argentina, produce pimientos morrones secados en vainas. Tiene flujo de aire forzado y calefacción auxiliar asistida por una estufa de leña. El secador tiene un área de recolección solar de 195 m² con 26 calentadores solares de aire. Los calentadores se distribuyeron en dos grupos de 13 ubicados a ambos lados de la tubería maestra, ver Figura 9. Cada calentador puede girar sobre su eje longitudinal con un sistema simple que permite abisagrar los colectores. De esta manera, la pendiente del colector con la horizontal puede variarse en los meses, con la altura del sol para mejorar la eficiencia de la recolección solar. La separación eje a eje entre colectores es de 1.4 m para evitar sombras entre ellos. Un ventilador centrífugo de 4 HP a 900 rpm fuerza el aire de los colectores hacia una cámara de secado de 100 m³. El producto fresco se coloca en carros con 20 bandejas de 15 kg de carga cada uno. El sistema solar se probó en modo híbrido solar biomasa con 4 toneladas. Los resultados fueron una diferencia de temperatura de 35 °C entre la entrada y la salida del colector y una temperatura de 55 °C con una humedad relativa del 20% a la salida del secador.

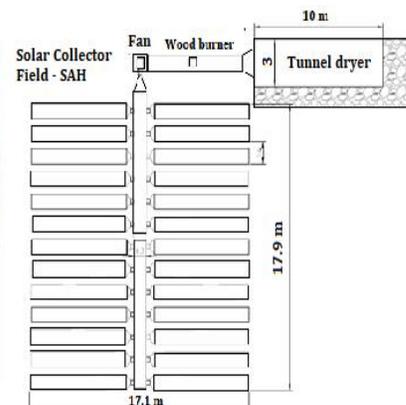


Figura 9 Secado solar híbrido (solar-biomasa)



- Tecnología de bomba de calor
 - Alta capacidad operativa para manejar grandes volúmenes de productos de manera continua, lo que se ajusta a las demandas de la agroindustria.
 - Ofrecen un control exacto de temperatura y humedad, crucial para garantizar uniformidad y calidad en productos procesados a gran escala; indispensable para cumplir con los estándares de calidad exigidos por los mercados nacionales e internacionales.
 - Pueden integrarse con sistemas solares fotovoltaicos u otras fuentes renovables, permitiendo una operación sostenible y disminuyendo la huella de carbono del proceso industrial.



Figura 10 Secador de alimentos tipo bomba de calor

Impacto por escala

La implementación de tecnologías adaptadas a cada escala no solo reduce pérdidas postcosecha, sino que también genera beneficios económicos, sociales y ambientales:

- Pequeños productores rurales: Empoderados con herramientas accesibles y efectivas, preservan su producción y acceden a mercados locales, mejorando su calidad de vida y fortaleciendo la seguridad alimentaria en sus comunidades.
- Productores medianos: Con tecnologías semi-industriales, aumentan su competitividad y su capacidad para atender mercados regionales, facilitando su integración en cadenas de valor más sofisticadas.
- Agroindustria: Optimiza procesos a gran escala, reduciendo costos energéticos y mejorando la sostenibilidad de sus operaciones, mientras cumple con altos estándares de calidad para mercados internacionales.

En suma, la clasificación tecnológica por escalas permite abordar las necesidades específicas de cada segmento, promoviendo un desarrollo agroalimentario más inclusivo y sostenible.

4. Escenarios de temporalidad para la implementación de sistemas de secado solar

La implementación efectiva de tecnologías de secado solar no solo depende de la capacidad de producción, sino también de la temporalidad de los cultivos agrícolas. La variabilidad en la disponibilidad de los cultivos a lo largo del año dicta el tipo de tecnología más apropiada para su implementación y afecta directamente su diseño y operación. Este análisis se centra en tres escenarios distintos de temporalidad, cada uno con sus respectivas implicaciones tecnológicas, considerando las temporadas críticas de

cosecha, las estrategias de implementación por estación, y las adaptaciones necesarias en infraestructura y operación. Aunque en principio el enfoque es general, se incluye el caso de la termosolar de Zacatecas como un ejemplo representativo para la ilustración de cómo la temporalidad agrícola influye directamente en la elección de las tecnologías de secado solar más adecuadas para cada escala. A continuación, se analizan las mejores tecnologías para cada escenario de temporalidad basadas en las características de las tecnologías discutidas en el marco teórico de este informe, con el objetivo de maximizar la eficiencia y la sostenibilidad de los procesos de secado solar.

4.1. Escenarios de temporalidad de cultivos

Escenario de Cultivo Continuo

En este escenario existe una disponibilidad constante de productos agrícolas a lo largo del año, ya sea debido a la naturaleza del cultivo, como en el caso del nopal en Zacatecas, o gracias a prácticas implementadas de producción intensiva, como el uso de invernaderos o sistemas de riego tecnificado. Esta temporalidad asegura que haya una oferta continua de materia prima para los procesos de secado, lo que implica retos y oportunidades particulares.

Desde una perspectiva operativa, el flujo constante de producto reduce la presión por gestionar los picos de cosecha y permite la realización de una planificación más uniforme de las actividades de procesamiento de secado. Sin embargo, también demanda una infraestructura de secado que funcione de manera estable durante periodos prolongados a lo largo del año, con un mantenimiento periódico y un enfoque en la eficiencia energética para minimizar costos operativos.

De manera adicional, la continuidad en la disponibilidad de materia prima facilita también la diversificación de productos procesados, permitiendo así atender mercados más amplios y sostenibles. Este tipo de escenario es especialmente relevante para cultivos no perecederos o de alta demanda, que requieren estrategias robustas para el manejo postcosecha sin depender de condiciones estacionales específicas.

En Zacatecas, este modelo podría ejemplificarse con la producción de nopal, donde su disponibilidad todo el año ofrece oportunidades para implementar soluciones que aseguren un aprovechamiento integral de este recurso en beneficio de las comunidades locales y del desarrollo agroindustrial sostenible.

Escenario de Temporada de Cosecha Única

Este escenario se caracteriza por tener un periodo concentrado de disponibilidad de cultivos, generalmente limitado específicamente a unos pocos meses al año. En muchas regiones agrícolas este tipo de ciclos de cosecha están marcados por temporadas de una alta producción. Estas temporadas coinciden con una mayor necesidad de sistemas de conservación debido a un aumento en los excedentes. Este es típicamente el caso de cultivos como el chile en el Estado de Zacatecas, donde los picos de cosecha ocurren principalmente entre los meses de agosto a octubre. La temporada de cosecha única representa desafíos significativos en los términos del manejo de la producción, de almacenamiento y de procesamiento debido al volumen concentrado de productos que deben ser procesados en un corto periodo de tiempo.

En estas temporadas de temporalidad crítica, es esencial el contar con una estrategia bien definida y estructurada para gestionar los excedentes agrícolas rápidamente para así evitar las pérdidas por deterioro. La infraestructura y la logística deben de estar diseñadas para manejar grandes volúmenes de entrada de producto en poco tiempo, lo que incluye la capacidad de secado, el almacenamiento adecuado y, potencialmente, la preparación para la comercialización de los productos procesados.

El manejo eficiente de la materia prima durante esta temporada es crucial no solo para la maximización de la rentabilidad de los cultivos, sino que también para minimizar el impacto ambiental asociado con la pérdida y desperdicio de alimentos en la región. Además, este escenario requiere logística meticulosa y de colaboración entre todos los productores para aprovechar al máximo las instalaciones de procesamiento y para la reducción de los costos operativos, facilitando así un enfoque más sostenible y económicamente viable para el manejo postcosecha.

Escenario de Múltiples Cosechas Estacionales

Este escenario implica que hay varias temporadas de cosecha a lo largo del año, cada una con sus propios periodos de producción agrícola. Es típico de regiones con variedad de cultivos que maduran en diferentes momentos del año, permitiendo múltiples ciclos de cosecha anuales. Un ejemplo representativo podría ser una región donde se produzcan tanto cultivos de ciclo corto como de ciclo largo, tales como verduras de hoja que pueden cosecharse varias veces al año, y cultivos como el maíz que generalmente tienen una o dos cosechas por año dependiendo de las condiciones climáticas.

En este escenario la gestión agrícola y la planificación de los sistemas de secado deben de ser dinámicas y lo bastante flexibles para adaptarse continuamente a las cambiantes necesidades de procesamiento de los diferentes cultivos disponibles. La capacidad de adaptar las operaciones de secado a la fluctuante oferta de productos frescos disponible es crucial para la optimización tanto la eficiencia del uso de los recursos como la calidad del producto final.

Además, este tipo de temporalidad requiere de una coordinación efectiva y de una planificación anticipada para la sincronización de las actividades de cosecha, el secado y el almacenamiento, garantizando que los recursos estén disponibles para cuando se necesiten y que los productos procesados cumplan con los estándares de calidad para su almacenamiento o la venta inmediata. Esto implica una comprensión profunda sobre las particularidades de cada cultivo y su comportamiento en diferentes condiciones ambientales y de mercado.

4.2 Consideraciones en la selección de tecnologías: impacto de la temporalidad de los cultivos

La adopción de las tecnologías de secado solar en la agricultura debe evaluarse bajo criterios económicos incluyendo la inversión inicial, los costos operativos y el retorno financiero esperado en función de la temporalidad de los cultivos agrícolas disponibles en la región. Este factor, que determina la frecuencia y la duración para el uso de las tecnologías a lo largo del año, impacta directamente la viabilidad económica y operativa de cada sistema de acuerdo con sus necesidades. Una tecnología eficiente no solo debería de cumplir con los requisitos técnicos del proceso de secado, sino que también optimizar el uso de recursos durante todo su ciclo de vida operativo.

En escenarios donde la cosecha es de naturaleza estacional y se concentra en un corto periodo, como sucede con cultivos de una única temporada de tres meses, por ejemplo, la inversión inicial en sistemas de secado solar como los calentadores solares de aire o de agua suele representar un desafío financiero significativo. La operación restringida a unos pocos meses supone que la infraestructura instalada permanecerá inactiva la mayor parte del año, lo que ocasiona que el periodo de recuperación de la inversión inicial se prolongue y limita a su vez la generación de valor económico o energético en las temporadas inactivas. Este subaprovechamiento no solo disminuye la eficiencia económica y energética del sistema, sino que también incrementa los costos indirectos asociados al mantenimiento de equipos inactivos, lo que agrava la rentabilidad general de la inversión.

Escenarios Estacionales

Para escenarios con una única temporada de cosecha, una alternativa más adecuada podría ser el uso de paneles fotovoltaicos acoplados a secadores tipo bomba de calor. Aunque los sistemas fotovoltaicos tienen una eficiencia de conversión energética menor ($\approx 15\%$) en comparación con los sistemas termosolares ($\approx 60-70\%$), su capacidad para generar electricidad durante todo el año los convierte en una opción versátil. La energía producida puede ser utilizada directamente para el secado durante la temporada de cosecha o inyectada en la red eléctrica mediante esquemas de medición neta, permitiendo un retorno financiero más eficiente y diversificado fuera de la temporada activa. Esta flexibilidad operativa es clave para maximizar el uso de la infraestructura instalada en ciclos productivos estacionales.

Adicionalmente, los secadores solares tipo invernadero representan una alternativa económica y versátil para este escenario. Su multifuncionalidad, al poder ser utilizados como almácigos fuera de las temporadas de secado, permite maximizar la utilización de la infraestructura. Además, su diseño modular y menor costo de instalación en comparación con los sistemas distribuidos e híbridos los hace ideales para pequeñas y medianas operaciones. En climas lluviosos o con alta nubosidad, los invernaderos operados en modo pasivo con pisos de concreto ofrecen tasas de secado estables, mitigando el riesgo de deterioro del producto por crecimiento de hongos.

Escenarios continuos

En contraste, en escenarios de producción continua, los sistemas de secado solar distribuidos que emplean energía termosolar mediante calentadores solares de aire o de agua son altamente efectivos. Estas tecnologías permiten el maximizado del aprovechamiento de la inversión inicial al tener por característica el operar de manera constante durante todo el año, satisfaciendo así demandas sostenidas de energía térmica. Su integración con tecnologías de respaldo para la generación de calor, como por ejemplo biomasa o gas LP, asegura una operación estable incluso durante periodos anuales de baja irradiación solar, lo que las hace adecuadas para entornos industriales de producción intensiva. Aunque la inversión inicial puede ser considerable, su uso constante permite una amortización más rápida en comparación con los escenarios estacionales de aprovechamiento.

Por su parte, los sistemas híbridos de colector solar PVT, que combinan módulos fotovoltaicos y colectores térmicos en un único dispositivo, pueden ofrecer una solución avanzada y flexible para escenarios de cultivo continuo. Estos sistemas no solo proveen alta eficiencia en la energía térmica para el secado, sino que también generan electricidad para alimentar equipos auxiliares o para ser almacenada o vendida a la red eléctrica. Esta dualidad funcional agrega mayor flexibilidad económica y favorece la sostenibilidad energética, particularmente en operaciones a mediana y gran escala.

Impacto de las Condiciones Climáticas

Es importante también señalar que las temporadas de la cosecha frecuentemente coinciden con las temporadas de lluvia, lo que puede reducir la capacidad de generación por energía solar y afectar de esta manera la eficiencia de los sistemas funcionando exclusivamente con energía termosolar. En estos casos, la elección de tecnologías con respaldo energético, como los sistemas híbridos que integran biomasa, gas LP o almacenamiento térmico, es esencial para garantizar un secado eficiente y mitigar las pérdidas postcosecha. Además, para el secado en una sola temporada de cosecha y que coincide con las temporadas de lluvias, es preferible tecnologías fotovoltaicas o híbridas acopladas a secadores tipo bomba de calor.

La selección de tecnologías de secado solar debe basarse en un análisis integral que considere la temporalidad de los cultivos, las condiciones climáticas, los costos de inversión y operación, y las oportunidades de generación de ingresos a lo largo del año. La adaptación de las tecnologías a las

necesidades particulares de cada uno de los escenarios garantiza que haya un retorno financiero más rápido y sostenible y al mismo tiempo que se optimizan los recursos energéticos disponibles y se reducen las pérdidas postcosecha de productos hortícolas. Alineando estas decisiones a los objetivos de sostenibilidad se pueden potenciar de esta manera los beneficios ambientales y económicos en la agroindustria tanto regional como nacional.

5. Estrategias para la replicabilidad

La replicabilidad efectiva de los sistemas y las tecnologías de secado solar requiere de un enfoque integral que combine tanto elementos técnicos, económicos, sociales como culturales. De esta manera se garantiza no solo la viabilidad técnica de los sistemas, sino que, también su impacto en el desarrollo territorial, la sostenibilidad a un largo plazo y una efectiva adopción por parte de comunidades y entidades gubernamentales. La replicabilidad de tecnologías para el secado solar es un paso esencial en la maximización del impacto de los resultados del presente proyecto. Estas tecnologías dan una solución sostenible para la mitigación de las pérdidas postcosecha, para la mejora de la calidad de vida de los productores y para el fortalecimiento de la agroindustria regional. Sin embargo, su réplica debe adaptarse a las particularidades de cada región, considerando lo siguiente:

- Factores climáticos: Variabilidad de irradiación solar, temporadas de lluvias y estacionalidad de los cultivos. Las tecnologías seleccionadas para el aprovechamiento de las energías renovables deben ser adecuadamente diseñadas y dimensionadas para hacer frente a las variaciones de irradiación solar, humedad del ambiente y el temporal de lluvias de cada región. Por ejemplo, en climas con una alta nubosidad, los secadores de tipo invernadero son una opción robusta y económica.
- Factores sociales: Deben ser tomadas en cuenta las capacidades locales y necesidades específicas de las comunidades y dinámicas sociales de la región en donde se plantea la implementación. Las tecnologías deben de ser fáciles de operar y mantener, asegurando de esta manera que los usuarios puedan gestionarlas con recursos locales.
- Factores económicos: Limitaciones financieras, acceso a recursos e incentivos para adopción tecnológica. En regiones con acceso limitado a energía eléctrica, se deben priorizar tecnologías pasivas o con bajo consumo energético.
- Factores culturales: Aceptación comunitaria y ajuste de los sistemas a las prácticas agrícolas locales.

Esta sección aborda los factores clave para lograr la réplica, basándose en las experiencias piloto y en los hallazgos del proyecto.

5.1. Factores clave de éxito

Para garantizar la efectividad y sostenibilidad de los sistemas replicados en diversas regiones, se identifican los siguientes elementos esenciales:

1. Accesibilidad Económica y Financiamiento

- Diseño modular y escalable: Desarrollar tecnologías accesibles para pequeños y medianos productores, iniciando con configuraciones básicas que puedan ampliarse gradualmente.
- Esquemas de financiamiento inclusivo: Proponer modelos financieros accesibles, tales como:



inifap



SITS



Zacatecas
GOBIERNO DEL ESTADO
2021-2027

- Créditos blandos mediante instituciones como FIRCO y FIRA, quienes han mostrado interés en financiar proyectos con tecnologías renovables.
- Subsidios dirigidos a proyectos con alto impacto social y ambiental, como los gestionados con SADER y la Secretaría del Campo (SECAMPO) en Zacatecas, que apoyan a mujeres rurales y pequeños productores.
- Modelos de riesgo compartido: Utilizar esquemas de incentivos recuperables de hasta el 80% del costo del proyecto, como los ofrecidos por SADER para fomentar cadenas de valor.
- Cooperativas y redes de valor: Promover la organización de productores en cooperativas para compartir costos de adquisición y operación.

2. Capacitación Técnica y Transferencia de Conocimiento

- Capacitación diferenciada: Adaptar los programas de formación para diferentes perfiles:
 - Productores agrícolas: Enfocados en operación diaria y eficiencia energética.
 - Técnicos especializados: Formación en mantenimiento avanzado y resolución de fallas.
 - Instituciones públicas: Integrar módulos para desarrollar políticas públicas informadas y promover la adopción tecnológica.
- Plataformas de transferencia tecnológica: Desarrollar herramientas como tutoriales, manuales y aplicaciones digitales. Esto incluye iniciativas como el Laboratorio Nacional de Investigación e Innovación de Secado Solar (LANIISS), que se propone consolidar en Zacatecas como un centro de capacitación, investigación y transferencia.

3. Alianzas Estratégicas y Gobernanza

- Modelo Penta Hélice: Articular a los sectores académico, gubernamental, industrial, social y ambiental en una red de innovación, como se propuso en Zacatecas para promover el uso de tecnologías de deshidratado solar.
- Formalización de acuerdos: Firmar convenios entre instituciones como FIRCO, SADER y productores, asegurando el soporte técnico, la continuidad operativa y el financiamiento.
- Integración en políticas públicas: Alinear las estrategias de réplica con programas nacionales de desarrollo rural, sustentabilidad energética y soberanía alimentaria. Ejemplo: la política pública diseñada en colaboración con el diputado Ulises Mejía Aro para etiquetar recursos en el Presupuesto de Egresos de la Federación.

4. Experiencia Piloto Documentada

- Casos de éxito: Basar las estrategias en experiencias piloto como las de la planta termosolar en Zacatecas, donde se evaluaron tecnologías híbridas (termosolares, fotovoltaicas y de biomasa) con resultados positivos en reducción de pérdidas postcosecha y aumento de ingresos.
- Datos de referencia: Utilizar indicadores clave, como el retorno de inversión y la disminución de pérdidas agrícolas, para justificar la adopción tecnológica.
- Condiciones de réplica: Documentar factores como el clima, los cultivos predominantes y la capacidad técnica local, ajustando los modelos de implementación según las particularidades regionales.

5. Estudio de Mercado y Comercialización Garantizada

- Identificación de demanda: Realizar estudios previos para identificar los cultivos con alta demanda de mercado, tanto a nivel local como en mercados regionales e internacionales.

- Valor agregado: Destacar las ventajas de los productos deshidratados con energía solar, como su sostenibilidad, calidad superior y certificaciones orgánicas, para atraer consumidores conscientes y diferenciados.
- Creación de canales de comercialización.
- Conectar a pequeños productores con mercados locales y regionales a través de ferias, cadenas de supermercados y plataformas digitales.
- Fortalecer redes existentes como la creada en Zacatecas, que ha facilitado la comercialización de productos entre usuarios de la planta termosolar.
- Estrategias de marketing: Capacitar a los productores en promoción y venta de sus productos, destacando sus atributos sostenibles y saludables.
- Colaboración con instituciones para asegurar mercados estables para los productos deshidratados.
- Viabilidad económica: Realizar planes de negocio que incorporen estudios de mercado y análisis de factibilidad, asegurando que la inversión en tecnología esté respaldada por un plan de negocios sólido.

5.2 Adaptación Tecnológica por Escala

Para garantizar una implementación efectiva y sostenible, las tecnologías de secado solar deben adaptarse a las diferentes escalas de los usuarios, atendiendo sus capacidades económicas, necesidades operativas y contexto socioeconómico. A continuación, se presentan las estrategias de adaptación tecnológica según tres tipos de usuarios clave:

Pequeños Productores

- Tecnologías Accesibles y Económicas: Para pequeños productores, se priorizan tecnologías como los secadores solares tipo invernadero, que destacan por su bajo costo de instalación, operación simple y requerimientos mínimos de mantenimiento. Estos sistemas son ideales para pequeñas unidades productivas y cultivos con baja producción anual.
- Diseño Multifuncional: Los secadores tipo invernadero no solo permiten deshidratar productos agrícolas, sino que también pueden ser utilizados como almacigos fuera de las temporadas de secado, maximizando su funcionalidad durante todo el año.
- Capacitación Local: Proveer formación técnica básica para que los productores puedan instalar, operar y mantener los sistemas de forma autónoma, reduciendo la dependencia de terceros y fomentando su sostenibilidad a largo plazo.

Agroindustria

- Sistemas de Alta Capacidad y Eficiencia: La agroindustria requiere tecnologías avanzadas como los sistemas distribuidos e híbridos (termosolares con respaldo de biomasa o gas LP), que ofrecen mayor capacidad de procesamiento y pueden operar de manera continua durante todo el año.
- Estrategias de Financiamiento: Dada la alta inversión inicial de estas tecnologías, se recomiendan modelos de financiamiento como arrendamiento operativo, asociaciones público-privadas o créditos especializados para industrias agrícolas.

Comunidades en Transición

- Modelos Cooperativos: Para comunidades que buscan transitar hacia modelos productivos más sostenibles, se promueve la creación de cooperativas agrícolas que compartan la infraestructura

de secado. Esto permite reducir costos de inversión y operación mientras se maximizan los beneficios económicos.

- **Infraestructura Compartida:** La implementación de secadores solares tipo invernadero colectivos o sistemas híbridos de mediana capacidad puede atender a múltiples productores de forma simultánea, optimizando la relación costo-beneficio.
- **Fortalecimiento Comunitario:** La gestión colaborativa fomenta la creación de redes de apoyo entre los productores, facilitando la transferencia de conocimientos y la organización de cadenas de valor locales que promuevan la comercialización conjunta de productos deshidratados.

5.3 Temporabilidad como Eje Central

La temporalidad de los cultivos representa un eje estratégico en la réplica de tecnologías de secado solar. Una adecuada alineación tecnológica con los ciclos de producción agrícola maximiza la eficiencia energética y económica, mientras mitiga las pérdidas postcosecha. A continuación, se describen las recomendaciones según los diferentes escenarios de temporalidad:

Cosechas Únicas

- **Tecnologías Versátiles y Adaptables:** Para cultivos con una sola temporada de cosecha al año, se recomienda la implementación de sistemas como paneles fotovoltaicos acoplados a secadores tipo bomba de calor. Estas tecnologías no solo permiten un procesamiento eficiente durante la temporada activa, sino que también generan electricidad durante el resto del año, creando oportunidades para:
 - **Inyección a la red eléctrica:** Mediante esquemas de medición neta, maximizando el retorno de inversión.
 - **Uso diversificado:** Alimentar otras actividades productivas o vender la energía generada, contribuyendo a ingresos adicionales.
- **Minimización de tiempos muertos:** Estas tecnologías ofrecen flexibilidad operativa para comunidades que enfrentan largos periodos de inactividad en la infraestructura instalada.

Producción Continua

- **Sistemas termosolares:** Para ciclos agrícolas de producción constante, como el nopal en Zacatecas, los sistemas termosolares son para operar de forma continua durante todo el año.
- **Integración de tecnologías híbridas:** En entornos con demanda constante de energía térmica, se recomiendan sistemas que combinen termosolar y respaldo energético (biomasa o gas LP) para garantizar la operación ininterrumpida, incluso en condiciones de baja irradiación solar.

Consideraciones Transversales

- **Planeación según la temporalidad:** Adaptar las estrategias operativas y de inversión a los ciclos agrícolas de cada región, priorizando tecnologías que maximicen la utilización de la infraestructura instalada.
- **Enfoque modular:** Diseñar sistemas escalables que permitan a los usuarios aumentar o disminuir la capacidad de procesamiento en función de las fluctuaciones de la producción agrícola.

La temporalidad agrícola no solo es un factor que determina las necesidades energéticas, sino que también determina las oportunidades para la rentabilidad y la sostenibilidad a largo plazo. Alinear las

tecnologías de secado solar con las características estacionales de cada región es esencial para garantizar el éxito de su implementación y réplica.

5.4 Difusión y Escalamiento Regional

La difusión y el escalamiento regional de las tecnologías de secado solar son actividades fundamentales para la maximización del impacto del proyecto y para fomentar su adopción en diferentes regiones. Para este proceso se requieren estrategias claras de comunicación, redes de colaboración efectivas y mecanismos de apoyo técnico y financiero. A continuación, se presentan las acciones clave que pueden asegurar una diseminación activa y un escalamiento efectivo:

Estrategias de Difusión

1. Campañas de Sensibilización:
 - Realizar eventos demostrativos en las comunidades objetivo, donde se muestren los beneficios económicos, sociales y ambientales de las tecnologías de secado solar.
 - Utilizar medios de comunicación local y redes sociales para compartir casos de éxito, videos educativos y testimonios de usuarios. Por ejemplo, en el proyecto de PRONAI de Zacatecas hemos colaborado con medios de comunicación digital e influencer local, lo que nos ha ayudado a ampliar nuestra visibilidad a nivel regional, nacional y entre los paisanos en el extranjero. Aquí se comparten los links de los videos con gran alcance:
 1. <https://youtu.be/vVYZ7tLteW?si=8CZeEpBOQQALH1lk>
 2. <https://youtu.be/5gDoap1Hfqc?si=-cSNAQ27orya0bqv>
 3. <https://www.youtube.com/watch?v=XaESIhdjYik>
 - Producir materiales accesibles como folletos, guías técnicas y tutoriales en video en idiomas locales o adaptados a las características de cada región.
2. Publicación de Resultados:
 - Divulgar los hallazgos y experiencias del proyecto a través de publicaciones científicas, artículos en revistas técnicas y presentaciones en foros internacionales. Desde este punto de vista hemos trascendido frontera para la colaboración con especialistas tanto nacionales como internacionales, lo que fortalece la réplica de estas tecnologías no sólo a nivel nacional sino internacional.
 - Crear informes simplificados dirigidos a tomadores de decisiones, productores y organizaciones comunitarias para facilitar la comprensión y aplicación de las tecnologías.
3. Creación de Redes de Innovación:
 - Establecer vínculos entre productores, académicos, técnicos e instituciones gubernamentales mediante redes colaborativas.
 - Organizar conferencias, talleres y mesas redondas para fomentar el intercambio de conocimientos y experiencias.

Estrategias para el Escalamiento Regional

1. Identificación de Regiones Potenciales:
 - Realizar estudios para identificar regiones con características similares a las del proyecto piloto, considerando factores como clima, producción agrícola y necesidades energéticas.
 - Priorizar áreas con alto potencial agrícola y comunidades organizadas dispuestas a adoptar tecnologías sostenibles.
2. Modelos de Implementación Adaptativos:



inifap



SITS



Zacatecas
GOBIERNO DEL ESTADO
2021-2027

- Desarrollar paquetes tecnológicos que puedan ser adaptados a diferentes escalas y contextos socioeconómicos.
- Ofrecer opciones modulares y flexibles que permitan una implementación progresiva en función de las capacidades locales.
- 3. Articulación con Programas Gubernamentales y ONG:
 - Integrar las tecnologías de secado solar en programas de desarrollo rural y sustentabilidad energética impulsados por los gobiernos locales y nacionales.
 - Colaborar con organizaciones no gubernamentales para gestionar recursos financieros y técnicos que apoyen la implementación.
- 4. Monitoreo y Retroalimentación:
 - Crear sistemas de seguimiento para evaluar el impacto y la aceptación de las tecnologías replicadas.
 - Incorporar aprendizajes de cada réplica en el diseño de estrategias futuras, ajustando las tecnologías y metodologías según las necesidades locales.

La difusión y el escalamiento regional de las tecnologías de secado solar deben abordarse con un enfoque inclusivo y adaptable que integre comunicación efectiva, colaboración intersectorial y adaptaciones tecnológicas. Estas estrategias aseguran no solo una mayor adopción, sino también un impacto sostenible en el desarrollo territorial y la seguridad alimentaria de las comunidades involucradas.

6. Impacto en el desarrollo territorial

La implementación de tecnologías de secado solar en la agroindustria y en los pequeños productores no solo optimiza los procesos de conservación postcosecha, sino que también genera beneficios significativos para el desarrollo territorial. Estas tecnologías para el secado solar tienen un gran potencial transformador de las dinámicas económicas, sociales y ambientales para regiones agrícolas, contribuyendo al desarrollo más equilibrado y sostenible. A continuación, se presentan los impactos específicos para diferentes niveles del desarrollo territorial.

6.1. Beneficios para pequeños productores

La adopción de tecnologías de secado solar es una oportunidad para los pequeños productores al proporcionarles herramientas muy accesibles y efectivas para la maximización del aprovechamiento de su producción agrícola al revalorizar productos mediante el secado solar.

- Incremento de ingresos y reducción de pérdidas: Las tecnologías de secado solar permiten a los pequeños productores procesar excedentes agrícolas que en otras circunstancias podrían perderse debido a la falta de infraestructura adecuada para su procesamiento. Al extender la vida útil de los productos agrícolas mediante los procesos de deshidratación, los productores pueden acceder a mercados diversificados, como por ejemplo el de alimentos procesados o productos deshidratados. Por ejemplo, un pequeño productor de chile seco en Zacatecas tendría la capacidad de duplicar el valor agregado de su cosecha al transformar productos frescos en secos, reduciendo además las pérdidas postcosecha, y obteniendo ingresos adicionales en temporadas de baja producción agrícola.
- Fortalecimiento de la seguridad alimentaria local: Al conservar alimentos perecederos a través de procesos de secado solar, las comunidades rurales garantizan la disponibilidad de alimentos durante periodos de escasez. Esto es particularmente importante en regiones donde el acceso a alimentos frescos está limitado por la estacionalidad o la lejanía de los mercados principales.

- **Autonomía y empoderamiento económico:** Los sistemas de secado solar, especialmente los tipos invernadero, son accesibles y fáciles de operar, lo que reduce la dependencia de intermediarios y fomenta la capacidad de los pequeños productores para comercializar directamente sus productos.

6.2. Beneficios para la agroindustria

Parece el caso de la agroindustria, las tecnologías de secado solar contribuyen al mejoramiento de la eficiencia de los procesos productivos y a un fortalecimiento de su competitividad en mercados nacionales e internacionales.

- **Eficiencia en la producción:** Las tecnologías avanzadas, como los sistemas distribuidos e híbridos basados en energías renovables, permiten a la agroindustria el manejo de grandes volúmenes de productos de manera continua, asegurando de esta manera una operación estable y una mejor planificación logística. Esto optimiza de manera importante los costos operativos y mejora la calidad del producto final gracias a esta estabilidad. Por ejemplo, una planta deshidratada en Zacatecas podría integrar sistemas híbridos para tener un flujo constante de producción durante todo el año, minimizando así las interrupciones por factores climáticos o estacionales.
- **Expansión de mercados:** La implementación de tecnologías de secado solar permite también cumplir con rigurosos estándares internacionales para la calidad e inocuidad alimentaria, lo que abre el acceso a nuevos mercados de exportación. Por ejemplo, productos deshidratados tales como tisanas de frutas y sopas deshidratadas pueden encontrar una alta demanda en mercados internacionales, diversificando así las oportunidades comerciales de la agroindustria regional.

6.3. Beneficios socioambientales

La sostenibilidad es uno de los pilares más relevantes de las tecnologías de secado solar, ya que su uso puede contribuir significativamente a reducir el impacto ambiental de las actividades agroindustriales.

- **Sostenibilidad en la agroindustria regional:** Al sustituir combustibles fósiles por energía solar en los procesos de secado, se reduce considerablemente la huella de carbono de las operaciones agroindustriales. Por ejemplo, un sistema de secado solar híbrido puede disminuir las emisiones de CO₂ en un 30-50% en comparación con sistemas convencionales que utilizan gas LP o electricidad convencional.
- **Conservación de recursos naturales:** El uso eficiente de la energía solar contribuye a preservar recursos energéticos no renovables y a reducir la presión sobre los ecosistemas locales. Además, al evitar la pérdida postcosecha, se minimizan los desperdicios de agua, suelo y otros insumos agrícolas involucrados en la producción de los cultivos.
- **Generación de empleo local:** La instalación, operación y mantenimiento de tecnologías de secado solar generan empleos directos e indirectos en las comunidades rurales. Esto fomenta el desarrollo local y promueve la participación de la comunidad en proyectos sostenibles.

Es importante señalar que el impacto de las tecnologías de secado solar en el desarrollo territorial va más allá de los beneficios individuales para los productores o la agroindustria. Este conjunto de tecnologías representa una herramienta fundamental para la promoción de la equidad económica, la sostenibilidad ambiental y la resiliencia social las regiones agrícolas. Implementarlas no solo optimiza los procesos productivos, sino que también impulsa un modelo de desarrollo territorial en gran medida más inclusivo y respetuoso con el medio ambiente.

7. Conclusiones

Implementar tecnologías de secado solar representa una solución sostenible y práctica para afrontar los desafíos de la postcosecha en el sector agrícola del país. En este informe se destacaron los hallazgos clave, el impacto potencial y la necesidad de contar con un enfoque colaborativo para la maximización de los beneficios de estas tecnologías.

7.1 Resumen de Hallazgos

A lo largo de la ejecución del proyecto, se identificaron diversos escenarios favorables para la implementación y replicabilidad de las tecnologías de secado solar:

- Cosechas únicas: Las tecnologías fotovoltaicas acopladas a secadores tipo bomba de calor resultan ideales para temporadas cortas de alta producción, generando ingresos adicionales mediante la inyección de energía a la red fuera de la temporada de cosecha.
- Producción continua: Los sistemas termosolares y los secadores híbridos basados en renovables y con unidades de respaldo térmico destacan por su capacidad de operar de una manera constante durante todo el año, garantizando de esta manera un suministro estable de energía térmica para el proceso continuo y uniforme de deshidratado.
- Adaptación tecnológica por escala: Los secadores de tipo invernadero son los más adecuados para pequeños productores debido a su bajo costo de implementación y a su multifuncionalidad, mientras que las tecnologías de tipo híbridas y distribuidas son ideales para la agroindustria.
- Estrategias inclusivas: La capacitación técnica, el diseño modular de las tecnologías y los esquemas de financiamiento inclusivo son elementos fundamentales para garantizar la sostenibilidad y adopción tecnológica en todos los sectores.
- Modelo regional: En el Estado de Zacatecas, el uso exitoso de tecnologías híbridas y secadores tipo invernadero para el deshidratado ha demostrado una alta eficacia en condiciones climáticas variables. Este modelo es capaz de ser replicado en otras regiones con características similares, destacando la importancia del propuesto Laboratorio Nacional de Investigación e Innovación en Secado Solar (LANIISS) como un centro clave para la capacitación y transferencia tecnológica.

7.2 Impacto Potencial

El impacto potencial de estas tecnologías abarca diversas dimensiones: económicas, sociales y ambientales. Se detalla a continuación el impacto potencial en cada una de estas dimensiones.

- Económico: Fomento para la reducción de pérdidas postcosecha, aumento en los ingresos económicos de los productores y habilitación de acceso a nuevos mercados para productos deshidratados regionales de alta calidad. De manera particular, se proyecta un retorno de inversión acelerado en sistemas bien adaptados a las condiciones locales de su implementación.
- Social: Fortalecimiento de las comunidades rurales mediante la creación de figuras legalmente constituidas como cooperativas y redes de soporte, el empoderamiento de pequeños productores y la generación de empleos locales para el mantenimiento y operación de los sistemas.
- Ambiental: Mediante la significativa reducción del uso de combustibles fósiles, y consecuentemente, la disminución de emisiones de CO₂ para un aprovechamiento sostenible de la energía solar contribuyendo de esta manera a la mitigación del cambio climático.

Hay que recordar que garantizar la comercialización de los productos deshidratados es un elemento clave para la sostenibilidad económica de los sistemas de secado solar en la agroindustria en todas sus escalas,

desde pequeños a grandes productores. Los resultados del proyecto resaltaron que, además de la reducción en las pérdidas postcosecha y el valor agregado a los productos, es necesario el desarrollo de estrategias de mercado sólidas para asegurar un flujo constante de ingresos para los productores. Las experiencias obtenidas como las redes de comercialización formadas en Zacatecas muestran que pueden ser altamente efectivas al conectar a los usuarios de la planta con mercados locales y regionales, destacando así la importancia de considerar este factor desde las etapas iniciales de diseño e implementación de estrategias efectivas.

7.3 Llamado a la Acción

Para asegurar una replicabilidad exitosa y escalamiento de las tecnologías de secado solar, es imprescindible tener un enfoque colaborativo entre los siguientes actores clave:

1. **Gobiernos:** Mediante la consideración de estas tecnologías en nuevas políticas públicas de desarrollo rural y sostenibilidad energética asegurando, además, incentivos financieros y de respaldo técnico para estas tecnologías. La experiencia en Zacatecas resalta la necesidad de contar con un marco institucional sólido para el impulso regional del escalamiento.
2. **Productores:** Mediante la organización de productores y usuarios de las tecnologías de secado en cooperativas para compartir el uso de infraestructura y costos derivados, facilitando así la adopción de tecnologías a menor escala, mientras se maximizan beneficios económicos y sociales.
3. **Academia e Industria:** Mediante el desarrollo de soluciones tecnológicas adaptativas y sostenibles, fundamentadas en la investigación aplicada, ingeniería y experiencias de los proyectos piloto. La propuesta del LANIIS en Zacatecas ya sienta un referente para el fomento de la innovación y transferencia de conocimiento en estas áreas.
4. **Organizaciones internacionales:** Mediante la promoción y búsqueda de financiamiento para proyectos de replicación en comunidades vulnerables, destacando los impactos positivos en la seguridad alimentaria global.

A manera de conclusión, el proyecto implementado demuestra que las tecnologías de secado solar no solamente son viables, sino que también son escalables, ofreciendo de esta manera un modelo que puede replicarse en diferentes regiones con características similares. También queda patente que la integración de estrategias técnicas, económicas y sociales asegura un impacto positivo a largo plazo para estos proyectos, fortaleciendo así las cadenas productivas y avanzando hacia un desarrollo agrícola sostenible y el bienestar social.

8. Casos de éxito en la implementación y réplica

Los casos de éxito proporcionan evidencia tangible de cómo las tecnologías de secado solar pueden transformarse en soluciones sostenibles y escalables para las comunidades rurales y agroindustrias. Este apartado presenta un caso destacado en Coahuayana, Michoacán, donde el emprendimiento Harina Plátano Xókotl adoptó tecnologías de secado solar tipo invernadero, logrando impactos significativos en la economía local, el desarrollo social y la sostenibilidad ambiental.

8.1. Caso de éxito: Harina Plátano Xókotl

La comunidad de Coahuayana, en el Estado de Michoacán, enfrenta desafíos que son comunes en las regiones agrícolas tales como: precios bajos del producto en el mercado, desperdicio de producto y la falta de alternativas para agregar valor al plátano verde que se produce en la región. Ante a esta situación, Harina Plátano Xókotl logró identificar la oportunidad del procesamiento de plátano en harina

panificable, siendo este un producto de alto valor nutricional con un mercado emergente en la industria de los alimentos saludables.

En el año 2022, Jaime Vázquez Silva, colaborador del emprendimiento de dicha empresa, se puso en contacto con el equipo técnico científico de la planta termosolar de Zacatecas, motivado por la necesidad de optimizar sus procesos para el deshidratado y expandir su capacidad de producción. Realizó una visita a la planta termosolar en Zacatecas, durante la cual recibió asesoría técnica sobre los secadores tipo invernadero y su aplicación en proyectos de mediana escala en la agroindustria. Gracias a esta colaboración, Harina Plátano Xókotl logró implementar secadores de tipo invernadero en su nueva planta procesadora de plátano que fue inaugurada el día 25 de junio de 2024 con una inversión federal y estatal de 5.42 millones de pesos. Este sistema permitió:

- Aumento en la capacidad de producción: Multiplicar por 10 la producción de harina de plátano.
- Reducción de desperdicios: Aprovechar más del 40% de la fruta que anteriormente se descartaba, fomentando una agricultura circular.
- Impacto ambiental positivo: Disminuir la dependencia de combustibles fósiles, reduciendo la huella de carbono en los procesos de secado.



Figura 11 Secador solar tipo invernadero de la planta harinera

Impacto Económico y Social:

- Diversificación de ingresos: La harina de plátano verde sustituyó al trigo en varios mercados, abriendo oportunidades nacionales e internacionales.
- Inclusión social: El modelo involucra activamente a mujeres rurales y adultos mayores, generando empleos accesibles en todas las etapas del proceso productivo, desde la cosecha hasta la comercialización.
- Empoderamiento comunitario: La iniciativa fomenta el arraigo de las generaciones jóvenes a su comunidad, promoviendo el desarrollo agroindustrial local.

Fortalecimiento Tecnológico: Harina Plátano Xókotl también integró sensores de temperatura y humedad inalámbricos en sus procesos de secado, gracias al acompañamiento técnico del equipo de Zacatecas. Esto mejoró la eficiencia energética y garantizó la calidad del producto final.



Figura 12 Participación del proyecto PRONAI de Zacatecas en la inauguración de la planta harinera de plátano.

8.2. Lecciones Aprendidas y Potencial de Réplica

Lecciones Aprendidas:

1. Colaboración técnica: La transferencia de conocimiento desde la planta termosolar de Zacatecas fue esencial para implementar tecnologías adecuadas.
2. Financiamiento estratégico: Los subsidios gestionados con SADER y el gobierno estatal facilitaron la inversión inicial, haciendo posible el escalamiento del proyecto.
3. Capacitación continua: El fortalecimiento de capacidades locales asegura la sostenibilidad de los proyectos en el largo plazo.

El caso de éxito de Harina Plátano Xókotl demuestra que las tecnologías de secado solar son viables y replicables en comunidades rurales con condiciones climáticas y productivas similares. La combinación de innovación tecnológica, financiamiento accesible y organización comunitaria crea un modelo robusto que puede implementarse en otras regiones, fortaleciendo cadenas de valor agroindustriales y promoviendo el desarrollo territorial.

8.4. Impacto Regional

Este caso no solo transformó la agroindustria local, sino que también estableció un precedente para proyectos futuros en Michoacán y estados vecinos. La colaboración con el Laboratorio Nacional de Investigación e Innovación en Secado Solar (LANIISS) refuerza el potencial de escalamiento y transferencia tecnológica a nivel regional y nacional.

Referencias

- Acar, Canan, Ibrahim Dincer, y Arun Mujumdar. 2020. «A comprehensive review of recent advances in renewable-based drying technologies for a sustainable future». *Drying Technology* 0 (0): 1-27. <https://doi.org/10.1080/07373937.2020.1848858>.
- Aggarwal, Satakshi, Ashish Mohite, y N. Sharma. 2018. «The maturity and ripeness phenomenon with regard to the physiology of fruits and vegetables: A review». *Bulletin of the Transilvania University of Brasov* 11 (julio):77-88.
- Alamar, Maria Del Carmen, Natalia Falagán, Emel Aktas, y Leon A. Terry. 2018. «Minimising Food Waste: A Call for Multidisciplinary Research». *Journal of the Science of Food and Agriculture* 98 (1): 8-11. <https://doi.org/10.1002/jsfa.8708>.

- Alexander, Catherine, y Chris Smaje. 2008. «Surplus Retail Food Redistribution: An Analysis of a Third Sector Model». *Resources, Conservation and Recycling* 52 (11): 1290-98. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2008.07.009>.
- Amer, B. M. A., M. A. Hossain, y K. Gottschalk. 2010. «Design and Performance Evaluation of a New Hybrid Solar Dryer for Banana». *Energy Conversion and Management* 51 (4): 813-20. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2009.11.016>.
- Amjad, Waseem, Gohar Ali Gilani, Anjum Munir, Furqan Asghar, Azhar Ali, y Muhammad Waseem. 2020. «Energetic and Exergetic Thermal Analysis of an Inline-Airflow Solar Hybrid Dryer». *Applied Thermal Engineering* 166 (febrero):114632. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.114632>.
- Ananno, Anan Ashrabi, Mahadi Hasan Masud, Peter Dabnichki, y Asif Ahmed. 2020. «Design and Numerical Analysis of a Hybrid Geothermal PCM Flat Plate Solar Collector Dryer for Developing Countries». *Solar Energy* 196 (enero):270-86. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.11.069>.
- Anum, Rabia, Abdul Ghafoor, y Anjum Munir. 2017. «Study of the Drying Behavior and Performance Evaluation of Gas Fired Hybrid Solar Dryer». *Journal of Food Process Engineering* 40 (2): e12351. <https://doi.org/10.1111/jfpe.12351>.
- Arekornchee, Weang, Thanee Uthai, y Siwaluk Phataweerat. 2014. «Study on solar greenhouse dryer model for rubber sheet drying». En . Pranakorn Sri Ayutthaya, Thailand.
- Aydin, Emine, y Duygu Gocmen. 2015. «The Influences of Drying Method and Metabisulfite Pre-Treatment on the Color, Functional Properties and Phenolic Acids Contents and Bioaccessibility of Pumpkin Flour». *LWT - Food Science and Technology* 60 (1): 385-92. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2014.08.025>.
- Azeez, Luqmon, Segun A. Adebisi, Abdurasaq O. Oyedeji, Rasheed O. Adetoro, y Kazeem O. Tijani. 2019. «Bioactive Compounds' Contents, Drying Kinetics and Mathematical Modelling of Tomato Slices Influenced by Drying Temperatures and Time». *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences* 18 (2): 120-26. <https://doi.org/10.1016/j.jssas.2017.03.002>.
- BAMX. 2020. «Report of the Foodbanking Network of Mexico». México: Foodbanking of Mexico. <https://www.bamx.org.mx/datos-que-alimentan/>.
- Belessiotis, V., y E. Delyannis. 2011. «Solar drying». *Solar Energy, Progress in Solar Energy* 1, 85 (8): 1665-91. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2009.10.001>.
- Berk, Zeki. 2018. «Chapter 22 - Dehydration». En *Food Process Engineering and Technology (Third Edition)*, editado por Zeki Berk, 513-66. Food Science and Technology. Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812018-7.00022-1>.
- Boughali, S., H. Benmoussa, B. Bouchekima, D. Mennouche, H. Bouguettaia, y D. Bechki. 2009. «Crop Drying by Indirect Active Hybrid Solar – Electrical Dryer in the Eastern Algerian Septentrional Sahara». *Solar Energy* 83 (12): 2223-32. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2009.09.006>.
- Brodowska, Katarzyna Małgorzata. 2017. «Natural Flavonoids: Classification, Potential Role, and Application of Flavonoid Analogues». *European Journal of Biological Research* 7 (2): 108-23.
- Chauhan, Chetna, Amandeep Dhir, Manzoor Ul Akram, y Jari Salo. 2021. «Food Loss and Waste in Food Supply Chains. A Systematic Literature Review and Framework Development Approach». *Journal of Cleaner Production* 295 (mayo):126438. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126438>.
- Chegere, Martin Julius. 2018. «Post-Harvest Losses Reduction by Small-Scale Maize Farmers: The Role of Handling Practices». *Food Policy* 77 (mayo):103-15. <https://doi.org/10.1016/j.foodpol.2018.05.001>.
- Chen, Canxi, Abhishek Chaudhary, y Alexander Mathys. 2020. «Nutritional and Environmental Losses Embedded in Global Food Waste». *Resources, Conservation and Recycling* 160 (septiembre):104912. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.104912>.
- Chiewchan, Naphaporn, Arun S. Mujumdar, y Sakamon Devahastin. 2015. «Application of Drying Technology to Control Aflatoxins in Foods and Feeds: A Review». *Drying Technology* 33 (14): 1700-1707. <https://doi.org/10.1080/07373937.2015.1068795>.



inifap



SITS



Zacatecas
GOBIERNO DEL ESTADO
2021-2027

- CONACYT. 2016. «Agenda de Innovación Región Norte». <http://www.agendasinnovacion.org/wp-content/uploads/2015/07/Agenda-de-Innovaci%C3%B3n-Regi%C3%B3n-Norte.pdf>.
- Condorí, Miguel, Gonzalo Duran, Ricardo Echazú, y Fabiana Altobelli. 2017. «Semi-industrial drying of vegetables using an array of large solar air collectors». *Energy for Sustainable Development* 37 (abril):1-9. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2016.11.004>.
- Condorí, Miguel, y Luis Saravia. 1998. «The performance of forced convection greenhouse driers». *Renewable Energy* 13 (4): 453-69. [https://doi.org/10.1016/S0960-1481\(98\)00030-5](https://doi.org/10.1016/S0960-1481(98)00030-5).
- Daghigh, Roonak, y Abdellah Shafieian. 2016. «An Experimental Study of a Heat Pipe Evacuated Tube Solar Dryer with Heat Recovery System». *Renewable Energy* 96 (octubre):872-80. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.05.025>.
- Dahiya, Shikha, A. Naresh Kumar, J. Shanthi Sravan, Sulogna Chatterjee, Omprakash Sarkar, y S. Venkata Mohan. 2018. «Food Waste Biorefinery: Sustainable Strategy for Circular Bioeconomy». *Bioresource Technology*, Bioconversion of Food Wastes, 248 (enero):2-12. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.07.176>.
- Damiani, Mattia, Tiziana Pastorello, Anna Carlesso, Stefania Tesser, y Elena Semenzin. 2021. «Quantifying Environmental Implications of Surplus Food Redistribution to Reduce Food Waste». *Journal of Cleaner Production* 289 (marzo):125813. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.125813>.
- Defraeye, Thijs. 2014. «Advanced computational modelling for drying processes – A review». *Applied Energy* 131 (octubre):323-44. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.06.027>.
- Dejchanchaiwong, Racha, Yutthana Tirawanichakul, Supawan Tirawanichakul, Anil Kumar, y Perapong Tekasakul. 2017. «Conjugate heat and mass transfer modeling of a new rubber smoking room and experimental validation». *Applied Thermal Engineering* 112 (febrero):761-70. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.10.108>.
- Dev, Satyanarayan R. S., y Vijaya G. S. Raghavan. 2012. «Advancements in Drying Techniques for Food, Fiber, and Fuel». *Drying Technology* 30 (11-12): 1147-59. <https://doi.org/10.1080/07373937.2012.692747>.
- Dhanuskodi, Saravanan, Vincent Wilson, y Sudhakar Kumarasamy. 2014. «Design and Thermal Performance of the Solar Biomass Hybrid Dryer for Cashew Drying». *Facta Universitatis, Series: Mechanical Engineering* 12 (3): 277-88.
- Ekechukwu, O. V, y B Norton. 1999. «Review of solar-energy drying systems II: an overview of solar drying technology». *Energy Conversion and Management* 40 (6): 615-55. [https://doi.org/10.1016/S0196-8904\(98\)00093-4](https://doi.org/10.1016/S0196-8904(98)00093-4).
- El Hage, Hicham, Amal Herez, Mohamad Ramadan, Hassan Bazzi, y Mahmoud Khaled. 2018. «An investigation on solar drying: A review with economic and environmental assessment». *Energy* 157 (agosto):815-29. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.05.197>.
- El-Sebaei, A. A., y S. M. Shalaby. 2012. «Solar drying of agricultural products: A review». *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16 (1): 37-43. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.07.134>.
- Erick César, López-Vidaña, César-Munguía Ana Lilia, García-Valladares Octavio, Pilatowsky Figueroa Isaac, y Brito Orosco Rogelio. 2020. «Thermal Performance of a Passive, Mixed-Type Solar Dryer for Tomato Slices (*Solanum Lycopersicum*)». *Renewable Energy* 147 (marzo):845-55. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.09.018>.
- Esparza, Irene, Nerea Jiménez-Moreno, Fernando Bimbela, Carmen Ancín-Azpilicueta, y Luis M. Gandía. 2020. «Fruit and Vegetable Waste Management: Conventional and Emerging Approaches». *Journal of Environmental Management* 265 (julio):110510. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110510>.
- Fabi, Carola, Franck Cachia, Piero Conforti, Alicia English, y José Rosero Moncayo. 2020. «Improving Data on Food Losses and Waste: From Theory to Practice». *Food Policy*, septiembre, 101934. <https://doi.org/10.1016/j.foodpol.2020.101934>.
- FAO. 2011. «PÉRDIDAS Y DESPERDICIO DE ALIMENTOS EN EL MUNDO», 42.



inifap



SITS



Zacatecas
GOBIERNO DEL ESTADO
2021-2027

- . 2015a. «Iniciativa mundial sobre la reducción de la pérdida y el desperdicio de alimentos». <http://www.fao.org/3/a-i4068s.pdf>.
- . 2015b. «Pérdidas y desperdicios de alimentos en América Latina y el Caribe». <http://www.fao.org/3/a-i4655s.pdf>.
- . 2019. *STATE OF FOOD AND AGRICULTURE 2019: moving forward on food loss and waste ... reduction*. Place of publication not identified: FOOD & AGRICULTURE ORG.
- FAO y CEPAL. 2020. «Sistemas alimentarios y COVID-19 en América Latina y el Caribe N° 9: cómo disminuir las pérdidas y desperdicios de alimentos». CEPAL. <https://www.cepal.org/es/publicaciones/45768-sistemas-alimentarios-covid-19-america-latina-caribe-ndeg-9-como-disminuir>.
- Fudholi, A., K. Sopian, M. H. Ruslan, M. A. Alghoul, y M. Y. Sulaiman. 2010. «Review of solar dryers for agricultural and marine products». *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 14 (1): 1-30. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.07.032>.
- García-Valladares, O., Isaac Pilatowsky, N. Ortiz-Rodríguez, y C. Menchaca-Valdez. 2019. «Solar thermal dehydrating plant for agricultural products installed in Zacatecas, México». *WEENTECH Proceedings in Energy*, septiembre, 1-19. <https://doi.org/10.32438/WPE.1119>.
- Giroto, Francesca, Luca Alibardi, y Raffaello Cossu. 2015. «Food Waste Generation and Industrial Uses: A Review». *Waste Management, Urban Mining*, 45 (noviembre):32-41. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.06.008>.
- Gudiño-Ayala, David, y Ángel Calderón-Topete. 2014. «Pineapple Drying Using a New Solar Hybrid Dryer». *Energy Procedia*, 2013 ISES Solar World Congress, 57 (enero):1642-50. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.10.155>.
- Hamdani, T. A. Rizal, y Zulfri Muhammad. 2018a. «Fabrication and Testing of Hybrid Solar-Biomass Dryer for Drying Fish». *Case Studies in Thermal Engineering* 12 (septiembre):489-96. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2018.06.008>.
- . 2018b. «Fabrication and testing of hybrid solar-biomass dryer for drying fish». *Case Studies in Thermal Engineering* 12 (septiembre):489-96. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2018.06.008>.
- Hanson, Craig, Brian Lipinski, Kai Robertson, Debora Dias, Ignacio Gavilan, Pascal Gréverath, Sabine Ritter, et al. 2017. «FLW Protocol Steering Committee and Authors», 160.
- Hasan Masud, Mahadi, Azharul Karim, Anan Ashrabi Ananno, y Asif Ahmed. 2020a. «Insights of Drying». En *Sustainable Food Drying Techniques in Developing Countries: Prospects and Challenges*, editado por Mahadi Hasan Masud, Azharul Karim, Anan Ashrabi Ananno, y Asif Ahmed, 1-20. Cham: Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-42476-3_1.
- . 2020b. «Sustainable Drying Techniques for Developing Countries». En *Sustainable Food Drying Techniques in Developing Countries: Prospects and Challenges*, editado por Mahadi Hasan Masud, Azharul Karim, Anan Ashrabi Ananno, y Asif Ahmed, 81-168. Cham: Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-42476-3_5.
- Hossain, M. A., B. M. A. Amer, y K. Gottschalk. 2008. «Hybrid Solar Dryer for Quality Dried Tomato». *Drying Technology* 26 (12): 1591-1601. <https://doi.org/10.1080/07373930802467466>.
- Ismail, Muhammad Imran, Nor Alafiza Yunus, y Haslenda Hashim. 2021. «Integration of Solar Heating Systems for Low-Temperature Heat Demand in Food Processing Industry – A Review». *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 147 (septiembre):111192. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111192>.
- Janjai, S., N. Lamler, P. Intawee, B. Mahayothee, B. K. Bala, M. Nagle, y J. Müller. 2009. «Experimental and simulated performance of a PV-ventilated solar greenhouse dryer for drying of peeled longan and banana». *Solar Energy* 83 (9): 1550-65. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2009.05.003>.
- Janjai, Serm. 2012. «A greenhouse type solar dryer for small-scale dried food industries: Development and dissemination». *Int J Energy Environ* 3 (enero):383-98.
- Jha, Aprajeeta, y P. P. Tripathy. 2017. «Clean Energy Technologies for Sustainable Food Security». En *The Water-Food-Energy Nexus*. CRC Press.



inifap



SITS



Zacatecas
GOBIERNO DEL ESTADO
2021-2027

- . 2020. «Recent Advancements in Design, Application, and Simulation Studies of Hybrid Solar Drying Technology». *Food Engineering Reviews*, septiembre. <https://doi.org/10.1007/s12393-020-09223-2>.
- Kamfa, In'am, Jürgen Fluch, Ruben Bartali, y Derek Baker. 2020. «Solar-Thermal Driven Drying Technologies for Large-Scale Industrial Applications: State of the Art, Gaps, and Opportunities». *International Journal of Energy Research* 44 (13): 9864-88. <https://doi.org/10.1002/er.5622>.
- Karam, Marie Céleste, Jeremy Petit, David Zimmer, Elie Baudelaire Djantou, y Joël Scher. 2016. «Effects of Drying and Grinding in Production of Fruit and Vegetable Powders: A Review». *Journal of Food Engineering* 188 (noviembre):32-49. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2016.05.001>.
- Kaveh, Mohammad, Reza Amiri Chayjan, Ebrahim Taghinezhad, Vali Rasooli Sharabiani, y Ali Motevali. 2020. «Evaluation of Specific Energy Consumption and GHG Emissions for Different Drying Methods (Case Study: Pistacia Atlantica)». *Journal of Cleaner Production* 259 (junio):120963. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120963>.
- Kluczek, Aldona, y Paweł Olszewski. 2017. «Energy Audits in Industrial Processes». *Journal of Cleaner Production* 142 (enero):3437-53. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.10.123>.
- Kuiper, Marijke, y Hao David Cui. 2020. «Using Food Loss Reduction to Reach Food Security and Environmental Objectives – A Search for Promising Leverage Points». *Food Policy*, junio, 101915. <https://doi.org/10.1016/j.foodpol.2020.101915>.
- Kumar, Mahesh, y Pankaj Khatak. 2016. «Progress in solar dryers for drying various commodities». *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 55 (marzo):346-60. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.158>.
- Kummu, M., H. de Moel, M. Porkka, S. Siebert, O. Varis, y P. J. Ward. 2012. «Lost Food, Wasted Resources: Global Food Supply Chain Losses and Their Impacts on Freshwater, Cropland, and Fertiliser Use». *Science of The Total Environment* 438 (noviembre):477-89. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.08.092>.
- Lakshmi, D. V. N., P. Muthukumar, y Prakash Kumar Nayak. 2020. «Experimental Investigations on Active Solar Dryers Integrated with Thermal Storage for Drying of Black Pepper». *Renewable Energy*, diciembre. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.11.144>.
- Lamidi, Rasaq. O., L. Jiang, Pankaj B. Pathare, Y. D. Wang, y A. P. Roskilly. 2019. «Recent advances in sustainable drying of agricultural produce: A review». *Applied Energy* 233-234 (enero):367-85. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.10.044>.
- Langelaan, H.C., Pereira da Silva, Thoden van Velzen, U., y Schroën, K. 2013. *Technology Options for Feeding 10 Billion People :Options for Sustainable Food Processing : Summary*. LU: Publications Office. <https://data.europa.eu/doi/10.2861/43440>.
- Leon, M. Augustus, y S. Kumar. 2008. «Design and Performance Evaluation of a Solar-Assisted Biomass Drying System with Thermal Storage». *Drying Technology* 26 (7): 936-47. <https://doi.org/10.1080/07373930802142812>.
- Lingayat, Abhay, Ramakrishna Balijepalli, y V. P. Chandramohan. 2021. «Applications of Solar Energy Based Drying Technologies in Various Industries – A Review». *Solar Energy*, mayo. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.05.058>.
- Lingayat, Abhay Bhanudas, V. P. Chandramohan, V. R. K. Raju, y Venkatesh Meda. 2020. «A Review on Indirect Type Solar Dryers for Agricultural Crops – Dryer Setup, Its Performance, Energy Storage and Important Highlights». *Applied Energy* 258 (enero):114005. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.114005>.
- Lohnes, Joshua, y Bradley Wilson. 2018. «Bailing out the Food Banks? Hunger Relief, Food Waste, and Crisis in Central Appalachia». *Environment and Planning A: Economy and Space* 50 (2): 350-69. <https://doi.org/10.1177/0308518X17742154>.
- Lufu, Robert, Alemayehu Ambaw, y Umezuruike Linus Opara. 2020. «Water Loss of Fresh Fruit: Influencing Pre-Harvest, Harvest and Postharvest Factors». *Scientia Horticulturae* 272 (octubre):109519. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2020.109519>.



inifap



SITS



Zacatecas
GOBIERNO DEL ESTADO
2021-2027

- Madhlopa, A., y G. Ngwalo. 2007. «Solar dryer with thermal storage and biomass-backup heater». *Solar Energy* 81 (4): 449-62. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2006.08.008>.
- Masanet, Eric, Eric Masanet, Ernst Worrell, Wina Graus, y Christina Galitsky. 2008. «Energy Efficiency Improvement and Cost Saving Opportunities for the Fruit and Vegetable Processing Industry. An ENERGY STAR Guide for Energy and Plant Managers». LBNL-59289-Revision, 927884. <https://doi.org/10.2172/927884>.
- Menon, Abhay, Valentina Stojceska, y Savvas A. Tassou. 2020. «A Systematic Review on the Recent Advances of the Energy Efficiency Improvements in Non-Conventional Food Drying Technologies». *Trends in Food Science & Technology* 100 (junio):67-76. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2020.03.014>.
- Mhd Safri, Nurul Aiman, Zalita Zainuddin, Mohd Syahrman Mohd Azmi, Idris Zulkifle, Ahmad Fudholi, Mohd Hafidz Ruslan, y Kamaruzzaman Sopian. 2021. «Current Status of Solar-Assisted Greenhouse Drying Systems for Drying Industry (Food Materials and Agricultural Crops)». *Trends in Food Science & Technology* 114 (agosto):633-57. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.05.035>.
- Moses, J. A., Tomás Norton, K. Alagusundaram, y B. K. Tiwari. 2014. «Novel Drying Techniques for the Food Industry». *Food Engineering Reviews* 6 (3): 43-55. <https://doi.org/10.1007/s12393-014-9078-7>.
- Motevali, Ali, Saeid Minaei, Ahmad Banakar, Barat Ghobadian, y Mohammad Hadi Khoshtaghaza. 2014. «Comparison of Energy Parameters in Various Dryers». *Energy Conversion and Management* 87 (noviembre):711-25. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.07.012>.
- Motevali, Ali, Saeid Minaei, y Mohammad Hadi Khoshtaghaza. 2011. «Evaluation of Energy Consumption in Different Drying Methods». *Energy Conversion and Management* 52 (2): 1192-99. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2010.09.014>.
- Mujumdar, Arun S., ed. 2006. «Principles, Classification, and Selection of Dryers». En *Handbook of Industrial Drying*, 3.^a ed. CRC Press.
- Mujumdar, A.S. 2015. *Handbook of industrial drying*. Boca Raton, Florida, USA: CRC Press.
- Murali, S., P. R. Amulya, P. V. Alfiya, D. S. Aniesrani Delfiya, y Manoj P. Samuel. 2020. «Design and Performance Evaluation of Solar - LPG Hybrid Dryer for Drying of Shrimps». *Renewable Energy* 147 (marzo):2417-28. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.10.002>.
- Muriana, Cinzia. 2015. «Effectiveness of the Food Recovery at the Retailing Stage under Shelf Life Uncertainty: An Application to Italian Food Chains». *Waste Management* 41 (julio):159-68. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.03.028>.
- Mustayen, A. G. M. B., S. Mekhilef, y R. Saidur. 2014. «Performance study of different solar dryers: A review». *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 34 (junio):463-70. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.03.020>.
- Neff, Roni A., Rebecca Kanter, y Stefanie Vandevijvere. 2015. «Reducing Food Loss And Waste While Improving The Public's Health». *Health Affairs* 34 (11): 1821-29. <https://doi.org/10.1377/hlthaff.2015.0647>.
- Nonclercq, Antoine, Laurent Spreutels, Cédric Boey, Laurent Lonys, Benoit Dave, y Benoit Haut. 2009. «Construction of a Solar Drying Unit Suitable for Conservation of Food and Enhancement of Food Security in West Africa». *Food Security* 1 (2): 197-205. <https://doi.org/10.1007/s12571-009-0019-x>.
- Norton, Brian. 2021. «Industrial and Agricultural Applications of Solar Heat☆». En *Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819727-1.00076-5>.
- Oliveira, Sara M., Teresa R. S. Brandão, y Cristina L. M. Silva. 2016a. «Influence of Drying Processes and Pretreatments on Nutritional and Bioactive Characteristics of Dried Vegetables: A Review». *Food Engineering Reviews* 8 (2): 134-63. <https://doi.org/10.1007/s12393-015-9124-0>.



inifap



SITS



Zacatecas
GOBIERNO DEL ESTADO
2021-2027

- . 2016b. «Influence of Drying Processes and Pretreatments on Nutritional and Bioactive Characteristics of Dried Vegetables: A Review». *Food Engineering Reviews* 8 (2): 134-63. <https://doi.org/10.1007/s12393-015-9124-0>.
- Omolola, Adewale O., Afam I. O. Jideani, y Patrick F. Kapila. 2017. «Quality properties of fruits as affected by drying operation». *Critical Reviews in Food Science and Nutrition* 57 (1): 95-108. <https://doi.org/10.1080/10408398.2013.859563>.
- OPS-OMS. 2015. «Estrategia De Cooperación de la Organización Panamericana de la Salud/Organización Mundial de la Salud con México.» <https://www.paho.org/hq/dmdocuments/2015/Country-Cooperation-Strategy-MEX-2015-2018.pdf>.
- Ortiz-Rodríguez, N. M., M. Condorí, G. Durán, y O. García-Valladares. 2022a. «Solar Drying Technologies: A Review and Future Research Directions with a Focus on Agroindustrial Applications in Medium and Large Scale». *Applied Thermal Engineering* 215 (octubre):118993. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2022.118993>.
- . 2022b. «Solar Drying Technologies: A Review and Future Research Directions with a Focus on Agroindustrial Applications in Medium and Large Scale». *Applied Thermal Engineering* 215 (octubre):118993. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2022.118993>.
- Ortiz-Rodríguez, N. M., O. García-Valladares, I. Pilatowsky-Figueroa, y A. C. Menchaca-Valdez. 2020. «Solar-LP Gas Hybrid Plant for Dehydration of Food». *Applied Thermal Engineering* 177 (agosto):115496. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.115496>.
- Ortiz-Rodríguez, N. M., J. F. Marín-Camacho, A. Llamas- González, y O. García-Valladares. 2021. «Drying Kinetics of Natural Rubber Sheets under Two Solar Thermal Drying Systems». *Renewable Energy* 165 (marzo):438-54. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.11.035>.
- Othman, M. Y. H., K. Sopian, B. Yatim, y W. R. W. Daud. 2006. «Development of advanced solar assisted drying systems». *Renewable Energy, SOUTH/SOUTH*, 31 (5): 703-9. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2005.09.004>.
- Oueslati, Hatem, Salah Ben Mabrouk, y Abdelkader Marni. 2014. «Design and installation of a solar-gas tunnel dryer: Comparative experimental study of two scenarios of drying». En *2014 5th International Renewable Energy Congress (IREC)*, 1-6. <https://doi.org/10.1109/IREC.2014.6826970>.
- Patil, Rajendra, y Rupesh Gawande. 2016. «A review on solar tunnel greenhouse drying system». *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 56 (abril):196-214. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.11.057>.
- Perera, Conrad O., y M. Shafiur Rahman. 1997. «Heat pump dehumidifier drying of food». *Trends in Food Science & Technology* 8 (3): 75-79. [https://doi.org/10.1016/S0924-2244\(97\)01013-3](https://doi.org/10.1016/S0924-2244(97)01013-3).
- Pirasteh, G., R. Saidur, S. M. A. Rahman, y N. A. Rahim. 2014. «A review on development of solar drying applications». *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 31 (marzo):133-48. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.11.052>.
- Prakash, Om, y Anil Kumar. 2013. «Historical Review and Recent Trends in Solar Drying Systems». *International Journal of Green Energy* 10 (agosto). <https://doi.org/10.1080/15435075.2012.727113>.
- . 2014. «Solar greenhouse drying: A review». *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 29 (enero):905-10. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.08.084>.
- Prakash, Om, Vinod Laguri, Anukul Pandey, Anil Kumar, y Arbind Kumar. 2016. «Review on various modelling techniques for the solar dryers». *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 62 (septiembre):396-417. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.04.028>.
- Prasad, Jaishree, V. K. Vijay, G. N. Tiwari, y V. P. S. Sorayan. 2006. «Study on Performance Evaluation of Hybrid Drier for Turmeric (*Curcuma Longa L.*) Drying at Village Scale». *Journal of Food Engineering* 75 (4): 497-502. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2005.04.061>.



inifap



SITS



Zacatecas
GOBIERNO DEL ESTADO
2021-2027

- Prasanna, V., T. N. Prabha, y R. N. Tharanathan. 2007. «Fruit Ripening Phenomena--an Overview». *Critical Reviews in Food Science and Nutrition* 47 (1): 1-19. <https://doi.org/10.1080/10408390600976841>.
- Rahman, S.M. 2007. *Handbook of Food Preservation*. CRC Press. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0963996900001435>.
- Reyes, Alejandro, Andrea Mahn, y Francisco Vásquez. 2014. «Mushrooms Dehydration in a Hybrid-Solar Dryer, Using a Phase Change Material». *Energy Conversion and Management* 83 (julio):241-48. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.03.077>.
- Sabarez, Henry. 2016. «Drying of Food Materials». En *Reference Module in Food Science*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100596-5.03416-8>.
- . 2021a. «Advanced Drying Technologies of Relevance in the Food Industry». En *Innovative Food Processing Technologies*, editado por Kai Knoerzer y Kasiviswanathan Muthukumarappan, 64-81. Oxford: Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100596-5.23042-4>.
- . 2021b. «Advanced Drying Technologies of Relevance in the Food Industry». En *Innovative Food Processing Technologies*, editado por Kai Knoerzer y Kasiviswanathan Muthukumarappan, 64-81. Oxford: Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100596-5.23042-4>.
- Sabarez, Henry T. 2018. «Thermal Drying of Foods». En *Fruit Preservation: Novel and Conventional Technologies*, editado por Amauri Rosenthal, Rosires Deliza, Jorge Welti-Chanes, y Gustavo V. Barbosa-Cánovas, 181-210. Food Engineering Series. New York, NY: Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-4939-3311-2_7.
- Salehi, Fakhreddin, y Sara Aghajanzadeh. 2020. «Effect of Dried Fruits and Vegetables Powder on Cakes Quality: A Review». *Trends in Food Science & Technology* 95 (enero):162-72. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2019.11.011>.
- Searchinger, Tim, Richard Waite, Craig Hanson, Janet Ranganathan, y Emily Matthews. 2019. *Creating a Sustainable Food Future*. <https://www.wri.org/research/creating-sustainable-food-future>.
- SEMARNAT. 2017. «Estrategia Nacional para Evitar Desperdicio de Alimentos». <http://www.gob.mx/semarnat/prensa/impulsa-semarnat-estrategia-nacional-para-evitar-desperdicio-de-alimentos>.
- Shafiee-Jood, Majid, y Ximing Cai. 2016. «Reducing Food Loss and Waste to Enhance Food Security and Environmental Sustainability». *Environmental Science & Technology* 50 (16): 8432-43. <https://doi.org/10.1021/acs.est.6b01993>.
- Shrivastava, Vipin, Anil Kumar, y Prashant Baredar. 2014. «Developments in Indirect Solar Dryer: A Review». *International Journal of Wind and Renewable Energy* 3 (enero):67-74.
- Siddiqui, Mohammed, Samima Sultana, y S. Das. 2019. «Postharvest Biology and Technology of Horticultural Crops Principles and Practices for Quality Maintenance». En .
- Singh, Pushpendra, Vipin Shrivastava, y Anil Kumar. 2018. «Recent developments in greenhouse solar drying: A review». *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 82 (febrero):3250-62. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.10.020>.
- Smitabhindu, R., S. Janjai, y V. Chankong. 2008. «Optimization of a solar-assisted drying system for drying bananas». *Renewable Energy* 33 (7): 1523-31. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2007.09.021>.
- Spiker, Marie L., Hazel A. B. Hiza, Sameer M. Siddiqi, y Roni A. Neff. 2017. «Wasted Food, Wasted Nutrients: Nutrient Loss from Wasted Food in the United States and Comparison to Gaps in Dietary Intake». *Journal of the Academy of Nutrition and Dietetics* 117 (7): 1031-1040.e22. <https://doi.org/10.1016/j.jand.2017.03.015>.
- Srinivasan, G., y P. Muthukumar. 2021. «A Review on Solar Greenhouse Dryer: Design, Thermal Modelling, Energy, Economic and Environmental Aspects». *Solar Energy, Advances in Solar Dryers and Solar Air Heaters*, 229 (noviembre):3-21. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.04.058>.
- Strotmann, Christina, Christine Göbel, Silke Friedrich, Judith Kreyenschmidt, Guido Ritter, y Petra Teitscheid. 2017. «A Participatory Approach to Minimizing Food Waste in the Food Industry—A Manual for Managers». *Sustainability* 9 (1): 66. <https://doi.org/10.3390/su9010066>.



inifap



SITS



Zacatecas
GOBIERNO DEL ESTADO
2021-2027

- Swinburn, Boyd A., Vivica I. Kraak, Steven Allender, Vincent J. Atkins, Phillip I. Baker, Jessica R. Bogard, Hannah Brinsden, et al. 2019. «The Global Syndemic of Obesity, Undernutrition, and Climate Change: The Lancet Commission Report». *The Lancet* 393 (10173): 791-846. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(18\)32822-8](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(18)32822-8).
- Tromp, Seth, René Haijema, Hajo Rijgersberg, y Jack Van der Vorst. 2016. «A systematic approach to preventing chilled-food waste at the retail outlet». *International Journal of Production Economics* 182 (octubre). <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2016.10.003>.
- Tsotsas, Evangelos, y Arun S. Mujumdar. 2011. *Modern Drying Technology, Volume 4: Energy Savings*. John Wiley & Sons.
- Udomkun, Patchimaporn, Sebastian Romuli, Steffen Schock, Busarakorn Mahayothee, Murat Sartas, Tesfamicheal Wossen, Emmanuel Njukwe, Bernard Vanlauwe, y Joachim Müller. 2020. «Review of Solar Dryers for Agricultural Products in Asia and Africa: An Innovation Landscape Approach». *Journal of Environmental Management* 268 (agosto):110730. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110730>.
- Veerman, Jacob, Jan Barendregt, y Johan Mackenbach. 2006. «The European Common Agricultural Policy on fruits and vegetables: Exploring potential health gain from reform». *European journal of public health* 16 (marzo):31-35. <https://doi.org/10.1093/eurpub/cki166>.
- VijayaVenkataRaman, S., S. Iniyam, y Ranko Goic. 2012. «A review of solar drying technologies». *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16 (5): 2652-70. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.01.007>.
- Wang, Wei, Ming Li, Reda Hassanien Emam Hassanien, Yunfeng Wang, y Luwei Yang. 2018. «Thermal performance of indirect forced convection solar dryer and kinetics analysis of mango». *Applied Thermal Engineering* 134 (abril):310-21. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.01.115>.
- Yahia, Elhadi M., María Elena Maldonado Celis, y Mette Svendsen. 2017. «The Contribution of Fruit and Vegetable Consumption to Human Health». En *Fruit and Vegetable Phytochemicals*, 1-52. John Wiley & Sons, Ltd. <https://doi.org/10.1002/9781119158042.ch1>.
- Yassen, Tadahmun A., y Hussain H. Al-Kayiem. 2016. «Experimental Investigation and Evaluation of Hybrid Solar/Thermal Dryer Combined with Supplementary Recovery Dryer». *Solar Energy* 134 (septiembre):284-93. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.05.011>.
- Zoukit, Ahmed, Hicham El Ferouali, Issam Salhi, Said Doubabi, y Naji Abdenouri. 2019. «Simulation, Design and Experimental Performance Evaluation of an Innovative Hybrid Solar-Gas Dryer». *Energy* 189 (diciembre):116279. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.116279>.