2021

Tecnologías de secado solar para mitigar la pérdida de productos frutihortícolas

Autor: M.E. Néstor Ortiz Rodríguez,

Breve descripción: Este reporte se presenta la técnica de deshidratación de alimentos como un medio eficaz para reducir el desperdicio en la cadena de alimento. Se aborda el secado solar como una tecnología energéticamente eficiente y ecológica para ayudar a lograr la sostenibilidad. Se presentan las tecnologías de secado solares tipo invernadero e indirecto híbrido con almacenamiento de energía como apropiadas en escala y versatilidad para hacer frente al reto de mitigar la perdida y desperdicio de alimentos.

12-11-2021

Tabla de contenido

Introducción 3

Enmarcando el problema del desperdicio de alimentos 6

- Cuantificación del desperdicio de alimentos 7
- Fallas del mercado e institucionales en la generación de pérdida de alimentos en México (World Bank 2018) 9
- Fallas del mercado 9
- Fallas institucionales 10
- Fallas del mercado e institucionales específicas para México 10
  - Asimetrías de información 10
  - Excesivo poder de mercado que resulta en la concentración del mercado dentro de las cadenas agroalimentarias en México. 11
- Pérdidas en la post-cosecha 15
  - Daño mecánico 15
  - Almacenamiento 15
  - Procesamiento 16
  - Embalaje 16
  - Transporte y distribución 16
- Pérdidas en el comercio mayorista y minorista 17
- Efectos del desperdicio de alimentos 18

El secado como técnicas de preservación de alimentos 19

- Secadores para aplicaciones comerciales más comunes 21
  - Deshidratación del túnel 21
  - Secado de cinta transportadora 22
  - Deshidratación con bomba de calor 23
  - Secado de tambor 24
  - Secado por aspersión 25
  - Secar en frío 26

Incorporación de Energías Renovables 27

Sistemas de secado solar 29

- Clasificación de las tecnologías de secado solar 29
- Secadores solares distribuidos 30
- Secadores solares integrales 33

Revisión del secador solar de escala mediana y grande 35
Desafíos en la implementación de técnicas de secado solar 37
Discusiones y conclusiones 38
Referencias 40

Introducción

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).

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 2011b) (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 2011b). 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 $C0_2$, 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 rescato 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 perecederos 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 (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 (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 invernaderocuando 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.

Enmarcando el problema del desperdicio de alimentos

Partiendo de la perspectiva de la seguridad alimentaria y la nutrición, se define la pérdida y desperdicio de alimentos (PDA) como la disminución de la masa de alimentos comestibles de la cadena de suministro o valor que conduce específicamente a los alimentos comestibles para el consumo humano. La cadena de suministro o valor de los alimentos es el sistema de organizaciones, personas y actividades involucradas en el traslado de alimentos desde el productor (generalmente el agricultor) hasta el consumidor final (ver Figura 1). El carácter perecedero de las frutas y verduras las convierte en uno de los alimentos más desperdiciados dentro de la cadena de valor de suministro.

Figura 1 Diagrama de la cadena alimentaria y flujo de los residuos de alimentos. Fuente: («CATALOGO_DE_INICIATIVAS_2014_baja.pdf» s. f.)

La FAO distinguen entre la pérdida y el desperdicio de alimentos, teniendo en cuenta la fase de la cadena de valor en la que se genera: *la pérdida de alimentos se* refiere a la cantidad o calidad de los alimentos perdidos en las etapas de producción, procesamiento, almacenamiento y distribución. *El desperdicio de alimentos*, generalmente ocurre en las etapas de venta al por menor y consumo y se refiere a los alimentos que se desechan antes o después de que se echen a perder, así como al uso alternativo (no alimentario) de alimentos que son comestibles y seguros para el consumo humano (FAO 2019). La Comisión Europea se refiere a los excedentes de alimentos como productos alimenticios terminados o semi-acabados, o ingredientes en cualquier etapa de la cadena de producción y distribución de alimentos que son aptos para el consumo humano pero que no cumplen con las especificaciones del fabricante o del cliente. Se ha demostrado que la sobreproducción contribuye a la brecha entre la producción y el consumo que da lugar a un excedente de alimentos a lo largo de una cadena de suministro, y por consiguiente, la generación del desperdicio de alimentos.

Alguno de los factores causales que contribuyen a la sobreproducción se encuentra: una falta común de transparencia de la demanda en una compleja cadena de suministro de alimentos, el énfasis en la especialización e industrialización de productos alimenticios, las intervenciones regulatorias (o la falta de ellas) que tienen el efecto de incentivar la sobreproducción como los subsidios orientados a la producción, el fomento rutinario del consumo excesivo y los ejercicios de poder de los supermercados sobre los proveedores.

Cuantificación del desperdicio de alimentos

La cantidad de desechos de frutas frescas, verduras, carne, panadería y productos lácteos a lo largo de la cadena de suministro varía de los países desarrollados a los países en desarrollo. La FAO ha estimado que alrededor de 1.300 millones de toneladas por año de partes comestibles de alimentos destinados al consumo humano se descartan y desperdician en todo el mundo (FAO 2011b). En América del Norte (Canadá, Estados Unidos y México), las estimaciones de PDA en todo la cadena de suministro de alimentos es de casi 170 millones de toneladas. Las métricas de PDA en todo el mundo se estiman en aproximadamente un tercio de los alimentos producidos.

La PDA desde la producción hasta la etapa de minorista es alta en los países en desarrollo en comparación con los países desarrollados debido al uso insuficiente de tecnologías e infraestructuras inadecuadas. Por el contrario, el desperdicio de alimentos en la etapa de consumo es mucho mayor en los países desarrollados que en los países en desarrollo. Los factores que influyen en el desperdicio de alimentos incluyen la psicología del consumidor, la calidad de los alimentos, junto con algunas otras características que contribuyen al equilibrio de la salud y el estilo de vida.

Los alimentos se desperdician en diferentes etapas de la cadena de suministro de alimentos en los países en desarrollo y desarrollados, en los primeros, la cosecha y la producción primaria son críticas. Pueden ocurrir factores impredecibles, como daños climáticos, enfermedades y contaminación ambiental, junto con una cosecha prematura o ineficiente. Durante el procesamiento y la transformación de alimentos, el desperdicio de alimentos está fuertemente relacionado con la falta de sistemas de conservación y transporte decentes, la falta de instalaciones de transformación o fallas en la fabricación y limitaciones financieras (FAO 2019). Las diferentes etapas del desperdicio de alimentos se representan en la Figura 2.

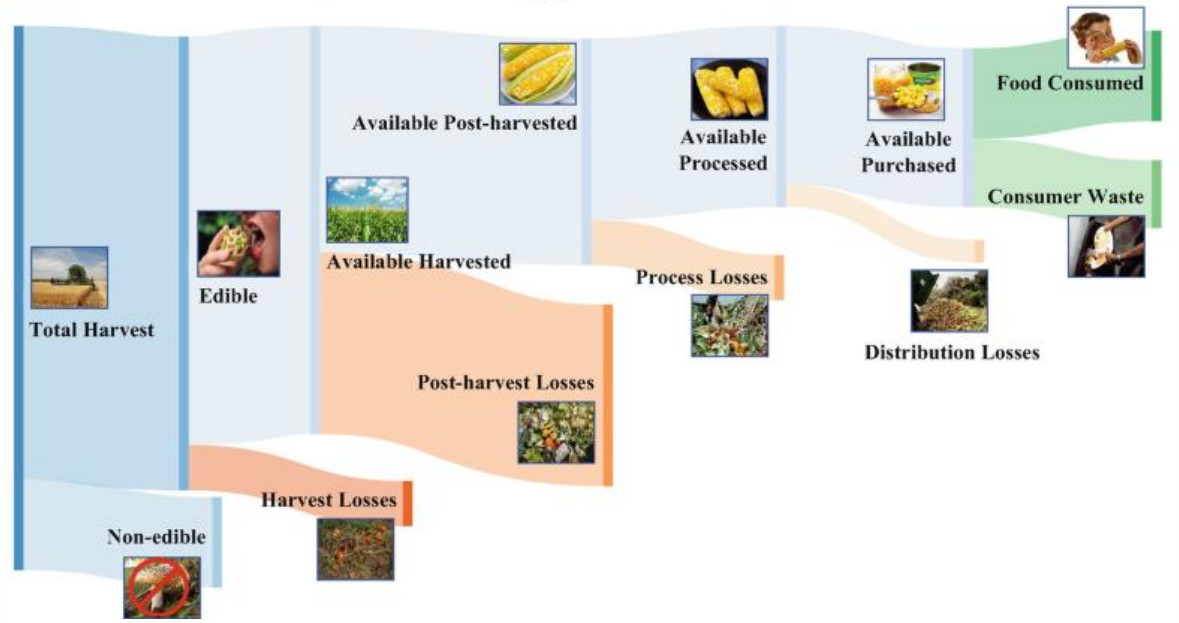

Figura 2 Escenario de pérdidas de alimentos en la cadena de suministro (Hasan Masud et al. 2020a)

Las proporciones pueden variar debido a las diferencias en las condiciones de funcionamiento que se encuentran en diferentes regiones del mundo. En general, las pérdidas máximas ocurren en la fase de producción en todos los países, lo que representa alrededor del 25 ~ 38% de la pérdida total de alimentos. Entre los factores que contribuyen al desperdicio de alimentos, la cosecha prematura y las situaciones climáticas adversas tienen el efecto más profundo. Las pérdidas post-cosecha, que ascienden al 10-25% de la pérdida total de alimentos, se deben principalmente al clima húmedo, los embalajes inadecuados y los sistemas de almacenamiento de alimentos inadecuados. Debido a la utilización de instalaciones de almacenamiento avanzadas, la proporción de pérdida post-cosecha es menor en los países desarrollados en comparación con sus contrapartes en desarrollo.

Debido a la alta estacionalidad de los alimentos, junto con las malas técnicas de conservación y el procesamiento inadecuado, se desperdicia entre el 5% y el 15% de los alimentos. Las otras pérdidas ocurren en la etapa de consumo y representan entre el 10 y el 40% del desperdicio total de alimentos en todo el mundo. La severidad e ineficiencia de los desechos en las etapas de procesamiento y manejo post-cosecha son más significativas en los países en desarrollo en comparación con los países desarrollados. El desperdicio a nivel de consumidor es peor en los países desarrollados que en los en desarrollo. Los estándares de calidad, las preferencias de los clientes y las tendencias del mercado también juegan un papel importante a la hora de determinar qué productos llegan realmente al supermercado para ser comprados y consumidos.

Las estadísticas de desperdicio de alimentos antes mencionadas representan el desperdicio de frutas y verduras; sin embargo, otros tipos de alimentos muestran casi la misma tendencia.

Fallas del mercado e institucionales en la generación de pérdida de alimentos en México (World Bank 2018)

Fallas del mercado

En términos muy simples, los puntos críticos (o *hotspots*) se consideran puntos a lo largo de una cadena de valor alimentaria donde se produce una pérdida o desperdicio de alimentos importante. Los puntos críticos son *causados por* varias fallas del mercado y fallas institucionales como un subconjunto de fallas del mercado. Una falla del mercado puede considerarse como un problema inherente al mercado que causa que la asignación de equilibrio del mercado, en este caso de los alimentos y los precios de los alimentos, sea ineficiente. Los mercados en equilibrio no siempre son eficientes. Si el mercado no está regulado, la asignación de equilibrio puede ser ineficiente y se dice que el mercado falla. Algunos ejemplos de fallas del mercado relevantes para la pérdida de alimentos incluyen: exceso de poder en el mercado, asimetrías de información, falta de mercados, distorsiones en los mercados de capitales, externalidades, servicios públicos. Por lo tanto, las soluciones a las fallas del mercado pueden ser inherentemente privadas o públicas.

En resumen, una falla del mercado ocurre cuando el mercado no puede lograr un rendimiento óptimo. La literatura al respecto muestra que una de las principales causas de fallas del mercado es la información asimétrica. La asimetría de la información es la situación en la que diferentes operadores de la cadena alimentaria tienen información diferente sobre una transacción (precios, cantidades demandadas u ofrecidas, costos, calidad, etc. (Pindyck, 2002). La asimetría de información generalmente favorece a una parte en detrimento de la otra, de modo que los mercados no funcionan de manera óptima. Una de las principales preocupaciones de los agricultores en economías como México es la existencia de asimetría de información entre el productor y el comprador.

La posesión de información completa relacionada con el mercado específico en el que se llevará a cabo el proceso de transacción de bienes y servicios o una actividad comercial es fundamental en el campo comercial, porque solo entonces es posible tener conocimiento de la operación, así como de los diferentes agentes comerciales que operan en el mercado.

La categoría de fallas del mercado incluye la necesidad de varios tipos de infraestructura que no pueden ser generados por grupos individuales o pequeños de agentes, y por lo tanto son de naturaleza pública. Existe una clara necesidad de intervención pública en la coordinación a lo largo de la cadena de valor y en la disponibilidad de crédito para invertir en tecnología rentable, sostenible y que reduzca las pérdidas. Por lo general, los agentes optimizarían dadas las condiciones del mercado existentes en ese momento, tales como infraestructura, instituciones y/o crédito inadecuados.

En los países desarrollados, se han emprendido muchas acciones en términos de regulación y de política para controlar los atributos en las transacciones de alimentos; sin embargo, en mercados muy heterogéneos es necesario mejorar las condiciones físicas para lograr un mercado más eficiente y competitivo.

Por lo tanto, en el caso de las cadenas agroalimentarias, las fallas del mercado también pueden ocurrir cuando surgen problemas logísticos, de distribución de alimentos o del mercado debido a la falta de una intervención adecuada por parte de instituciones privadas o públicas o la ausencia de ellas (carreteras dañadas, infraestructura insuficiente, inseguridad en territorios específicos, etc.). En muchos mercados agroalimentarios, la escasez de infraestructura y

servicios de almacenamiento y transporte puede causar diferentes complicaciones para los productores o comercializadores de productos primarios o procesados.

Fallas institucionales

Las fallas institucionales pueden considerarse como un subconjunto de fallas del mercado que ocurren cuando las intervenciones públicas en el lado de la regulación, es decir, políticas institucionales, leyes, etc., no promueven la actividad económica. El concepto de falla institucional se ha interpretado de muchas maneras diferentes según la perspectiva disciplinaria adoptada. El enfoque de innovación (Woolthuis et al., 2005) divide las fallas institucionales en 'fallas institucionales duras' (fallas en el marco de la regulación y del sistema legal) y 'fallas institucionales suaves' (fallas en las instituciones sociales tales como la cultura política y los valores sociales). Cuando las políticas y la regulación fallan, por ejemplo, cuando la capacitación laboral o la seguridad jurídica no están garantizadas, o cuando los mecanismos de distribución del mercado fallan debido a que la intervención pública genera inequidad (como en el caso de ciertos subsidios agrícolas), se generan fallas institucionales.

Las fallas institucionales ocurren cuando falla la regulación estatal. La regulación económica es el conjunto de medidas legislativas, administrativas y convencionales, abstractas o concretas, por medio de las cuales el estado determina, controla o influye en el comportamiento de los actores económicos, evitando que dañen los intereses sociales definidos en el marco de la Constitución y orientándolos en direcciones socialmente deseables. Las fallas institucionales siempre tienen que ver con el desempeño del gobierno.

Además, la función institucional debe actuar para mantener el funcionamiento adecuado de los mercados buscando introducir objetivos generales que no serían alcanzados exclusivamente por la iniciativa privada. Un buen ejemplo de estos objetivos generales en el sector agroalimentario, que no se alcanzarían naturalmente mediante intervenciones privadas, es minimizar las pérdidas y el desperdicio de alimentos. Entonces, al evaluar las políticas públicas que están teóricamente dirigidas a mejorar la eficiencia económica –determinando sus beneficios netos e identificando a los ganadores y perdedores–, una distribución social desigual de dichos beneficios constituiría una falla institucional. En general, en países con un nivel más bajo de desarrollo económico, frecuentemente ocurren fallas institucionales que generan un ambiente que no es adecuado para lograr la eficiencia económica (Winston, 2006).

Fallas del mercado e institucionales específicas para México

Asimetrías de información

El problema de la información asimétrica, como se discutió anteriormente, es ampliamente considerado como una de las principales fallas del mercado que afecta las cadenas de suministro de alimentos en México. A continuación discutimos las principales soluciones propuestas a partir de la experiencia local, teniendo en cuenta la literatura económica sobre información asimétrica a lo largo de las cadenas de suministro de alimentos.

En los modelos económicos tradicionales, se espera que todos los agentes económicos (agricultores, distribuidores y comerciantes de alimentos, y consumidores) tengan información perfecta. De hecho, esto no ocurre en la mayoría de los casos. El enfoque de modelado, en el que los actores tienen información perfecta, cambió después del artículo de Stigler (1961) sobre la "Economía de la información". George Akerlof (1995) es uno de los pioneros en este campo, examinando las consecuencias de la información asimétrica en el mercado de automóviles de segunda mano. En comparación con el modelo económico clásico, las economías modernas requieren una alta tasa de interacción entre los participantes del mercado. Por lo tanto, en los

últimos treinta años ha habido un desarrollo considerable de la literatura económica sobre el diseño de contratos cuando la información es asimétrica en diversos campos tales como el pago de servicios agroambientales, las relaciones de cadena y la calidad de los alimentos (Laffont y Tirole, 1993; Laffont y Martimort, 2002).

En particular, las cadenas de suministro de alimentos se caracterizan por información imperfecta con fuertes asimetrías a lo largo de la cadena (Starbird et al., 2007). Estas asimetrías generalmente causan un aumento en los costos durante las transacciones económicas (Bogetoft y Olesen, 2004). La falta de información sobre calidad, precio y seguridad que a menudo ocurre en las transacciones a lo largo de la cadena de suministro hasta llegar al consumidor final (Fernández 2008) a su vez conduce a una menor productividad y/o mayores costos. La calidad e inocuidad de los alimentos son notoriamente difíciles de estimar y, a veces, se reconocen solo después del consumo y, por lo tanto, se clasifican como buenas o malas experiencias.

Las consecuencias de la información asimétrica son el riesgo moral, cuando no se puede observar la acción del agente, y la selección adversa, cuando las características de un producto están ocultas o son subyacentes. En muchos casos en el sector alimentario mexicano, el agente trata de no revelar las características detalladas de la calidad de los alimentos y los esfuerzos realizados para revelar información oculta determinan la distorsión en la decisión económica que conduce a resultados ineficientes.

Excesivo poder de mercado que resulta en la concentración del mercado dentro de las cadenas agroalimentarias en México.

El poder excesivo de mercado a menudo se puede ver como una falla institucional anidada en una falla del mercado. La maximización de la eficiencia en los mercados caracterizados por monopolios, monopsonios u oligopolios, o el poder de mercado excesivo desafía la lógica económica tradicional para la regulación de las fallas del mercado. Los monopolios y los monopsonios se asocian comúnmente con ineficiencias, estáticas o dinámicas. Desde el punto de vista estático, los monopolios y los monopsonios crean ineficiencias, imponiendo precios muy por encima de sus costos marginales que se traducen en ganancias extraordinarias. En términos dinámicos, los monopolios o monopsonios no tienen incentivos para difundir la innovación tecnológica entre sus competidores.

En teoría económica, la competencia perfecta se produce cuando las empresas obtienen una tasa normal de rendimiento del mercado a largo plazo. Por supuesto, algunas compañías pueden tener tecnologías y administración superiores, lo que les permite obtener una tasa de rendimiento más alta de lo normal por un período indeterminado. Pero cuando una empresa intenta obtener excedentes de los consumidores mediante el comportamiento ilegal para monopolizar un mercado o abusar de su poder de mercado, la política gubernamental, codificada en las leyes antimonopolio, puede mejorar el bienestar del consumidor al detener estas acciones y desalentar a otras empresas que participen en tal comportamiento.

Debido a que es probable que un monopolio o un monopsonio no regulado extraigan excedentes del consumidor o del productor a expensas del bienestar general, la política gubernamental en forma de regulación económica puede mejorar el bienestar económico al establecer precios más eficientes. Los precios óptimos podrían establecerse a un costo marginal con un subsidio o impuesto que permita regular al monopolio o al monopsonio.

Aunque las regulaciones antimonopolio y las económicas están motivada por diferentes preocupaciones, comparten un tema común en el sentido de que ambas buscan acercar al mercado al ideal competitivo. La justificación teórica de las leyes antimonopolio y de la

regulación económica no implica que la intervención del gobierno sea necesaria para frenar el poder del mercado y mejorar la eficiencia económica, o que lo haya hecho en la práctica. Ninguna de las intervenciones está justificada simplemente porque hay ejemplos de empresas que se han coludido o pueden identificar mercados sujetos a economías de escala en una amplia gama de productos. Frenar el poder de mercado solo puede justificarse por la evidencia de que estas políticas pueden aumentar la producción (a través de una mayor demanda que, por ende, influye en la seguridad alimentaria) o disminuir la producción (generando así beneficios ambientales y de otro tipo) y, por lo tanto, aumentar el bienestar social.

Sin embargo, la regulación excesiva también puede hacer que la actividad económica sea ineficiente. La regulación económica de los productos agrícolas y el comercio internacional, en las últimas décadas, ha producido grandes pérdidas de eficiencia en el proceso de transferencia de recursos de los productores a los consumidores.

El poder de mercado excesivo resulta en una de las mayores distorsiones económicas en las cadenas agroalimentarias en México. Esto significa un alto grado de concentración de la producción y comercialización de alimentos. En 2015, la Comisión Federal de Competencia Económica de México (COFECE, 2015) generó un informe sobre las condiciones de competencia en el sector agroalimentario mexicano. El estudio analizó 16 productos y 4 tipos de alimentos a lo largo de las cadenas de valor: a) frutas y vegetales frescos: jitomate, calabacita, papa, limón y manzana; b) granos: frijoles; c) carne, lácteos y huevo: carne de res, carne de pollo, cerdo, leche procesada y huevo; d) alimentos y bebidas procesados: tortilla de maíz, pan de caja, refrescos, jugo de naranja y cerveza. En 2014, este grupo de 16 productos representaba el 48.3% del gasto total de los hogares en alimentos. Según este estudio, el porcentaje acumulado del volumen de ventas correspondiente a los mayores productores con respecto al total fue muy alto en casi todas las cadenas.

En los casos de la manzana, el jitomate y la calabacita, los porcentajes del volumen total de ventas de los cinco, diez y cien productores más grandes fueron: 7.58%, 11.53% y 40.75% para la manzana; 12.71%, 20.02% y 55.53% para el jitomate; y 16.06%, 24.21% y 53.93% para la calabacita. Según este estudio, los veinte productores más grandes de cada cadena son responsables del 29.9% de las ventas de jitomate, 43.9% de las ventas de papa, 33.6% de las de calabacita y 17.4% de las de manzana. Si se consideran los cien productores más grandes de cada cadena, éstos controlan el 55.5% de las ventas de jitomate, 77.3% de papa, 53.9% de calabacita, 40.8% de manzana, 15.1% de naranja y 16.9% de cebada.

Con los productos ganaderos, la situación no es muy diferente: los diez productores más grandes controlan el 61.8% de las ventas de carne de cerdo, el 36.8% de las de aves y el 36.8% de las ventas de huevo. Los veinte productores más grandes controlan el 24.0% de las ventas de ganado, el 65.8% de los cerdos, el 51.1% de las aves y el 53.3% del huevo. Los cien productores más grandes controlan el 38.3% de las ventas de ganado, el 79% de los cerdos, el 82.4% de las aves, el 17.1% de la leche y el 90.4% del huevo. Finalmente, los 200 productores más grandes del país controlan el 45.0% de las ventas de ganado, el 85.1% de los cerdos, el 93.0% de las aves, el 21.5% de la leche y el 97.3% del huevo.

Aunque no proporciona estadísticas detalladas, el informe menciona altos grados de concentración, también, en el procesamiento y distribución de casi todos los alimentos. Es necesario romper la concentración de poder de mercado en México tanto a nivel de producción como a lo largo de la cadena de valor abordando las fallas institucionales, a través de la regulación y haciendo frente a algunas de las otras fallas de mercado asociadas que se analizan a continuación (acceso al crédito y a las tecnologías).

Acceso limitado al crédito

Si bien el poder excesivo de mercado que resulta en un alto grado de concentración de la producción puede verse en sí mismo como un fracaso institucional (del mercado), se debe en parte al acceso limitado y asimétrico al crédito para la producción y comercialización de alimentos. El problema del acceso al crédito para la producción, distribución y comercialización de alimentos se ilustra por el número de establecimientos que solicitaron crédito y no lo obtuvieron. Si bien la información sobre el acceso al crédito en México para los agentes a lo largo de la cadena de suministro de alimentos es limitada, Financiera Rural de México indicó en un documento distribuido internamente en 2012, que de las unidades de producción agrícola que solicitaron crédito, el 66.2% no lo obtuvo, principalmente por razones relacionadas con imperfecciones del mercado.

Algunos estudios internacionales indican que el acceso limitado al crédito en el sector agrícola limita sustancialmente la producción agrícola y la incorporación de tecnologías que modernizan la producción y la distribución de alimentos (Phimister, 1995; Blancard et al., 2006; Briggeman y Morehart, 2009). Es decir, para los países en desarrollo, la intervención del gobierno puede aportar mejoras a los productores. Considerando que el volumen de crédito agrícola en México ha aumentado sustancialmente desde 2010, precisamente debido a la mayor demanda de acceso al crédito por parte de los bancos, es interesante preguntarse si esta restricción crediticia provoca cambios significativos en el uso y la distribución de alimentos. Las mismas restricciones sobre el acceso al crédito se observan en toda la cadena alimentaria: los transportistas y los distribuidores minoristas de alimentos pueden no ser capaces de aprovechar los excedentes de producción debido a las limitaciones del acceso al crédito, especialmente a la luz de la informalidad en la que muchas de las actividades de la cadena alimentaria se llevan a cabo en México.

Acceso desigual a las tecnologías

Otro problema es la falta de acceso equitativo a las tecnologías en la producción de alimentos en México, lo que conduce a la producción de alimentos no estandarizados y que, por lo tanto, no son adecuados para la comercialización a través de los canales tradicionales. Si bien la producción agrícola moderna, con un uso intensivo de la tecnología, se ha convertido en la respuesta más eficiente y segura para garantizar a los consumidores el acceso a alimentos baratos y saludables, en México existe una gran heterogeneidad en la producción de alimentos. Miles de productores se encuentran fuera del mercado debido a la falta de estándares de calidad o adaptabilidad a los mercados externos o internos tradicionales y quizás la respuesta más apropiada sería el desarrollo de mercados alternativos.

El cambio tecnológico tiene un papel central en el desarrollo de la agricultura, que va mucho más allá del crecimiento de la productividad y la producción. La innovación redefine el espacio de producción en sí, ya sea insertando nuevas áreas o eliminando áreas tradicionales que pierden ventajas competitivas; modificando el tamaño de los sistemas productivos mediante cambios en variables como la escala de producción, el uso de la mano de obra y la complejidad del proceso de trabajo. Esto afecta la inserción en los mercados y la competitividad de grupos específicos de productores. Al mismo tiempo que la competencia promueve la difusión tecnológica que conduciría a una mayor homogeneización y estandarización intrasectorial de los productos, una de las consecuencias del uso o no uso de la tecnología es el aumento de la heterogeneidad entre los productores rurales que logran apropiarse de sus beneficios y aquellos que tienen dificultades y restricciones para acceder a ella.

El Marco del Censo Agrícola 2016 de México demuestra las heterogeneidades entre la producción agrícola de pequeño y gran tamaño. Son dos tipos de heterogeneidad. La heterogeneidad estructural, vinculada a las desigualdades estáticas, como la disponibilidad de agua para riego, la infraestructura para la venta de cultivos y el acceso a tecnologías en general. Y la heterogeneidad productiva, caracterizada por profundas diferencias en el desempeño económico de las unidades de producción agrícola, tales como el nivel de ingresos y producción. Los aspectos estructurales condicionan la heterogeneidad productiva, pero lo contrario no siempre sucede, ya que las disparidades productivas no representan necesariamente la heterogeneidad estructural. Los principales atributos de la heterogeneidad estructural del campo mexicano son evidentes en la concentración de la producción, en las imperfecciones del mercado, en el desarrollo agrario polarizado y en la asimetría en el acceso a la tecnología. La producción de alimentos ocurre bajo diferentes formas de organizaciones de producción, lo que refleja las diferentes formas de penetración del capital en el campo.

Fallas en la distribución de alimentos

En la distribución de alimentos hay una amplia gama de factores que están causando pérdidas de alimentos en México. Quizás dos de los más importantes son: a) la logística de distribución y b) la infraestructura para la distribución.

En el caso del sector alimentario, a medida que el país y su sistema de ciudades se desarrollaban, la infraestructura asociada con este proceso creció con menor rapidez. En los años sesenta y setenta se desarrolló una intrincada red de vendedores en México que compran alimentos en las zonas de producción y los transfieren a los grandes centros de suministro del país ubicados en las principales áreas metropolitanas. En particular, una gran parte de los alimentos producidos en México se trasladan a los Centros de Abasto de la Ciudad de México y luego se transportan nuevamente a las ciudades en donde se consumen esos alimentos, mismas que a menudo se encuentran adyacentes a las áreas productoras.

La dinámica de la población y el mercado indican que los grandes centros consumidores de alimentos están ubicados en ciudades medianas de todo el país. Los datos para el año 2015 indican que había 377 ciudades en México con 15,000 habitantes o más; pero, por otro lado, de acuerdo con la CONACCA (Confederación Nacional de Agrupaciones de Centros de Abasto) en México solo hay 91 centros de abasto y mercados mayoristas. Es decir, existe un claro déficit de centros de suministro de alimentos. Una alternativa a esta falla sería la creación de Centros de Recolección de Alimentos de menor dimensión que los grandes centros de abasto, que permitirían el inicio de una nueva logística en la distribución de alimentos en México, lo que obviamente contribuiría a la reducción de pérdidas. Además, sería necesario garantizar que los centros de abastecimiento actuales tengan una mejor infraestructura, y contar con una gama de acciones institucionales y sistemas de monitoreo que faciliten las donaciones y el acceso a alimentos en riesgo de ser desechados, a los Bancos de Alimentos del país.

Además, de las fallas de mercado, también incluyen otros factores que influyen en la generación del desperdicio de alimentos dentro de la cadena de suministro. A continuación, se presentan algunos de estos factores que influyen entre la post-cosecha y la distribución (mayorista y minorista).

Pérdidas en la post-cosecha

La manipulación, el almacenamiento, el procesamiento, el envasado, el transporte y la comercialización están asociados con las actividades de post-cosecha. A continuación se presentan algunas de las causas de pérdida en las actividades de post-cosecha (Joardder y Masud 2019a):

Daño mecánico

La pérdida de alimentos debido a daños mecánicos se debe a un mal manejo, un mecanizado y un embalaje incorrectos. Los daños mecánicos provocan magulladuras, pinchazos, cortes y oscurecimiento del color. El impacto, la compresión, la abrasión, el desgarro o los perforados inapropiados durante la manipulación, el mecanizado y el envasado provocan todos los daños mecánicos de los materiales alimentarios. En los países en desarrollo se observan más daños mecánicos en los alimentos, ya que la manipulación y el envasado de alimentos se realizan principalmente de forma manual en esos países.

Además, se observa pérdida de la porción comestible de alimento durante diferentes operaciones mecánicas. El dispositivo y la técnica inapropiados dan como resultado un desprendimiento excesivo de la porción comestible del alimento. Además de esto, la falta de conocimiento sobre el valor nutricional de las cáscaras de frutas y verduras y alguna porción de pescado y carne provoca el desperdicio de una porción nutricional de los alimentos por estas operaciones. Por ejemplo, estos daños se deben a los procesos que incluyen recortar, pelar y cortar. Para eliminar las partes no digeribles o no comestibles, se realizan estos procesos.

Hay varias frutas y verduras que tienen una mayor concentración de diferentes nutrientes en las porciones externas. Por lo tanto, pelar frutas y verduras como manzanas, melocotones, peras, patatas y zanahorias y descartar las hojas exteriores de verduras como repollo, espinaca y lechuga resulta en una mayor pérdida en términos de calidad de nutrientes.

Estos tipos de pérdidas son insignificantes en los países desarrollados debido a su mayor eficiencia de procesamiento de los alimentos. La pérdida es solo del 5% para frutas y verduras en los países desarrollados. Sin embargo, estas pérdidas son enormes en los países en desarrollo debido a los dispositivos y técnicas de corte ineficaces.

Almacenamiento

El almacenamiento es la habilidad de retener la superioridad de los materiales agrícolas o los materiales alimenticios frescos de origen vegetal y evitar que empeoren durante un período de tiempo particular, fuera de su vida útil habitual. En el caso de algunas frutas, verduras y cereales, se producen pérdidas sustanciales en esta operación.

Las pérdidas de almacenamiento se ven afectadas por factores bióticos que incluyen insectos, plagas y microorganismos y factores abióticos como la temperatura y la humedad. Como la mayoría de los mohos, el crecimiento es susceptible a temperaturas de 20 a 40 °C, donde el valor de la humedad relativa del sistema de almacenamiento prevalece en más del 70%. En países en desarrollo como India y Bangladesh, más de la mitad de los granos se almacenan en el sistema de almacenamiento tradicional a nivel de los hogares para semillas y autoconsumo. Estas estructuras de almacenamiento tradicionales se fabrican sin ningún diseño científico con los materiales disponibles localmente, incluidos el césped y la madera. En consecuencia, la vida útil en almacenamiento no se puede garantizar durante mucho tiempo, ya que las condiciones de almacenamiento son muy susceptibles al crecimiento de moho.

Procesamiento

Los alimentos se procesan para prolongar la vida útil y hacer consumibles algunos tipos de alimentos. En la etapa de procesamiento de productos agrícolas, las fallas técnicas y las ineficiencias del proceso provocan el desperdicio de productos alimenticios. Este tipo de pérdidas prevalecen principalmente en los países en desarrollo debido a la implementación inadecuada de tecnología en el sector de procesamiento de alimentos. Debido a la naturaleza diversa de los materiales alimenticios, los desechos se producen en la etapa de procesamiento de manera diferente.

La falta de instalaciones de procesamiento es la razón principal del desperdicio de alimentos en la etapa de procesamiento en los países en desarrollo. Una gran cantidad de alimentos de temporada se desperdician debido a la falta de instalaciones de procesamiento. Las industrias de procesamiento de alimentos en países de bajos ingresos ocupadas con recursos insuficientes para procesar alimentos frescos que provienen de la agricultura y los mares.

Embalaje

El empaque es esencial para casi todas las etapas de la cadena de suministro de alimentos. El empaque es indispensable para transportar, conservar, transportar y mantener frescos los productos perecederos de productos individuales o productos a granel.

Tanto los materiales rígidos como los flexibles se utilizan en el envasado de alimentos en los países en desarrollo. Los envases rígidos se realizan mediante el uso de botellas de plástico o vidrio, latas, cerámica, tambores y cajas de papel, mientras que en los envases flexibles se utilizan películas plásticas, papel de aluminio, papeles y ropa. El envasado inadecuado puede provocar una gran pérdida de materiales alimenticios.

Transporte y distribución

Después de la cosecha, se requiere que los productos se trasladen de un lugar a otro, como el campo a los lugares de procesamiento, el campo a las instalaciones de almacenamiento y el lugar de procesamiento al mercado. Las pérdidas de transporte son relativamente altas en los países en desarrollo debido a la infraestructura vial deficiente y los modos de transporte mantenidos de baja calidad. La mayoría de los productos básicos en las explotaciones agrícolas se transportan de forma tradicional, como carros de bueyes o carritos abiertos en los países en desarrollo. Incluso los productos se transportan en triciclos, bicicletas y pequeños vehículos de motor.

Además, en los países en desarrollo, las cosechas frágiles se reponen en el camión para acomodar un volumen adicional sin desembolsar una gran consideración a los daños mecánicos causados a las cosechas debido a los procesos de deterioro. Se proyecta que las pérdidas post-cosecha de frutas y hortalizas en los países en desarrollo oscilen entre el 35% y el 50% anual debido a la infraestructura, las carreteras y el sistema de transporte deficientes.

En el caso del transporte a larga distancia, los productos perecederos necesitan ambientes fríos. Es posible que el transporte de determinadas cosechas agrícolas a un mercado vecino en un camión pequeño no requiera una gestión superior, pero se necesita un control climático firme mediante refrigeración y ventilación adecuada mientras se transportan grandes cantidades a una gran distancia. En los últimos tiempos, el problema de refrigeración inconsistente es realmente menor en comparación con el pasado, pero en los países en desarrollo, el panorama aún no ha cambiado mucho, lo que ha tenido un impacto negativo en las pérdidas y el desperdicio de alimentos. Los vehículos de transporte inadecuados, las

carreteras en mal estado y la gestión logística ineficaz dificultan la conservación adecuada de los productos perecederos durante el transporte. Por ejemplo, menos del 4% del producto fresco total de la India se transporta por la cadena de frío en comparación con el 90% en el Reino Unido.

Pérdidas en el comercio mayorista y minorista

La calidad, la vida útil y la satisfacción del producto dependen en gran medida de las condiciones dentro del punto de venta, como la temperatura, la humedad relativa y la iluminación. La mayoría de los tipos de productos alimenticios, incluidas las frutas y verduras, se desperdician en la etapa de venta.

En los puntos de venta, los bultos de productos básicos expuestos de aspecto fresco se consideran un medio para aumentar el atractivo de los compradores, que luego tienen el lujo de seleccionar buscando entre el bulto. Para que el comprador pueda elegir, los productos como la fruta en varias etapas de maduración se agrupan a granel, lo que contribuye al desperdicio de alimentos al reducir la vida útil.

La demanda de un producto de excelente calidad afecta significativamente las pérdidas en la cadena de suministro. Las cadenas de suministro industrializadas modernas tienen muchos criterios establecidos y para que los productores sean competitivos deben cumplir con los requisitos especificados. Los compradores pagarán precios superiores por frutas y verduras de tamaño y color uniformes. En general, los artículos no deben estar deformados ni magullados y deben estar libres de imperfecciones, enfermedades y daños mecánicos. Para los exportadores, también se deben cumplir muchas regulaciones nacionales e internacionales que implican de la cuarentena para eliminar insectos y enfermedades. El producto almacenado durante un período de tiempo antes de la comercialización también debe cumplir con los criterios de madurez, firmeza y daño para garantizar su capacidad de almacenamiento. Estas especificaciones de calidad se han establecido principalmente para proteger a los miembros de las cadenas de suministro y garantizar que un producto vendible llegue al consumidor.

La percepción de la calidad por parte del consumidor es muy variable y cambia por muchas razones, por ejemplo, la época del año, el suministro del producto, el suministro de otros productos y el uso final. Si bien el productor determina la calidad inicial del producto, el minorista y el consumidor establecen en gran medida los parámetros dinámicos de los requisitos de precio y calidad. Para ayudar tanto al vendedor como al comprador, muchas agencias públicas y organizaciones de mercadeo han desarrollado estándares para los grados de la mayoría de los cultivos hortícolas. Los documentos comúnmente se denominan "estándares de calidad" e incluyen uno o más conjuntos de especificaciones y tolerancias. El cumplimiento de un conjunto específico de requisitos en el estándar de grado permite que el lote se venda como un envío etiquetado con el grado especificado. Cuando es necesario, un inspector externo evalúa las muestras de cada lote enviado por un vendedor antes de certificar que el lote cumple con el estándar de grado especificado. La aplicación de estándares de calidad en las cadenas de suministro es esencial para codificar los atributos de calidad de un producto que son aceptables; (a) para cumplir con algún requisito de la cadena de suministro, como el rendimiento del almacenamiento o transporte, o (b) que se consideren aceptables para el consumidor o comprador.

Un requisito demasiado estricto, como los puntos de vista estéticos, las preferencias del consumidor y las normas culturales, hace que se descarten enormes cantidades de alimentos. En los supermercados, los altos "estándares de calidad de apariencia" se consideran

un factor significativo para los productos alimenticios frescos. Los supermercados desechan determinados productos a la entrada de la explotación debido a los estrictos valores de calidad en cuanto a forma, tamaño, peso y apariencia de los cultivos. También debido a factores específicos previos a la cosecha, algunos productos se dejan sin cosechar cuando los estándares de calidad (forma, tamaño, peso del producto) no satisfacen la cierta demanda de los minoristas, provocan una gran pérdida de alimentos.

Efectos del desperdicio de alimentos

En un informe reciente, el panel discutió el impacto de la PDA en las dimensiones ambientales, sociales y económicas de la sostenibilidad y en la seguridad alimentaria y la nutrición. Los estudios que abordan los impactos ambientales generalmente se llevan a cabo utilizando metodologías de Evaluación del Ciclo de Vida, que generalmente dan cuenta de los impactos ambientales de las PDA en términos de emisiones de gases de efecto invernadero (también etiquetadas como la huella de carbono), consumo de agua y, a en menor medida, en términos de uso de la tierra, uso de productos químicos, uso de energía y pérdida de biodiversidad. Según estimaciones de la FAO, la PDA representa pérdidas económicas que pueden ser de aproximadamente 490 mil millones de dólares por año. También representan alrededor de una cuarta parte de todos los recursos de agua dulce utilizados por la agricultura y las tierras de cultivo equivalentes a un área del tamaño de China, que representa alrededor de 23 % de las tierras de cultivo mundiales. También son responsables de un estimado del 8% de las emisiones globales de gases de efecto invernadero y del consumo de alrededor del 23% del uso global de fertilizantes.

A pesar de esto, se podría concluir que las PDA afectan principalmente a la seguridad alimentaria y la nutrición. Esto se debe a la menor disponibilidad y accesibilidad de alimentos asociada a la disminución de ingresos que sufren los productores primarios, así como al aumento de precios que enfrentan los consumidores finales. A largo plazo, la seguridad alimentaria también está en riesgo debido a las prácticas actuales insostenibles con respecto al uso de la tierra, el agua, la energía y los fertilizantes, que son recursos cruciales para garantizar una demanda de alimentos en constante aumento. Además, los desequilibrios entre producción y demanda también provocan el desperdicio de alimentos. La naturaleza variable de la producción de alimentos está ligada al rendimiento de los cultivos, que se ve afectado por factores difíciles de controlar, como el clima, las plagas y los incendios. Esto hace necesaria la introducción de medidas para estabilizar el sistema alimentario. No solo la cantidad, sino también la calidad de los alimentos es afectada negativamente por las pérdidas de nutrientes que se producen en todo el FSC. 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(Esparza et al. 2020).

En el caso de los países en desarrollo, el problema del almacenamiento es la principal barrera para una gestión eficiente de la cadena de suministro de alimentos. Las investigaciones han demostrado que las tecnologías de secado mejoradas y eficaces reducen los problemas de almacenamiento. Por lo tanto, se recomienda introducir el secado como estrategia para ayudar a mitigar la PDA en los países en desarrollo. Las tecnologías de secado mejoradas tienen el potencial de iniciar una mejora revolucionaria en las etapas de manipulación, almacenamiento y procesamiento posteriores a la cosecha de la cadena alimentaria.

El secado como técnicas de preservación de alimentos

La conservación adecuada de los alimentos es una estrategia para superar el problema del desperdicio de alimentos y de la inseguridad alimentaria. Existe una amplia gama de técnicas de conservación de alimentos que prevalecen en todo el mundo en la actualidad. Las técnicas individuales dan importancia a uno o más factores clave del desperdicio de alimentos, incluida la proliferación microbiana, la reacción enzimática, la reacción química y el daño físico. En consecuencia, las condiciones de proceso requeridas varían significativamente a través de las técnicas de conservación. Se realizan varios tipos de técnicas de conservación sobre la base de algunos fenómenos físicos comunes que incluyen la transferencia de calor, la eliminación de la humedad y la prevención de reacciones enzimáticas y químicas.

Desde los inicios de la historia, los seres humanos sintieron la necesidad de almacenar y conservar los alimentos. La mente inquisitiva del ser humano ha innovado y descubierto diferentes sistemas de conservación de alimentos a lo largo de la historia. La mayoría de las técnicas de conservación practicadas por los primeros humanos se basaron en experiencias diarias. La utilización de energía natural, incluida la solar, la biomasa y los fenómenos naturales como el enfriamiento por evaporación, las reacciones espontáneas como la fermentación son algunas de las características comunes de estas técnicas de conservación de alimentos. Muchas técnicas tradicionales de conservación de alimentos en los países en desarrollo todavía siguen este enfoque de manera extensiva. Sin embargo, prevalece una amplia variación en cada técnica de conservación en diferentes regiones del mundo.

Una de las técnicas ancestrales de conservación de alimentos es el secado. Esta técnica sigue siendo una de las más dominantes, que se practica en todo el mundo. El agua es esencial para el crecimiento de microorganismos en los alimentos. La mayoría de las materias primas alimenticias tienen un alto contenido de agua y las hacen susceptibles al crecimiento de microorganismos. El secado es básicamente un proceso de eliminación de agua. Durante el proceso de secado tiene lugar una transferencia simultánea de calor y masa. Además de la prevención de microorganismos, el secado ofrece una facilidad de manipulación, envasado, envío y consumo.

El secado puede tratarse como uno de los sistemas de conservación natural, ya que para alcanzar el equilibrio de concentración másica, la atmósfera elimina el exceso de agua de los alimentos con mayor contenido de humedad. Por lo tanto, el secado puede ocurrir hasta cierto punto en caso de mantener los alimentos incluso en espacios abiertos.

Hay muchos tipos de procesos de secado disponibles que se clasifican básicamente en función de la estrategia de suministro de calor. Los métodos de secado más utilizados en los países en desarrollo son el secado al sol, el secado al sol, el secado con aire caliente y el secado por aspersión. La Figura 3 representa los diferentes tipos de sistemas de secado que se utilizan habitualmente.

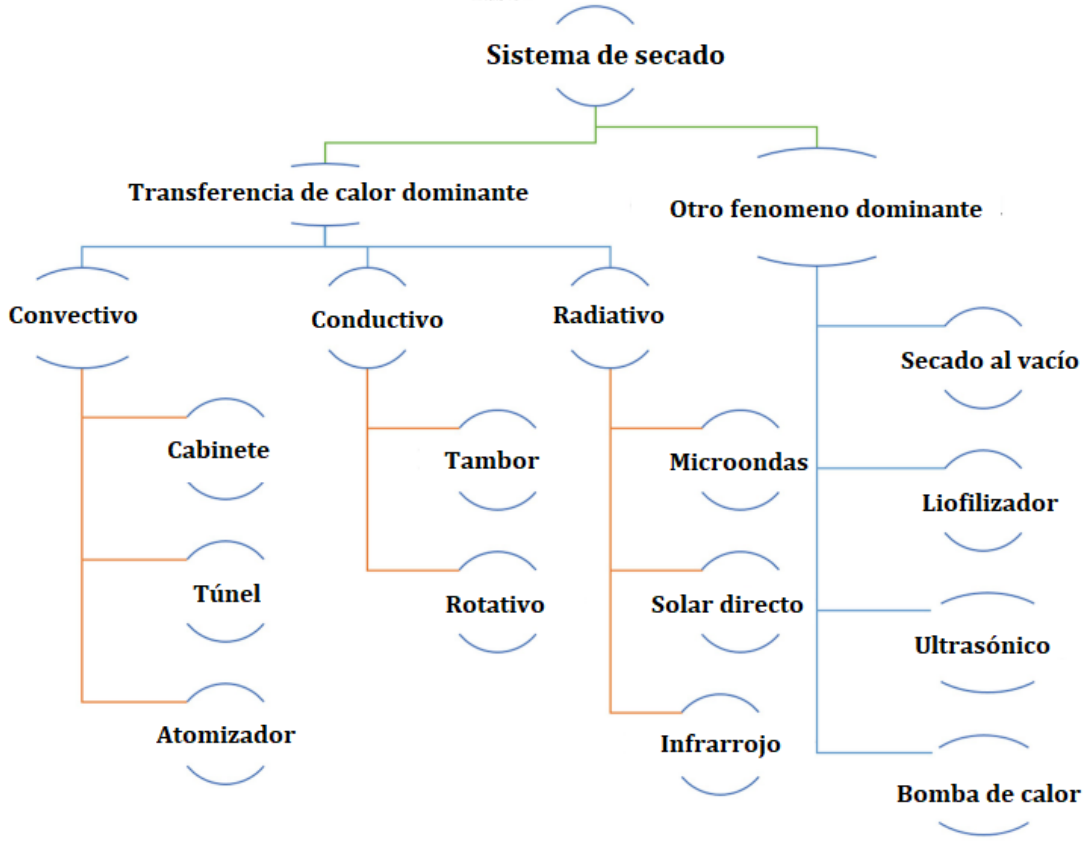

Figura 3 Clasificación de sistemas de secado según el fenómeno físico dominante. Adaptado de (Joardder y Masud 2019b).

Los secadores industriales a menudo se describen y diferencian en función de sus características de manipulación de materiales y, por lo tanto, es apropiado un breve resumen de los términos clave de manipulación de materiales. Los secadores se clasifican en lotes, continuos o semicontinuos según las características de manipulación de materiales de la siguiente manera (Kamfa et al. 2020). En todos los casos, el material húmedo ingresa al secador como alimento húmedo y sale como producto seco. En un secador por lotes, un lote discreto de alimento húmedo ingresa al secador y se calienta y seca a través de un proceso transitorio. Durante este proceso de secado por lotes, no entra alimento húmedo ni producto seco sale de la secadora. Al final del proceso de secado, se retira el lote resultante de producto seco. En un secador continuo, el alimento húmedo ingresa continuamente al secador, el material húmedo se mueve continuamente a través del secador, el producto seco sale continuamente del secador y el proceso de secado evoluciona a medida que la sustancia húmeda se mueve a través del secador. Los secadores continuos a menudo se modelan como sistemas de flujo constante de estado estacionario. En un secador semicontinuo, el secador se divide en varias zonas secuenciales correspondientes a diferentes etapas de secado. Cada zona seca un lote discreto de material húmedo a través de un proceso transitorio como un secador por lotes, pero la evolución del proceso de secado al mover material húmedo de una zona a otra imita un secador continuo. Para promover un secado uniforme, el material húmedo se puede mezclar, por ejemplo, mediante agitación o volteo en un cilindro giratorio. El raspado se utiliza para eliminar el material húmedo y el producto seco de la base y puede ser necesario para una mezcla eficaz.

Existen muchos métodos de secado convencional de alimentos, como la convección forzada de aire caliente (HA), la deshidratación osmótica, el secado al vacío, secado solar y liofilización. 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). La liofilización (FD) se considera generalmente como el mejor método para la producción de frutos secos de alta calidad, pero con un costo muy elevado (Aydin y Gocmen 2015). Mientras, el secado solar (SD) ha ganado interés principalmente debido a las ventajas relacionadas con la sostenibilidad (Menon, Stojceska, y Tassou 2020), (Hasan Masud et al. 2020b). En los estudios más recientes, ha habido avances significativos en el uso de técnicas novedosas de secado (microondas, radiofrecuencia, radiación infrarroja, ultrasonido, etc), que proporcionan una cinética de secado más rápida, una mejor eficiencia térmica y mejorarán la calidad de los productos secos (Onwude, Hashim, y Chen 2016), (Zhang et al. 2017), (Li et al. 2019).

La selección de técnicas de secado adecuadas para una aplicación específica es una tarea desafiante que requiere una atención cuidadosa. En función de sus características específicas, un secador puede ser adecuado o inadecuado para una operación en particular. Algunas técnicas de secado son costosas de operar (por ejemplo, liofilizadores) mientras que otras son fundamentalmente más eficientes (por ejemplo, secadores radiativos). Como tal, es fundamental conocer las ventajas y desventajas de los secadores disponibles antes de elegir uno en particular.

Secadores para aplicaciones comerciales más comunes

Una gran cantidad de diseños de secadores informados en la literatura se deben a las diferencias en los atributos físicos del producto, modos de entrada de calor, temperaturas y presiones de funcionamiento, especificaciones de calidad del producto seco, etc. La mayoría de los secadores utilizados en la industria alimentaria son de tipo convectivo, es decir, se utiliza aire caliente tanto para suministrar calor para la evaporación del agua como para eliminar la humedad evaporada del producto. Este es, con mucho, el método de secado más común utilizado a escala industrial porque es simple y fácil de operar, además de costos de capital relativamente bajos (por el momento), aunque es deficiente en eficiencia energética. A continuación se describen las técnicas comúnmente utilizadas en la industria alimentaria (Sabarez 2016):

Deshidratación del túnel

La deshidratación en túnel es el método más utilizado en la deshidratación industrial de frutas y verduras. Este método de secado se ha utilizado comercialmente para secar frutas (principalmente ciruelas pasas, uvas y tomates). El deshidratador de túnel consiste básicamente en un túnel (a modo de cámara de secado) que contiene bandejas de producto que se colocan en carros móviles (también denominados camiones) que se mueven a lo largo del túnel, un ventilador para hacer circular el aire caliente y una unidad de calentamiento para precalentar el aire antes de que se sople a través del producto alimenticio y luego se ventile hacia la descarga de aire húmedo, ver Figura 4. El aire circulado se calienta directamente, generalmente mediante un quemador de gas, y el aire calentado es forzado al interior del túnel mediante un ventilador. En el secado de túnel, las materias primas se cargan en carros de bandejas y estos carros se introducen en el túnel de secado en un extremo a intervalos regulares de forma continua y el producto seco se descarga en el otro extremo del túnel.

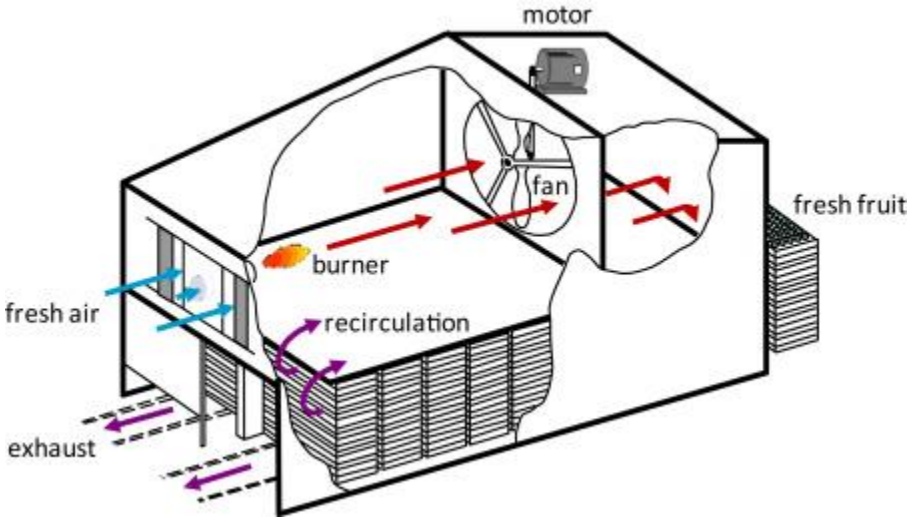

Figura 4 Diagrama esquemático de un deshidratador de túnel.

Los deshidratadores de túnel funcionan en varias configuraciones, como contraflujo, flujo paralelo y flujo mixto. Las condiciones de secado en estas diversas disposiciones de túneles son diferentes. En una configuración de contraflujo, el aire de secado se introduce en un extremo del túnel mientras que los carros de alimentos entran por el otro extremo, y cada uno se mueve en direcciones opuestas. Esta configuración se caracteriza por tener las condiciones más propicias para un calentamiento intenso al final del ciclo cuando los productos están casi secos y un calentamiento suave o suave en las primeras etapas. El funcionamiento del túnel de flujo paralelo es opuesto al de contraflujo. Los carros de materiales alimenticios y aire de secado ingresan por el mismo extremo del túnel y avanzan por el túnel en la misma dirección. Esta configuración se caracteriza por un calentamiento intenso en las primeras etapas donde el material a secar todavía está muy húmedo, seguido de un secado lento a medida que el producto se acerca al extremo más frío. En la configuración de flujo mixto, el aire se mueve en la misma dirección que el producto en algunas ubicaciones de la secadora y luego se mueve en la dirección opuesta con el producto en otras ubicaciones. Esta configuración es básicamente una combinación de configuraciones de flujo paralelo y contraflujo. La selección de la configuración del túnel depende de la sensibilidad del producto a altas temperaturas con diferentes contenidos de humedad.

Secado de cinta transportadora

Los deshidratadores de transportador (o cinta) se utilizan a menudo para grandes aplicaciones de secado industrial. Este tipo de deshidratador se opera de forma continua y se puede utilizar para secar muchos tipos de productos alimenticios, incluidos trozos de frutas y verduras. Consiste en una unidad de calentamiento, un ventilador para ventilación de aire, una cámara de secado y una cinta transportadora, ver Figura 5.

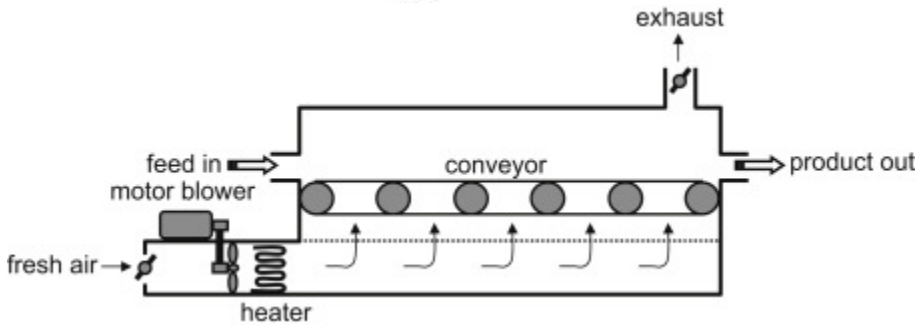

Figura 5 Diagrama esquemático de un secador de cinta transportadora única.

El producto se coloca en un transportador y se mueve continuamente a través de la cámara de secado a la velocidad del transportador desde la entrada de alimentación hasta la salida del producto del secador. El tiempo de secado deseado se logra regulando la velocidad del transportador. Si se requiere un tiempo de secado más prolongado, se utiliza un deshidratador transportador de múltiples etapas, que consiste en una serie de transportadores apilados horizontal o verticalmente (uno encima del otro). La disposición vertical permite que la longitud de la secadora sea algo más corta, pero aumenta la altura de la secadora a medida que se agregan cintas transportadoras adicionales. En la deshidratación del transportador de varias etapas (vertical), el producto se mueve hacia adelante y hacia atrás dentro del deshidratador. El movimiento del aire de secado en un deshidratador transportador también puede ser en una configuración de flujo paralelo, contracorriente o mixto. El deshidratador puede constar de varias secciones en serie para cada etapa, en las que la temperatura, la velocidad y dirección del aire y la velocidad del transportador pueden controlarse para cada sección para maximizar la velocidad de secado y optimizar la eficiencia energética. Los deshidratadores transportadores generalmente brindan un mayor rendimiento y una calidad de producto más consistente, pero requieren una mayor inversión en comparación con los deshidratadores de túnel.

Deshidratación con bomba de calor

El deshidratador con bomba de calor fue desarrollado para mejorar la eficiencia energética del proceso de secado recuperando el calor latente. El sistema de secado generalmente consta de evaporador, condensador, compresor, ventilador y una cámara de secado con bandejas o carros de bandejas, ver Figura 6.

En este sistema de secado, el agua se elimina del producto sin ventilación exterior, porque el sistema está totalmente cerrado con aire recirculado completamente. El aire caliente seco se extrae del condensador y se sopla a través de la cámara de secado que contiene el material húmedo. El aire caliente y húmedo que sale de la cámara de secado se mueve hacia el evaporador para enfriarse por debajo de la temperatura del punto de rocío, lo que causa condensación, eliminando así el agua en el aire. El aire seco frío del evaporador se bombea de regreso al condensador para aumentar a la temperatura deseada. Luego, el aire calentado se devuelve a la cámara de secado, que completa el ciclo. La ventaja clave del sistema es que se puede lograr un tiempo de secado más corto a una temperatura más baja en comparación con el secado con aire caliente convencional debido a la humedad relativa comparativamente más baja.

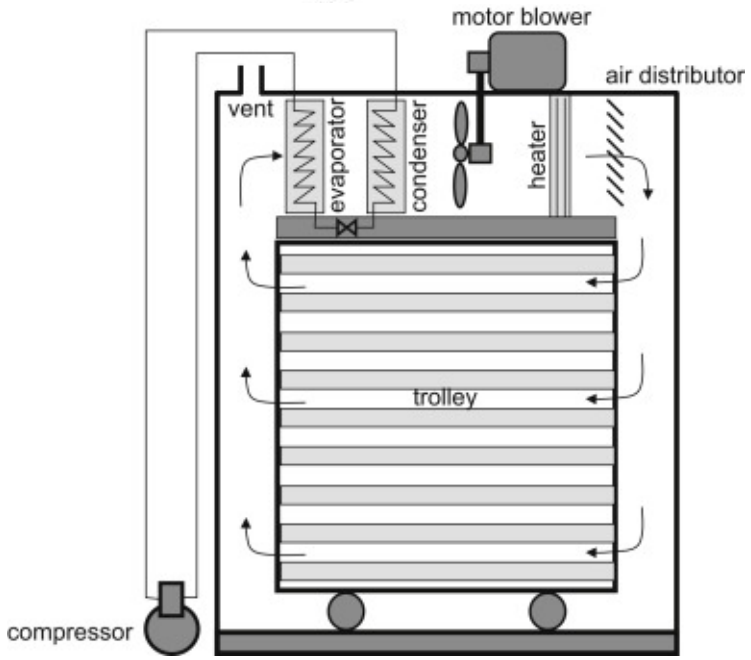

Figura 6 Diagrama esquemático de un deshidratador con bomba de calor.

Secado de tambor

El secado en tambor es un método particularmente eficaz para secar lechada, puré o material líquido. El uso de secadores de tambor es una práctica industrial común en la industria alimentaria para secar una variedad de productos, incluidos productos lácteos, alimentos para bebés, cereales para el desayuno, pulpa de frutas y verduras, puré de papas, almidón cocido, levadura gastada, etc. Los secadores de tambor generalmente se clasifican en un diseño de tambor simple, doble o doble, ver Figura 7.

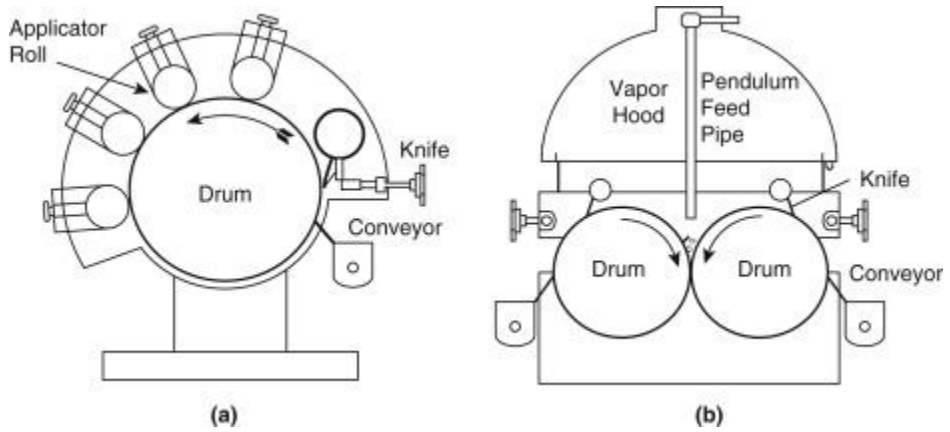

Figura 7 Diseño de secadores de tambor; (a) simple (b) doble.

Básicamente, un secador de tambor consta de uno (para diseño de tambor simple) o dos (para diseño de tambor doble o doble) cilindros huecos montados horizontalmente hechos de hierro fundido de alta calidad o acero inoxidable, un marco de soporte, un producto sistema de alimentación, raspador y auxiliares. Para una operación de secado de un solo tambor, el tambor

pasa a través de un depósito que contiene el material líquido a secar. A medida que el tambor gira, el material líquido forma una película delgada que recubre la superficie del tambor y el secado tiene lugar debido a la transferencia de calor desde el interior principalmente por conducción. La evaporación de la humedad tiene lugar a través de la capa de producto hacia la atmósfera circundante. El producto seco de salida luego se raspa del tambor en algún punto durante la revolución del tambor (aproximadamente ¾ de la revolución desde el punto de alimentación) y se recoge en un contenedor o transportador para su procesamiento posterior. En un diseño de tambor doble, el material líquido se introduce en el espacio entre dos tambores, girando en direcciones opuestas. El espacio entre los dos tambores controla el grosor (0,5-2 mm) de la capa de alimentación aplicada a las superficies del tambor. El secado tiene lugar en ambos tambores ya que el depósito formado entre los tambores permite que una película delgada del material cubra la superficie de ambos tambores. El producto seco se vuelve a raspar en el punto apropiado y se recoge para su posterior procesamiento. En una secadora de tambor doble, los tambores giran en dirección opuesta y el alimentador de cada tambor aplica el alimento. Este tipo de secador de tambor se utiliza para materiales con sólidos que son polvorientos cuando están secos.

El proceso de secado en un secador de tambor puede tener lugar con bastante rapidez, ya que tanto la transferencia de calor a través del tambor metálico como la transferencia de masa de agua fuera de la película delgada suelen ser bastante buenas. El tiempo de residencia del material en el tambor oscila normalmente entre 15 y 60 s, regulado por la velocidad de revolución del tambor. Las propiedades del material que afectan la adherencia del tambor incluyen viscosidad, tensión superficial y poder humectante. También se debe enfatizar que se debe tener cuidado con los materiales sensibles al calor, ya que los productos secos generalmente están expuestos a altas temperaturas (por encima de 100 °C). Para materiales sensibles al daño por calor, alternativamente se puede usar un secador de tambor al vacío para reducir la temperatura de secado. Este sistema es similar a los otros secadores de tambor, excepto que los tambores están encerrados en una cámara de vacío. Sin embargo, el equipo y el funcionamiento de los secadores de tambor al vacío son relativamente caros, lo que limita esta técnica a productos de alto valor.

Secado por aspersión

El secado por pulverización es un método en el que un material líquido/en suspensión se pulveriza en gotitas finamente atomizadas en un medio convectivo caliente, convirtiendo las gotitas en partículas sólidas finas. El proceso ha encontrado muchas aplicaciones en el procesamiento de alimentos, particularmente en la producción de alimentos instantáneos en polvo. Este método se utiliza comúnmente para obtener polvos a partir de leche, suero, levadura y otros productos de alto valor por su buena calidad final. En este método de secado, se rocía una solución de lodos de materiales solubles o suspendidos en una cámara de secado usando un atomizador (p. ej., una boquilla), y el gas caliente fluye en paralelo o en contracorriente con las gotas de líquido dispersas, eliminando la humedad de las partículas, ver Figura 8.

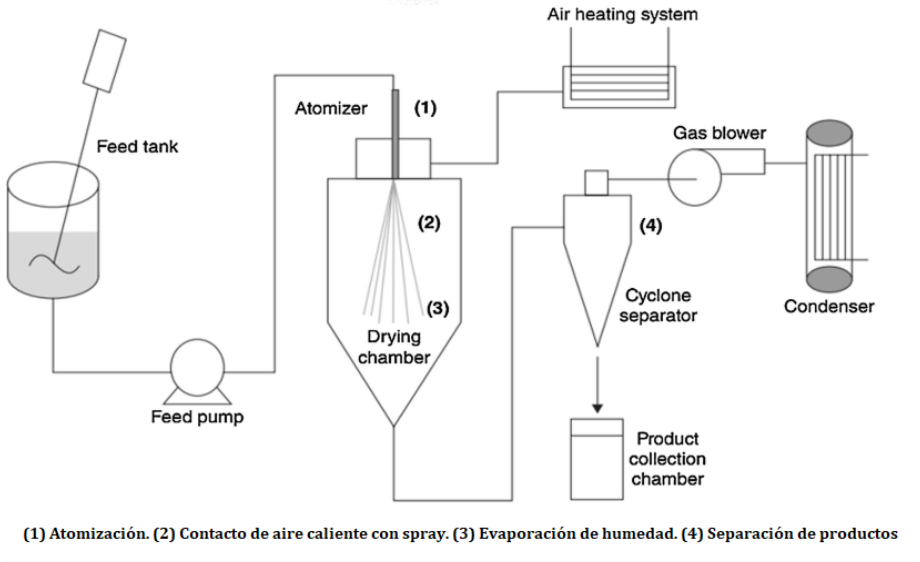

Figura 8 Diagrama esquemático del proceso de secado por aspersión

Las partículas de polvo seco se recogen en el recipiente de recogida. Si bien este método tiene varias ventajas, que incluyen un secado rápido, un gran rendimiento y una operación continua, el secado por aspersión es una técnica muy costosa de usar para productos de bajo valor, principalmente debido a su baja eficiencia energética. Además, debido a las temperaturas relativamente altas involucradas en los procesos de secado por aspersión, esta técnica de secado puede causar pérdidas de ciertos atributos sensoriales y de calidad, especialmente vitamina C, β-caroteno, sabores y aroma. Además, el oxígeno presente en los grandes volúmenes de aire mezclados con las gotas de alimentos durante el secado por pulverización puede tener un impacto negativo sobre los nutrientes oxidables y sensibles al calor.

Secar en frío

Otras técnicas de secado evolucionaron debido a la necesidad de producir productos secos de alta calidad que sean muy sensibles al calor. Dichos sistemas de secado incluyen, por ejemplo, la utilización de temperaturas por debajo del punto de congelación y en condiciones de presión de vacío (por ejemplo, liofilización). La liofilización es un proceso de secado en el que la comida se congela primero y luego se seca por sublimación directa (es decir, cambios de fase de sólido a vapor) del hielo a presión reducida). El producto se calienta por conducción (si el contacto con el estante calentado es apropiado) y también por radiación de los estantes superiores y alrededores. No se produce mucha convección al vacío.

La liofilización se considera generalmente como el mejor método para la producción de productos secos de alta calidad. Esto se debe a que la mayoría de las reacciones de deterioro se ralentizan o prácticamente se detienen (es decir, minimización de las pérdidas de sabor y aroma, maximización de la retención de nutrientes, estructura porosa) debido a la ausencia de agua líquida, la ausencia de oxígeno al vacío y el uso de bajas temperaturas. Sin embargo, las desventajas incluyen altos costos de producción, altos consumos de energía y bajos rendimientos. El costo del procesamiento al vacío a baja temperatura es muchas veces mayor que el de otros secadores de convección., lo que lo hace menos atractivo para la mayoría de los productos y restringe su uso a productos de alto valor (es decir, café, microorganismos, aroma encapsulado, etc.).

Incorporación de Energías Renovables

El acceso suficiente a la energía es el principal desafío para resolver los problemas relacionados con la conservación de alimentos en los países en desarrollo. La mayoría de las técnicas de conservación como el secado, ahumado y pasteurización utilizan energía térmica, mientras que la refrigeración y la congelación utiliza energía eléctrica (Mattsson y Sonesson 2003).

En diversos sectores industriales existen numerosos procesos que requieren energía térmica a temperaturas por debajo de los 250 °C, en la mayoría de los casos esta energía es suministrada por fuentes convencionales, cuando bien puede ser suministrada con la implementación de sistemas fototérmicos. En la Figura 9 se muestran los diversos procesos en diferentes industrias en las que se puede utilizar la energía solar térmica para satisfacer la demanda requerida (L. Kumar, Hasanuzzaman, y Rahim 2019).

Figura 9 Varios procesos industriales

Los sectores industriales identificados como potenciales para el uso de energía termosolar son: procesamiento de alimentos (incluyendo vino y bebidas), pulpa y papel, procesamiento de textiles, equipo de transporte, procesamiento de carne, tratamiento de plásticos, procesos farmacéuticos y químicos, etc (A. K. Sharma et al. 2017). La industria alimentaria se identifica como el sector industrial dominante hoy en día para los sistemas de calentamiento solar. Los procesos comunes en la industria alimentaria son el calentamiento de agua, la pasteurización, la limpieza, el precalentamiento, el secado y la cocción. Los colectores solares de placa plana y los concentradores de canal parabólico son las tecnologías termosolares más usada en este sector (Farjana et al. 2018).

En la industria alimentaria, que representa aproximadamente el 30% del consumo de energía del mundo (FAO 2011a), 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)). Varios estudios informaron que el consumo de energía nacional para las operaciones de secado industrial oscila entre el 10% y el 15% en EE. UU., Canadá, Francia y el Reino Unido y entre el 20% y el 25% en Dinamarca y Alemania (Mujumdar 2015). El secado a escala comercial requiere una enorme cantidad de energía para calentar el aire cuando se secan varios productos alimenticios y existe la oportunidad de utilizar la energía solar en el proceso de secado (Hollick 1999).

Los sistemas de conservación de alimentos, como el secado, dependen principalmente de fuentes de energía no renovables, lo cual es un gran inconveniente para países en desarrollo y menos desarrolladas con una grave crisis de energía. Por lo tanto, la aplicación de energía solar, geotérmica y eólica combinada puede resolver de manera sostenible el problema relacionado con la energía en los sectores de conservación de alimentos en los países en desarrollo. Además de explorar los recursos energéticos renovables, es necesario introducir sistemas de almacenamiento de energía (A. B. Lingayat et al. 2020; Srinivasan, Rabha, y Muthukumar 2021). 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 (Girotto, Alibardi, y Cossu 2015; Dahiya et al. 2018; Esparza et al. 2020).

En muchos países del mundo, el uso de sistemas térmicos solares para el secado de alimentos ha demostrado ser práctico, económico y el enfoque responsable ambientalmente (A. Sharma, Chen, y Vu Lan 2009). En particular, el secado solar se ha usado en el sector agrícola para conservar granos, frutas y verduras (Lamidi et al. 2019). El secado solar se puede utilizar para todo el proceso de secado o para complementar sistemas de secado convencional, reduciendo así la cantidad total de energía proveniente de combustibles convencionales requerida (VijayaVenkataRaman, Iniyan, y Goic 2012) (Ortiz-Rodríguez et al. 2020). Por lo tanto, los secadores solares ayudan mitigan el consumo de fuentes convencionales de energía, como los combustibles fósiles, lo que permite reducir las emisiones de CO_2 (Karale 2013)(Phadke, Walke, y Kriplani 2015). Además, el secado es un método ancestral para preservar y prologar la vida útil de los alimentos y los cultivos agrícolas. Por lo tanto, el secado de alimentos con sistemas termosolares no sólo ayuda a resolver los problemas de abasto de energía sustentable y el deterioro del medio ambiente. Sino también, puede ayudar abatir el problema mundial del desperdicio de alimentos. En países en desarrollo las pérdidas de alimentos son del 10 al 40%, debido a varias razones como la falta de tecnología adecuada, el cultivo y la fertilización inadecuados, la falta de canales de comercialización, pérdidas de cosecha, a las malas técnicas de procesamiento y la escasez en las instalaciones de almacenamiento (Esper y Mühlbauer 1998)(El-Sebaii y Shalaby 2012)(M. Kumar y Khatak 2016).

En este contexto, el uso de sistemas de energía solar para mitigar las pérdidas post-cosecha y generar valor agregado en los productos agropecuarios, resulta una solución integral para abatir simultáneamente problemas como la inseguridad alimentaria, el abasto de energía sustentable y el cambio climático. En especial el uso energía solar para la deshidratación de productos perecederos del sector agropecuario.

Sistemas de secado solar

Udomkun y colaboradores realizan una revisión de la implementación de SSS con un enfoque de innovación y concluyen la tecnología de secado solar presenta un gran potencial para reducir las pérdidas poscosecha en países de ingresos bajos y medianos. Sin embargo, para ampliar su implementación se requiere que los gobiernos apoyen a 1) fomentar el uso de SSS tanto a escala individual como industrial, 2) educar a los usuarios sobre el secado solar de cada cultivo, 3) mejorar el sistema financiero para el sector agrícola y 4) crear cooperativas a niveles multilaterales, como agricultores, organismos gubernamentales, organizaciones privadas y ONG (Udomkun et al. 2020).

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). La mayoría de los numerosos diseños de secadores solares, que están disponibles, son secadores simples desarrollados para uso familiar o para producción a pequeña escala (Belessiotis y Delyannis 2011) (Lamidi et al. 2019) (A. B. Lingayat et al. 2020).

Se reconoce que las tecnologías de secado se han investigado ampliamente. 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 alta capacidad (Ortiz-Rodríguez et al. 2020). Aunque los sistemas de secado solar son sostenibles, su implementación para aplicaciones de nivel comercial es laboriosa, por lo tanto, aun se requiere investigación en este sentido (Mohana et al. 2020).

En este contexto, la presente revisión se centra en las tecnologías de secado impulsadas por energía solar térmica para aplicaciones agroindustrial. Se presenta una clasificación general de los sistemas de secado haciendo énfasis en las tecnologías termosolares apropiadas para su integración en el secado a escala comercial, subrayando los desafíos.

Clasificación de las tecnologías de secado solar

Los sistemas de secado suelen clasificarse como sistemas operados a baja o alta temperatura (Ekechukwu y Norton 1999). Sin embargo, los secadores se clasifican más comúnmente de acuerdo a sus fuentes de energía: secadores convencionales (combustibles fósiles), secadores de energía solar y secadores solares híbridos. En estos últimos la energía solar se combina con otras fuentes de energía, como el combustible fósil, el combustible sólido de biomasa, la energía eléctrica (Pirasteh et al. 2014). Los sistemas de secado solar (SSS) se clasifican, en términos generales, en dos grandes grupos: sistemas activos (convección forzada) y sistemas pasivos (convección natural) (Ekechukwu y Norton 1999). Se pueden identificar tres subclases distintas de los sistemas de secado solar: secadores solares de tipo distribuido, integral y mixto (Ekechukwu y Norton 1999), (M. Kumar y Khatak 2016). 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 todo el sistema, por lo que no es necesario un conducto especial para canalizar el aire de secado a una cámara de secado separada. El modo mixto combina algunas características de los tipos distribuidos e integral. En la Figura 10 se esquematiza la clasificación de secadores solares.

Los sistemas de secado suelen clasificarse como sistemas operados a baja o alta temperatura (Ekechukwu y Norton 1999). Sin embargo, los secadores se clasifican más comúnmente de acuerdo a sus fuentes de energía: secadores convencionales (combustibles fósiles) y secadores de energía solar. Un inconveniente de los secadores de energía solar es su dependencia de la

intensidad de la radiación solar que no siempre está disponible y es intermitente. Para abordar esta desventaja se pueden usar secadores solares híbridos, en los que la energía solar se combina con otras fuentes de energía, como el combustible fósil , el combustible sólido de biomasa, la energía eléctrica (Pirasteh et al. 2014). Los sistemas de secado solar (SSS) se clasifican, en términos generales, en dos grandes grupos: sistemas activos (convección forzada) y sistemas pasivos (convección natural) (Ekechukwu y Norton 1999). Se pueden identificar tres subclases distintas de los sistemas de secado solar activo o pasivo (que varían principalmente en la disposición de diseño de los componentes del sistema y el modo de aprovechamiento del calor solar): secadores solares de tipo distribuido, integral y mixto (Ekechukwu y Norton 1999), (A. Fudholi et al. 2010), (Prakash y Kumar 2013), (M. Kumar y Khatak 2016). 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 todo el sistema, por lo que no es necesario un conducto especial para canalizar el aire de secado a una cámara de secado separada. El modo mixto combina algunas características de los tipos distribuidos e integral. En la Figura 10 se esquematiza la clasificación de secadores solares.

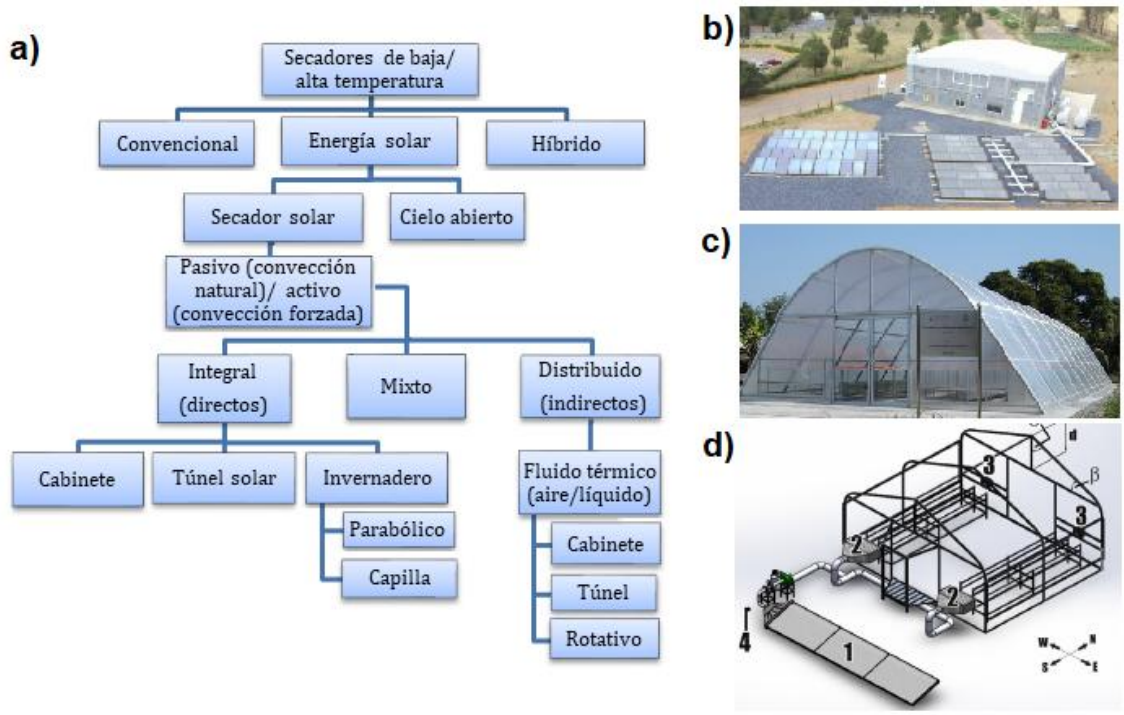

Figura 10 a) Clasificación de los secadores solares. Sistemas de secado solar: b) distribuido con calentamiento directo e indirecto de aire (García-Valladares et al. 2020), c) integral tipo invernadero (Serm Janjai 2012) y d) mixto (Román-Roldán et al. 2019).

Secadores solares distribuidos

En los secadores solares distribuidos (SSD), la radiación solar incide sobre un captador solar y calienta un fluido de trabajo que pasa en su interior. Normalmente, los fluidos de trabajo usados en las aplicaciones de secado son el aire y el agua. Los SSD que utilizan aire, se denominan sistemas de secado solar de calentamiento directo de aire (SSD-CD). Mientras, los que utilizan

un fluido líquido se denominan sistemas de secado solar de calentamiento indirecto de aire (SSD-CI) (Ortiz-Rodríguez et al. 2020). En los SSD-CD, el calentador solar de aire (SAH, por sus siglas en inglés Solar Air Heater) es el componente más importante (El-Sebaii y Shalaby 2012)(M. Kumar y Khatak 2016). Es un dispositivo en el cual la energía del sol es capturada por la superficie absorbente y la energía térmica es extraída por el aire que fluye en él (Tiwari 2013). En los SSD-CD de gran capacidad el aire ingresa a los SAH mediante convección forzada de un ventilador y pasa a través de ellos aumentando su temperatura. Posteriormente, un sistema de ductos recoge el caudal de aire del campo de SAH y lo direcciona hacia la cámara de secado. Mientras, en los SSD-CI se utilizan normalmente calentadores solares de agua (SWH, por sus siglas en inglés Solar Water Heater). En estos sistemas de secado se requiere un intercambiador de calor agua-aire, con la finalidad de calentar indirectamente el aire necesario para el secado, en algunos casos, también de tanques de almacenamiento de calor sensible (Ortiz-Rodríguez et al. 2020). Tanto en los SSD con calentamiento directo e indirecto, el aire caliente fluye a través de la cámara de secado en contacto con la superficie del producto húmedo y elimina la humedad.

Los secadores de convección forzada de modo distribuido han sido reportados superiores en velocidad de secado y calidad de secado (El-Sebaii y Shalaby 2012)(M. Kumar y Khatak 2016); además son los más adecuados para secar grandes cantidades (Belessiotis y Delyannis 2011). La técnica de secado solar distribuido tiene casi solo ventajas: los tiempos de secado son bajos, mayor control en la humedad final del producto, no hay pérdidas por las inclemencias del tiempo, una capacidad de carga compacta y mayor productividad (kg/h). Su única 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 control y medición, y personal calificado para operar el proceso de secado (Belessiotis y Delyannis 2011), (Patil y Gawande 2016) Las cámaras de secado para los SSD básicamente puede ser de tipo gabinete, túnel y rotativo. Para el secado de alimentos normalmente los tipos rotativos se operan continuamente, el tipo túnel de forma semicontinua, mientras en el tipo gabinete la carga es por lotes. Están fabricadas de materiales opacos que evita la exposición directa de los productos a la luz solar y normalmente aisladas para evitar la pérdida de calor.

En la Figura 11 se presenta una planta de secado híbrido Solar- gas LP construida en Zacatecas, México, enfocada a la deshidratación de productos agrícolas de la región. El sistema de secado es mediante la convección forzada de aire caliente en una cámara de secado tipo túnel operada por lotes o semi-continuamente. El calentamiento del aire necesario en el proceso de secado, se realiza mediante dos sistemas solares térmicos: un sistema de calentamiento directo de aire (48 calentadores solares de aire con una superficie de 111.1 m^2) y un sistema de calentamiento indirecto de aire (40 colectores solares de agua con una superficie de 92.4 m^2) con 6000 litros de almacenamiento térmico. Además, cuenta un sistema de respaldo de energía convencional (quemador de gas L.P). La integración de las diferentes tecnologías ofrece un sistema de una generación capaz de adaptarse rápida y eficazmente a diferentes formas de funcionamiento. Los esquemas de operación del sistema de generación de energía térmica son los siguientes: convencional, solar e híbrido. El modo de funcionamiento convencional es usando el sistema de respaldo de energía de gas LP. El modo solar consiste en aprovechar la energía solar captada por los sistemas de calentamiento directa e indirecta de aire, ya sea de forma independiente o combinada. La potencia de uno o ambos sistemas solares se combina con un sistema tradicional en modo híbrido; permite realizar un proceso de secado continuo.

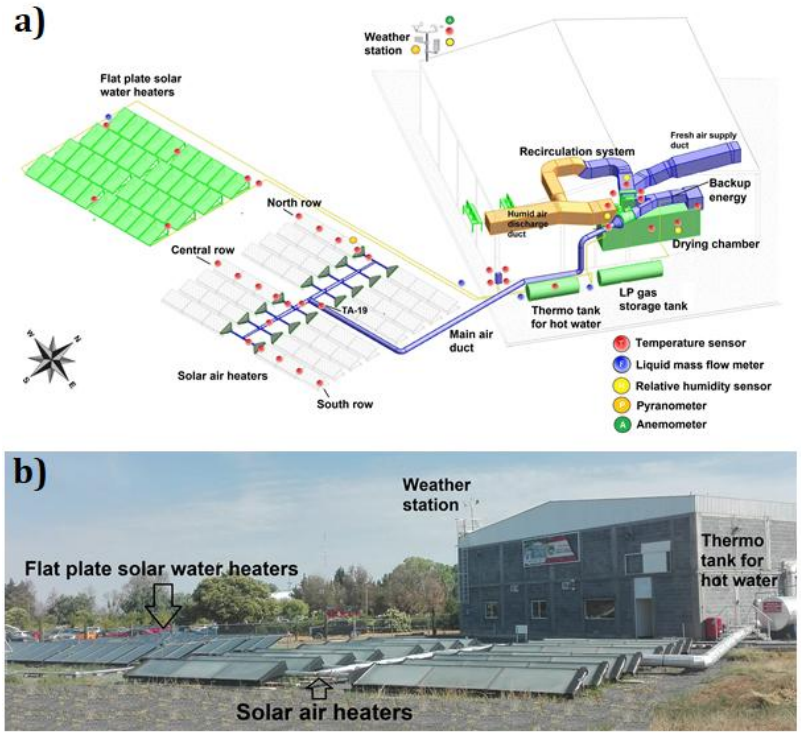

Figura 11 a) Representación esquemática de la distribución de algunos de los sensores de medida instalados en la planta. b) Fotografía de la planta termosolar para la deshidratación de alimentos agrícolas.

A continuación, se presentan algunas ventajas y desventajas de los secadores solares indirectos (A. B. Lingayat et al. 2020):

Ventajas:

- Mejor calidad de producto ya que obtiene las temperaturas requeridas.
- Mejor control del secado y mejor calidad del producto que el secado al sol.
- Mayor absorción de humedad por kg de aire seco.
- Retención del color del producto al no estar expuesto a la radiación ultravioleta.
- Mejor rendimiento que otros secadores de tipo convencional.
- Ausencia de daños por calor en los cultivos.
- Especialmente recomendado para materiales fotosensibles como limón, pepino, papaya, etc.
- Mayor eficiencia que el secado solar directo.

Desventajas:

- La intensidad de la radiación solar varía con el tiempo; por lo que se necesita almacenamiento térmico y también una fuente de energía auxiliar durante los días nublados y por la noche.
- La radiación solar tiene una densidad de energía baja y, por lo tanto, se requiere una gran superficie para el colector.
- Altos costes de inversión inicial y energía.

Secadores solares integrales

En los secadores solares integrales (SSI), se utilizan materiales transparentes para transmitir la radiación solar directamente a los productos alimenticios. En estos secadores, las pérdidas por convección del viento se reducen por la cubierta transparente y, por lo tanto, se puede aumentar la temperatura de la cámara de secado. Los SSI se pueden clasificar básicamente 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). Kumar y colaboradores clasifican a los secadores invernadero en dos clases de acuerdo a su estructura: (1) forma de domo, cuyo objetivo es aprovechar al máximo la radicación solar global y (2) de techo plano, el cual promueve una mezcla adecuada del aire dentro del secador (Prakash y Kumar 2014).

Los secadores invernadero son un tipo especial de SSI en los cuales parte de la energía solar que incide sobre la cubierta del invernadero pasa al interior de esté e incide directamente sobre el material a secar, estantes de secado y el piso. La energía solar es absorbida por los componentes al interior del invernadero. El invernadero transforma la irradiación solar entrante de longitud de onda corta del sol en energía térmica de longitud de onda larga al incrementar básicamente la temperatura de los materiales a su interior y del aire circundante. La energía térmica al interior del invernadero permite que se establezca una transferencia simultánea de calor y masa en el producto húmedo a secar que provoca la remoción de agua por evaporación y, por consiguiente, la deshidratación de los productos húmedos.

Normalmente, las cubiertas de los invernaderos son de policarbonato alveolar que tienen espacios de aire entre sus capas, ya 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). La energía térmica al interior del invernadero permite que se establezca una transferencia simultánea de calor y masa en el producto húmedo a secar que provoca la remoción de agua por evaporación y, por consiguiente, la deshidratación de los productos húmedos. 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).

En la Figura 12 se presenta un secador solar tipo invernadero con techo inclinado orientado hacia la posición del sol. El techo y tres lados de las paredes de la cámara de secado se hicieron con láminas de policarbonato con un valor de transmitancia del 70% y la pared trasera se aisló con un poliestireno de color negro. Tenía un techo inclinado y una puerta de carga a un lado. Las bandejas de producto se colocaron dentro de la secadora que es capaz de secar los residuos de orujo de tomate en un rango de temperatura de 40 a 58 ° C en un período de 5 h.

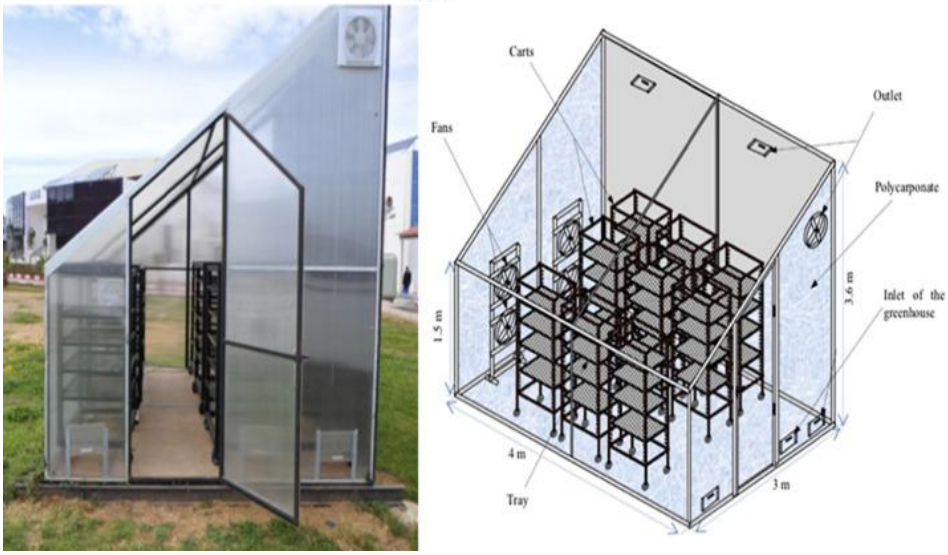

Figura 12 Fotografía y diagrama esquemático de un secador solar tipo invernadero (Badaoui et al. 2019)

En la Figura 13 se presentan un secador solar tipo invernadero a gran escala, con una cámara de secado en forma de domo parabólico para secar entre 300 y 1000 kg de chile. Puede operar mediante convección forzada debido a nueve ventiladores alimentados mediante tres paneles fotovoltaicos de 50 W. Este sistema de secado solar directo puede secar 500 kg de chile con un 74% de contenido de humedad inicial (base húmeda) en 3 días, en comparación con los 5 días requeridos por el secado solar abierto. Como sugieren los resultados experimentales, este tipo de secador tiene un potencial enorme y puede ser beneficioso para el secado a gran o mediana escala de cultivos agrícolas. Desde un punto de vista económico, este secador es muy atractivo ya que el período de recuperación aproximado fue de aproximadamente 2 años (Kaewkiew, Nabnean, y Janjai 2012).

Figura 13 Secador solar tipo invernadero utilizado para secar el chile a gran escala (Kaewkiew, Nabnean, y Janjai 2012)

A continuación, se presentan algunas ventajas y desventajas de los secadores solares directos (A. B. Lingayat et al. 2020):

Ventajas del SSD:

- Baja contaminación en el producto debido a la envolvente proporcionada por la cubierta transparente.
- Protección contra lluvia, rocío, etc.

- Mejor calidad de producto que en el secado a cielo abierto.
- Simple y menos costoso de fabricar que el secador indirecto para la misma capacidad.

Desventajas del SSD:

- Algunos parámetros de calidad del producto, especialmente el color, se deterioran cuando el producto se expone directamente a la luz solar o al sobrecalentamiento.
- La eliminación inadecuada de la humedad del vapor da como resultado velocidades de secado más lentas.
- De menor capacidad y, por lo tanto, útil solo para aplicaciones a escala pequeña o moderada.
- La transmisividad de la cubierta se reduce después de un tiempo a medida que se produce la condensación de humedad dentro de la cubierta o por los rayos UV.

Revisión del secador solar de escala mediana y grande

A conocimiento de los autores no existe un análisis metodológico sobre la capacidad de los sistemas de secado solar. No obstante, en general, las capacidades (kg) de las cámaras de secado podrían agruparse en tres grupos: i) equipos a pequeña escala (autoconsumo o laboratorio, (< 50 kg)), ii) mediana escala (plantas pilotos o semi-industriales, (50-1000 kg)), iii) grande escala (industriales, (>1000 kg)). La mayoría de los secadores solares de baja capacidad se caracterizan por áreas de captación menores a los 20 m^2. Además, la mayoría no evaluó la operación del secado de producto en forma continua durante las horas sin sol (Ortiz-Rodríguez et al. 2020). 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 producción.

En la Tabla 1 se muestra el resumen de algunos sistemas híbridos de secado solar por convección forzada con áreas de captación solar mayores a 30 m^2, reportados en la literatura desde 1993 a 2020. Las revisiones realizadas reafirman que el secador solar a escala industrial no ha sido suficientemente estudiado (Kamfa et al. 2020) (A. Lingayat, Balijepalli, y Chandramohan 2021) y se requiere más investigación para optimizar los secadores solares apropiados (Condorí et al. 2017).

Tabla 1 Sistemas de secado solar de gran capacidad con respaldo de energía

Autor, año y país	Tipo de secador solar	Tipo de captador y área (m2)	Capacidad de carga evaluada (kg)	Temperatura promedio en la cámara (°C)	Energía de respaldo	Fracción solar (%)
Arata and Sharma (1993) Chile (Arata, Sharma, y Spagna 1993).	Distribuido-Activo	SAH 129.6 m^2	1000 kg de durazno (cabinete)	En la entrada: 61 °C	LP gas	82.5 %
Arata and Sharma (1993) Chile (Arata, Sharma, y Spagna 1993).	Distribuido-Activo	Invernadero 180 m^2	340 kg de durazno (gabinete)	En la entrada: 50.2 °C	LP gas	80.9 %
Palaniappan and Subramanian (1998) India (Palaniappan y Subramanian 1998)	Distribuido-Activo	SAH (Techo integrado) 212 m^2	30 ton/mes de té (tipo bandeja o lecho fluido)	---	Carbón	25 %
Janjai (2012) Tailandia (Serm Janjai 2012)	Integral-Activo	Invernadero 160 m^2 de piso	1000 kg de tomate (mesas)	55°C	LP gas	≈ 80 %

Fudholi et al. (2015) Malasia (Ahmad Fudholi et al. 2015)	Mixto-Activo	SWH ≈ 33.6 m²- Invernadero	200 kg de bagré	44 °C con 626 W/m².	Eléctrico	60 %*
Misha *et al.* (2016) Malasia (Misha et al. 2016)	Mixto-con desecante asistido por energía solar-Activo	SWH 31.5 m² – techo transparente	231 kg de hojas de palma aceitera trituradas (tipo armario)	50 °C	Eléctrico	66 %
Ortiz-Rodríguez, *et al.* (2020) México. (Ortiz-Rodríguez et al. 2020)	Distribuido-Activo	SAH 111.1 m² SWH 92.4 m²	300 kg de nopal (túnel)	60 °C	Gas LP / termo-tanque	80%

* Considerando consumo eléctrico

El sistema de secado para fines industriales debe estudiarse con precisión basándose en el análisis de energía y exergía (Pirasteh et al. 2014). Fudholi y colaboradores, concluyen que las direcciones técnicas en el desarrollo de los sistemas de secado asistidos por energía solar para el producto agrícola son un diseño compacto del colector, una alta eficiencia, almacenaje integrado y sistema de larga vida útil (A. Fudholi et al. 2010). Hasta el momento, no se han realizado investigaciones exhaustivas sobre el secado solar industrial; y existe un alto potencial para mejorar el conocimiento en secado industrial.

La mayoría de los trabajos reportados se desarrollan con un enfoque de evaluación energética y, por lo tanto, carecen de información sobre su viabilidad técnico-financiera para su escalamiento comercial. No se encontraron trabajos disponibles que informen sobre el secado solar en aplicaciones agroindustriales de gran escala (>1000 kg). En todos los trabajos analizados la carga de producto a la cámara de secado se realizó por lotes, por lo tanto, en la mayoría de los casos la fracción solar utilizada fueron superiores al 60%. Sin embargo, en las aplicaciones de carga semi-continua o continua es de esperarse una fracción solar menor a menos que se disponga de un sistema de almacenamiento termo-solar.

De manera general, aunque algunos estudios apuntan a una misma dirección e identifican un gran potencial para la implementación de secado solar en los procesos industriales (textil, cemento, madera, lácteos, tratamiento residuos, biocombustibles y preservación de alimentos), aún es necesario realizar investigaciones para mejorar el rendimiento termodinámico y económico de los sistemas de secado solar, haciendo énfasis a la disminución de los costos de fabricación y mantenimiento sin dejar a un lado la disponibilidad térmica requerida por la industria, con el fin de poder competir con alternativas más económicas hasta el momento.

Los procesos de secado que se emplean actualmente en la industria alimentaria seguirán jugando un papel importante en la fabricación y preservación de alimentos mientras aún sean viables. Una reingeniería y optimización de estas tecnologías de secado existentes son cruciales con el fin de ser más sostenibles. Las mejoras incrementales de las tecnologías de secado existentes todavía son aceptadas fácilmente por la industria alimentaria debido a la reducción de los riesgos inherentes en comparación con la implementación de nuevas tecnologías (Sabarez 2016). Por lo tanto, la integración paulatina de sistemas termosolares a las tecnologías de secado existentes en el sector agroindustrial podría permitir una maduración técnica y económica de la tecnología de secado solar, y los beneficios podrían presentarse a corto plazo. Es por ello, resulta alentador el diseño y mejoraras en las tecnologías de secado solar para su disponibilidad a nivel comercial.

Desafíos en la implementación de técnicas de secado solar

Al diseñar técnicas de secado energéticamente eficientes, rentables y sostenibles para los países en desarrollo, los ingenieros e investigadores deben concentrarse en los desafíos asociados con la operación de secado, el almacenamiento posterior al secado, el sistema de envasado y la conservación de la calidad de los alimentos. Se debe realizar una evaluación cuidadosa de los problemas financieros, técnicos y relacionados con las políticas que podrían ocurrir si un país en desarrollo opta por invertir en una técnica de secado mejorada.

A pesar de la naturaleza renovable y no contaminante de la energía solar, es difícil utilizar la radiación solar para secar. Si bien hay una abundancia de energía solar, su naturaleza periódica contradice la idea de funcionamiento continuo. Por lo tanto, el problema inherente de todas las tecnologías basadas en la energía solar es que son ineficaces durante las horas de poca luz solar. Aunque este problema se puede solucionar con el uso de un sistema de almacenamiento térmico, tienen su propia lista de limitaciones. Paralelamente a este almacenamiento térmico, la dificultad de la energía solar puede medirse mediante fuentes de energía auxiliares. Sin embargo, eso aumentará el costo de todo el sistema de secado.

Además, dado que la intensidad de la radiación incidente es función del tiempo, la intensidad óptima está disponible solo durante 1 a 3 horas al día. Durante las horas de la mañana y la tarde, la intensidad solar es considerablemente baja. Otro problema evidente de las tecnologías basadas en la energía solar es la baja densidad energética de la radiación solar. Debido a la baja densidad de energía, los secadores solares requieren un área de colector grande, lo que puede resultar costoso. Teniendo en cuenta el hecho de que las tecnologías basadas en fósiles pueden proporcionar un flujo de calor enorme utilizando una configuración compacta, no es práctico que los secadores solares exijan grandes superficies de recolección de energía.

La aplicación de tecnologías de secado solar también está limitada por la posición geográfica de un país en particular. Generalmente, los países en desarrollo están situados en la región tropical, que es adecuada para el secado solar debido a la alta irradiancia solar horizontal global. Las naciones en desarrollo situadas más allá del trópico de Cáncer y el trópico de Capricornio pueden utilizar la radiación solar en una escala limitada. Además, el rendimiento de los secadores solares también es susceptible a los cambios estacionales, lo que significa que durante el invierno o la temporada de lluvias, los secadores solares son extremadamente ineficaces. Por lo tanto, es esencial seleccionar cultivos de temporada para los secadores solares para controlar los costos de inversión. Además, solo se puede secar un número limitado de productos alimenticios utilizando colectores solares de placa plana más baratos, que pueden calentar el aire hasta 60 °C. El secado a alta temperatura solo se puede lograr a través de colectores solares concentrados. Sin embargo, estos tipos de secadores son considerablemente caros. Dado el pequeño flujo de energía de la mayoría de los secadores solares, solo se pueden usar para secar alimentos, lo que requiere poca energía.

Los problemas congénitos de los secadores solares se pueden resumir como (i) requieren costosos sistemas de almacenamiento de calor o una fuente de energía auxiliar o ambos (ii) carecen de un sistema de control de temperatura, y (iii) para operar de manera eficiente, necesitan una gran superficie coleccionistas. Las soluciones a estos problemas requieren una gran inversión, lo que puede ser un desafío para los países en desarrollo de bajos ingresos del mundo.

Discusiones y conclusiones

Los secadores solares tipo invernadero de gran capacidad tienen la ventaja de operar en modo activo y pasivo; este último es recomendable cuando las condiciones del recurso solar son desfavorable (alta o frecuente nubosidad) ya que en convección natural se puede mantener una temperatura y humedad adecuada en el interior de la cámara de secado. Mientras, los secadores indirectos de gran capacidad sólo pueden operar bajo convección forzada y cuando el recurso solar es continuo (despejado o poca nubosidad); ya que la nubosidad frecuente provoca un rápido descenso de la temperatura al interior de la cámara de secado. Lo que puede comprometer la integridad del producto por la generación de hongos debido a las condiciones internas de la cámara (baja temperatura, oscuridad y alta humedad). Ambas tecnologías, son apropiadas para el contexto de resolver los grades volúmenes de productos agrícolas que se desperdician durante la post-cosecha.

La disponibilidad intermitente de energía solar, las fluctuaciones estacionales y la lluvia repentina son los principales inconvenientes en el proceso de secado solar de gran capacidad. Para superar estos inconvenientes, el secador solar puede integrarse con fuentes de calor auxiliar como biomasa, quemador de GLP y calentadores eléctricos para suministrar el calor requerido para mantener el proceso de secado continuo. El secado solar se puede utilizar para complementar sistemas de secado industriales continuos, reduciendo así la cantidad total de energía proveniente de combustibles convencionales requerida. Por lo tanto, los secadores solares ayudan al mitigar el consumo de fuentes convencionales de energía, como los combustibles fósiles, lo que permite reducir las emisiones de CO_2. Además, para garantizar el secado continuo y alta productividad (tiempos cortos) característicos de los procesos semi-industriales e industriales, se utilizan secadores solares híbridos de convección forzada, principalmente con sistemas de calefacción convencionales (combustibles fósiles). Por lo tanto, existe una brecha importante para sistemas híbridos completamente renovables. Se puede concluir que los secadores solares indirectos y secador integral tipo invernadero son los más apropiados para el secado solar de gran capacidad. Aunque los sistemas de secado solar son sostenibles, su implementación para aplicaciones de nivel comercial es compleja, por lo tanto, aun se requiere investigación en este sentido.

Las innovaciones tecnológicas evolutivas y revolucionarias, impulsadas por la necesidad de reducir la demanda de energía y la huella de carbono, apuntan particularmente a mejorar la eficiencia energética, aumentar el uso de energías renovables y recuperar el calor residual (Defraeye 2014). Al mismo tiempo, sin embargo, las tecnologías de secado innovadoras también deben esforzarse por mejorar la calidad del producto, pero también por desarrollar productos novedosos (Mujumdar y Huang 2007).

Ante este panorama, el desarrollo de tecnologías de secado solar robustas que se adapten a las necesidades del sector agroindustrial y otros sectores industriales resulta relevante para atender las problemáticas actuales de ámbito mundial, mencionadas anteriormente. El desarrollo o mejoras de dichas tecnologías no sólo deben enfocarse en los aspectos técnicos del sistema, sino también debe incorporar directrices de diseño que contemple los aspectos económicos y sociales de la aplicación de la tecnología. El desarrollo e implementación de la tecnología de sistemas de secado solar, inicialmente a pequeña escala, en el sector agroindustrial mexicano podría permitir una maduración técnica y económica de la tecnología, y los beneficios podrían presentarse a corto plazo. Es por ello, resulta alentador el diseño y mejoraras en las tecnologías de secado solar para su disponibilidad a nivel comercial.

Aunque las consideraciones tecnológicas son importantes, sin el apoyo y los cambios en el comportamiento social y del consumidor , la aceptación más amplia fracasará (Portney et al. 2017). La creación de sistemas sostenibles requerirá una investigación colaborativa entre disciplinas y sectores; de ahí la necesidad adicional de transdisciplinariedad (Bergendahl, Sarkis, y Timko 2018). Los desafíos en la conservación de alimentos son de naturaleza diversa. Se requieren soluciones multidimensionales para resolver los desafíos relacionados con la conservación de alimentos en los países en desarrollo. Las personas de todos los ámbitos de la vida, desde el gobierno hasta el agricultor, junto con el consumidor, el educador y el investigador, deben hacer un esfuerzo conjunto para resolver los problemas de conservación de los alimentos. Es por ello, que antes de realizar el desarrollo y la implementación tecnológica de sistemas de energía solar para mitigar la pérdida en los procesos post- cosecha y generar valor agregado, es necesario realizar un análisis de factibilidad desde un punto vista social y comercial, con un enfoque científico-técnico participativo que favorezca procesos autogestivos. Con la finalidad, de elaborar una propuesta de investigación e incidencia acorde a las necesidades de los usuarios.

Referencias

Aggarwal, Satakshi, Ashish Mohite, y N. Sharma. 2018. «The maturity and ripeness phenomenon with regard to the physiology of fruits and vegetagles: 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.

Arata, A, V. K Sharma, y G Spagna. 1993. «Performance Evaluation of Solar Assisted Dryers for Low Temperature Drying Application—II. Experimental Results». *Energy Conversion and Management* 34 (5): 417-26. https://doi.org/10.1016/0196-8904(93)90091-N.

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, Abdulrasaq 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.

Badaoui, Ouassila, Salah Hanini, Ahmed Djebli, Brahim Haddad, y Amina Benhamou. 2019. «Experimental and modelling study of tomato pomace waste drying in a new solar greenhouse: Evaluation of new drying models». *Renewable Energy* 133 (abril): 144-55. https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.10.020.

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.

Bergendahl, John A., Joseph Sarkis, y Michael T. Timko. 2018. «Transdisciplinarity and the Food Energy and Water Nexus: Ecological Modernization and Supply Chain Sustainability Perspectives». *Resources, Conservation and Recycling* 133 (junio): 309-19. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.01.001.

Brodowska, Katarzyna Małgorzata. 2017. «Natural Flavonoids: Classification, Potential Role, and Application of Flavonoid Analogues». *European Journal of Biological Research* 7 (2): 108-23.

«CATALOGO_DE_INICIATIVAS_2014_baja.pdf». s. f. Accedido 13 de octubre de 2019. http://www.aecosan.msssi.gob.es/AECOSAN/docs/documentos/tema_interes/CATALOGO_DE_INICIATIVAS_2014_baja.pdf.

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.

COFECE. 2015. «Reporte sobre las condiciones de competencia en el sector agroalimentario». México: Comisión Federal de Competencia Económica. http://https%253A%252F%252Fwww.cofece.mx%252Freporte-sobre-las-condiciones-de-competencia-en-el-sector-agroalimentario-2%252F.

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.

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.

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.

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.

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-Sebaii, 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.

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.

Esper, A., y W. Mühlbauer. 1998. «Solar drying - an effective means of food preservation». *Renewable Energy*, Renewable Energy Energy Efficiency, Policy and the Environment, 15 (1): 95-100. https://doi.org/10.1016/S0960-1481(98)00143-8.

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. 2011a. «"Energy-smart" food for people and climate». 2011. http://www.fao.org/docrep/014/i2454e/i2454e00.pdf.

———. 2011b. «PÉRDIDAS Y DESPERDICIO DE ALIMENTOS EN EL MUNDO», 42.

———. 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.

Farjana, Shahjadi Hisan, Nazmul Huda, M. A. Parvez Mahmud, y R. Saidur. 2018. «Solar Process Heat in Industrial Systems – A Global Review». *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 82 (febrero): 2270-86. https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.08.065.

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.

Fudholi, Ahmad, Kamaruzzaman Sopian, Mohamed Gabbasa, B. Bakhtyar, M. Yahya, Mohd Hafidz Ruslan, y Sohif Mat. 2015. «Techno-Economic of Solar Drying Systems with Water Based Solar Collectors in Malaysia: A Review». *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 51 (noviembre): 809-20. https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.06.059.

García-Valladares, O., N. M. Ortiz, I. Pilatowsky, y A. C. Menchaca. 2020. «Solar Thermal Drying Plant for Agricultural Products. Part 1: Direct Air Heating System». *Renewable Energy* 148 (abril): 1302-20. https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.10.069.

Girotto, 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.

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.

Hollick, J. C. 1999. «Commercial scale solar drying». *Renewable Energy*, Renewable Energy Energy Efficiency, Policy and the Environment, 16 (1): 714-19. https://doi.org/10.1016/S0960-1481(98)00258-4.

Janjai, S., N. Lamlert, 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.

Joardder, Mohammad U. H., y Mahadi Hasan Masud. 2019a. «Causes of Food Waste». En *Food Preservation in Developing Countries: Challenges and Solutions*, editado por Mohammad U. H. Joardder y Mahadi Hasan Masud, 27-55. Cham: Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-11530-2_2.

———. 2019b. «Food Preservation Techniques in Developing Countries». En *Food Preservation in Developing Countries: Challenges and Solutions*, editado por Mohammad U. H. Joardder y Mahadi Hasan Masud, 67-125. Cham: Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-11530-2_4.

Kaewkiew, J., S. Nabnean, y S. Janjai. 2012. «Experimental investigation of the performance of a large-scale greenhouse type solar dryer for drying chilli in Thailand». *Procedia Engineering*, ISEEC, 32 (enero): 433-39. https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.01.1290.

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.

Karale, S R. 2013. «A Review Paper on Solar Dryer». *International Journal of Engineering Research And* 3 (2): 7.

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.

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, Laveet, M. Hasanuzzaman, y N. A. Rahim. 2019. «Global Advancement of Solar Thermal Energy Technologies for Industrial Process Heat and Its Future Prospects: A Review». *Energy Conversion and Management* 195 (septiembre): 885-908. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.05.081.

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.

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.

Li, Kun, Min Zhang, Arun S. Mujumdar, y Bimal Chitrakar. 2019. «Recent developments in physical field-based drying techniques for fruits and vegetables». *Drying Technology* 37 (15): 1954-73. https://doi.org/10.1080/07373937.2018.1546733.

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.

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.

Mattsson, B., y U. Sonesson. 2003. «1 - Introduction». En *Environmentally-Friendly Food Processing*, editado por Berit Mattsson y Ulf Sonesson, 1-2. Woodhead Publishing Series in Food Science, Technology and Nutrition. Woodhead Publishing. https://doi.org/10.1533/9781855737174.1.

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.

Misha, S., S. Mat, M. H. Ruslan, E. Salleh, y K. Sopian. 2016. «Performance of a Solar-Assisted Solid Desiccant Dryer for Oil Palm Fronds Drying». *Solar Energy* 132 (julio): 415-29. https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.03.041.

Mohana, Y., R. Mohanapriya, T. Anukiruthika, K. S. Yoha, J. A. Moses, y C. Anandharamakrishnan. 2020. «Solar Dryers for Food Applications: Concepts, Designs, and Recent Advances». *Solar Energy* 208 (septiembre): 321-44. https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.07.098.

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 Khoshtagaza. 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, A. S., y L. X. Huang. 2007. «Global R&D Needs in Drying». *Drying Technology* 25 (4): 647-58. https://doi.org/10.1080/07373930701285886.

Mujumdar, A.S. 2015. *Handbook of industrial drying*. Boca Raton, Florida, USA: CRC Press.

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.

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.

———. 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.

Onwude, Daniel I., Norhashila Hashim, y Guangnan Chen. 2016. «Recent Advances of Novel Thermal Combined Hot Air Drying of Agricultural Crops». *Trends in Food Science & Technology* 57 (noviembre): 132-45. https://doi.org/10.1016/j.tifs.2016.09.012.

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., 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.

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.

Palaniappan, C., y S. V. Subramanian. 1998. «Economics of Solar Air Pre-Heating in South Indian Tea Factories: A Case Study». *Solar Energy* 63 (1): 31-37. https://doi.org/10.1016/S0038-092X(98)00028-0.

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.

Phadke, Pranav C, Pramod V Walke, y Vilayatrai M Kriplani. 2015. «A REVIEW ON INDIRECT SOLAR DRYERS» 10 (8): 12.

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.

Portney, Kent E., Bryce Hannibal, Carol Goldsmith, Peyton McGee, Xinsheng Liu, y Arnold Vedlitz. 2017. «Awareness of the Food–Energy–Water Nexus and Public Policy Support in the United States: Public Attitudes Among the American People». *Environment and Behavior* 50 (4): 375-400. https://doi.org/10.1177/0013916517706531.

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.

Rahman, S.M. 2007. *Handbook of Food Preservation*. CRC Press. http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0963996900001435.

Román-Roldán, Nicolás-Iván, Anabel López-Ortiz, Jean-Fulbert Ituna-Yudonago, Octavio García-Valladares, y Isaac Pilatowsky-Figueroa. 2019. «Computational Fluid Dynamics Analysis of Heat Transfer in a Greenhouse Solar Dryer "Chapel-Type" Coupled to an Air Solar Heating System». *Energy Science & Engineering* 7 (4): 1123-39. https://doi.org/10.1002/ese3.333.

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.

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.

Sharma, Ashish K., Chandan Sharma, Subhash C. Mullick, y Tara C. Kandpal. 2017. «Solar Industrial Process Heating: A Review». *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 78 (octubre): 124-37. https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.04.079.

Sharma, Atul, C. R. Chen, y Nguyen Vu Lan. 2009. «Solar-energy drying systems: A review». *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 13 (6): 1185-1210. https://doi.org/10.1016/j.rser.2008.08.015.

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.

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., D. K. Rabha, y P. Muthukumar. 2021. «A Review on Solar Dryers Integrated with Thermal Energy Storage Units for Drying Agricultural and Food Products». *Solar Energy*, agosto. https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.07.075.

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.

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.

Tiwari, G. N. 2013. *Solar Energy: Fundamentals, Design, Modelling and Applications*. Alpha Science International, Limited.

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.

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. Iniyan, 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.

World Bank. 2018. «Reporte de la pérdida y desperdicio de alimentos en México».

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.

Zhang, Min, Huizhi Chen, Arun S. Mujumdar, Juming Tang, Song Miao, y Yuchuan Wang. 2017. «Recent developments in high-quality drying of vegetables, fruits, and aquatic products». *Critical Reviews in Food Science and Nutrition* 57 (6): 1239-55. https://doi.org/10.1080/10408398.2014.979280.