

SECADO SOLAR DE FRUTAS TROPICALES COMO ESTRATEGIA DE CIRCULARIDAD Y CERO RESIDUOS

Messina Fernández Sarah Ruth ^{1*}; Campos Álvarez José², Gómez Espinoza Blanca Estela, Hernández Bautista Anthony Jair, Saldaña Durán Claudia Estela¹

¹Unidad Académica de Ciencias Básicas e Ingenierías, Universidad Autónoma de Nayarit, México

¹Instituto de Energías Renovables - UNAM, Temixco, Morelos, México

*sarah.messina.uan@gmail.com

Resumen

La producción de frutas tropicales requiere un gran consumo de agua, incurriendo en una huella hídrica estimada en 1600 l de agua en promedio por kg de fruta. La cosecha de la mayoría de las frutas tropicales es de gran volumen y ocurre en coto tiempo ~ 60 días, así un alto porcentaje de la producción se pierde, se desperdicia o se desecha antes de llegar al consumidor final. En este escenario la productividad es muy baja y los ingresos económicos de los productores son mínimos, además, los productos no cumplen su función de alimentar a la población fuera de los sitios de cultivo impidiendo que se logre el beneficio nutricional que puede ofrecer esta producción a toda la población. La FAO estima que la pérdida y el desperdicio de alimentos que se da entre los sitios de cultivo y el consumidor final es aproximadamente un tercio de la producción en general en todo el mundo, lo que aumenta la huella hídrica y la huella de carbono, además, la disminución de ganancias para los productores del campo. En este trabajo demostramos mediante datos experimentales y de campo a través de un proyecto de investigación e incidencia con enfoque transdisciplinar, que la implementación de secadores solares tipo invernadero a escala familiar en comunidades rurales es una estrategia de economía circular y cero residuos, hacia el cumplimiento del ODS sobre Producción y Consumo Responsable.

Palabras clave: Secado Solar, Producción y Consumo Responsable.

1 Introducción

Manejo de Residuos en Comunidades Rurales: La generación y eliminación de residuos sólidos municipales son problemas ambientales significativos tanto en las comunidades rurales y urbanas debido al aumento de la población y a la falta de servicios de gestión. Estudios de caracterización realizados en comunidades rurales demuestran que los servicios de gestión de residuos son inexistentes o insuficientes y que el porcentaje de orgánicos en esos sitios es del orden del 70% (Emara, 2023). La literatura sugiere que el tratamiento de los residuos para generar composta es la mejor solución en las comunidades rurales ya que la composta es benéfica y se puede utilizar en la recuperación y biorremediación de tierras. Una fracción considerable de los residuos orgánicos de los sitios rurales provienen de un mal manejo agrícola o por la falta de transporte o procesamiento de la producción, incurriendo en grandes pérdidas de cosechas, con daños económicos y ambientales cuantiosos. La agricultura es uno de los principales causantes del deterioro ambiental y el cambio climático ya que está relacionada con las emisiones de GEI. Hay pocos estudios que demuestren el nexo entre la agricultura y sus efectos en el cambio climático global. Estudios empíricos señalan que, una mayor cantidad de producción de cultivos, ganado y acuicultura conducirá a un aumento de los GEI de ahí que se sugiere mediante políticas públicas hacer recomendaciones sobre agricultura sostenible y climáticamente inteligente para mejorar la productividad y la resiliencia, mientras se reducen las emisiones de GEI del sector agrícola (Raihan et al., 2023).

Economía Circular: La economía circular ofrece un marco de soluciones sistémicas para el desarrollo económico abordando la causa de los grandes problemas globales como el cambio climático, la pérdida de biodiversidad, el incremento de residuos y de contaminación, al tiempo que revela grandes oportunidades de crecimiento. La economía circular revoluciona la forma en que diseñamos, producimos y consumimos. El modelo se basa en tres principios: eliminar residuos y contaminación; mantener productos y materiales en uso, y regenerar sistemas naturales (Morseletto, 2023). La creación de valor en el contexto de la Economía Circular está clasificada en ciclos técnicos y biológicos. En la parte del ciclo técnico, los materiales y productos fabricados por el humano permanecen en uso el mayor tiempo posible. De este modo, el valor se crea mediante el intercambio, el mantenimiento, la reutilización, la remanufactura y el reciclaje. Un estudio sobre cómo lograr una economía circular, señala 10 estrategias comunes de la economía circular: recuperar, reciclar, reutilizar, remanufacturar, reacondicionar, reparar, reutilizar, reducir, repensar, rechazar. El estudio aclara que los objetivos existentes para la recuperación y el reciclaje no necesariamente promueven una economía circular, aunque son los más comúnmente aplicados hasta el momento. Debido a la falta de eficacia en la recuperación y el reciclaje, los objetivos deberían favorecer estrategias de economía circular más poderosas, como: reducir el desperdicio, aumentar la eficiencia, cerrar los ciclos de producción y maximizar la retención del valor económico de los materiales y productos (Morseletto, 2020). En particular, el estudio propone un conjunto de nuevos objetivos para la transición a una economía circular junto con una nueva visión de los objetivos dirigidos tanto a académicos como a tomadores de decisiones. Otro estudio demuestra cómo las prácticas de la economía circular, inducidas por las presiones de las partes interesadas, directamente y a través de los mecanismos de mediación de las capacidades de innovación y colaboración impactan la participación en la Responsabilidad Social Empresarial de las PYMES (Baah et al., 2023). En toda organización con fines comerciales el principal objetivo es generar ingreso económico a partir de la disminución de costos y optimizando ganancias, si su fin es comercial, solamente valorará actividades que contribuyan a generar más ingresos, sin importar contengan aspectos ecológicos ya sea por desconocimiento u omisión, más aún si la legislación en que se rige no lo exige.

En el contexto de la cadena de suministro de alimentos, los objetivos sostenibles de la ONU para 2030 apuntan a reducir el desperdicio de alimentos en un cincuenta por ciento. Se ha mencionado anteriormente que las economías con medianos o bajos ingresos presentan diversas complejidades para adoptar la economía circular, por ello se han visto pocos o ningún avance al respecto en estas economías emergentes. Se han identificado un total de 15 barreras para la implementación de la economía circular en la cadena de suministro de alimentos de circuito cerrado y se ha encontrado que los problemas de trazabilidad, la experiencia limitada en información y tecnología, el diseño deficiente de la red logística y el alto costo de instalación y operación de las instalaciones son los factores más influyentes (Ardra & Barua, 2022). Mazen et al. (2022) señalan que los gobiernos pueden desempeñar un papel importante en la promulgación de leyes y reglamentos que fomenten la Economía Circular en las adquisiciones. Otros autores indican que la economía circular ha llamado la atención de los formuladores de políticas como un facilitador para lograr la sostenibilidad, especialmente en los países desarrollados sin embargo, transitar hacia una Economía Circular es un gran desafío (Al-Sinan & Bubshait, 2022). En México, el Senado de la República aprobó el dictamen por el que se expide la Ley General de Economía Circular, sin embargo, el proceso para que se promulgue en el Diario Oficial de la Federación aún no se completa, por lo tanto, no tiene efecto todavía.

El contexto del presente estudio: En el estado de Nayarit, en el occidente de México, la región costa norte se caracteriza por ser una de las regiones agrícolas más ricas del estado y con mayor producción de granos y diversidad de frutas tropicales. En esta región, una creciente incorporación de empresas dedicadas a la deshidratación de frutas como mango, plátano, yaca y piña, llevan a cabo procedimientos semi-industrializados, con capacidad para secar hasta 20 toneladas al día por empresa en conjuntos de hornos con capacidad de 1 a 4 toneladas por horno. Los productores entregan sus frutas a empresas empacadoras para su venta en el mercado local, nacional e internacional. Las frutas que no pasan la calidad en los empaques son trasladadas a empresas deshidratadoras que ofrecen una segunda oportunidad a estos productos. En las deshidratadoras las frutas son lavadas y desinfectadas, posteriormente, se pelan para

extraer la pulpa (producto a deshidratar), los residuos (cáscara, tallos, semillas) se desechan en tiraderos clandestinos a cielo abierto. La pulpa representa cerca del 50% del peso de la fruta y se corta de la forma y grosor necesario para el tipo de producto final; se coloca en bandejas y se introduce en hornos de convección operando a gas. Los tiempos para el secado van de 10 a 15 horas dependiendo del contenido de humedad de la fruta y el grosor del corte, la temperatura es controlada entre 60 °C durante todo el proceso. Grandes motores eléctricos (~ 10 HP) accionan los sistemas de ventilación y extracción de aire caliente y húmedo para retirarlo de la cámara de secado. Una vez que el producto tiene la consistencia y humedad deseada se deja enfriar, se empaqueta en bolsas de plástico o celofán y se almacena en un cuarto frío, para su posterior venta. Los residuos que se generan en el proceso de obtención de la pulpa, cáscara, huesos y semillas, pueden llegar a representar un poco más de la mitad del peso inicial y su disposición final son tiraderos a cielo abierto en las parcelas de cultivo y en ocasiones en tiraderos clandestinos. Estos desechos a pesar de ser biodegradables presentan su proceso natural de descomposición que puede durar meses, generando la proliferación de moscas y vectores de contaminación, olores desagradables y plagas, por lo tanto, el enfoque de la economía circular en este tipo de procesos a partir del aprovechamiento de subproductos del deshidratado de frutas representa una oportunidad de circularidad y cero residuos.

2 Metodología

2.1 Descripción del sitio de estudio

La descripción del sitio de estudios se realizó utilizando datos del INEGI así como mediante observación participativa y aplicación de encuestas y entrevistas utilizando la técnica de bola de nieve.

2.2 Diseño y construcción de prototipos de secado solar

El requerimiento energético para implementar procesos de secado solar, parte del conocimiento del recurso solar existente su variabilidad y disponibilidad en el sitio, esto se realizó utilizando datos de acceso libre de la página web "Photovoltaic Geographical Information System" (PVGIS) para el periodo 2005 a 2020. En el diseño se priorizó la sencillez, el uso de materiales de propiedades ópticas y térmicas adecuadas para la aplicación y la facilidad de adquisición de materiales en el mercado local. En nuestro trabajo previo se describe la propuesta de secador solar familiar implementado en el presente trabajo (Messina et al., 2022).

2.3 Adquisición de información

La evaluación del desempeño energético del secador solar se realizó mediante un sistema autónomo de monitoreo y medición de variables. El sistema registro y almacena datos de las variables temperatura, irradiancia, humedad relativa y masa. Cuenta con un microcontrolador Arduino Mega 2560, el cual controla 10 sensores "DS18B20" para la medición de temperatura, 4 sensores "DHT22" para la medición de humedad relativa y temperatura, 1 celda solar de 2.3 x 4.3 cm para la medición de irradiancia y un módulo HX711 junto a una celda de carga de 5 Kg para la medición de masa.

2.4 Pruebas de secado

Las pruebas se llevaron a cabo en dos condiciones de trabajo: a plena carga con convección natural y a plena carga con convección forzada. También se realizó la caracterización del secador sin carga y sin convección de aire.

3 Resultados y Discusión

3.1 Descripción del sitio de estudio

La localidad de El Llano, en el municipio de San Blas, localizada en la región costa norte de Nayarit; tiene una población de 1259 habitantes, su ubicación geográfica está en 105°10'40.83" W, 21°25'07.9" N, a 42 msnm, en la figura 1 se muestra el mapa de localización.

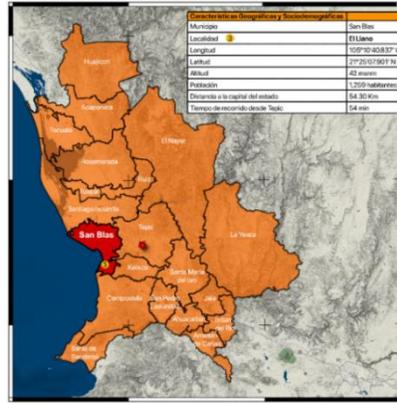


Figura 1. Mapa de localización de la localidad de El Llano, municipio de San Blas, Nayarit, México.

La producción agrícola en la comunidad destaca por el cultivo de yaca, para exportación al mercado internacional. El Llano ocupa el primer lugar en la producción de yaca y el estado de Nayarit es el principal productor a nivel nacional con el 92.91% de la producción (Elías Soto, 2020). En la comunidad se cultivan otras frutas como plátano, piña, guanábana y mango. Una fracción de hasta el 50 % de la producción no pasa los controles de calidad en las empacadoras y termina pudriéndose por mal manejo y falta de procesamiento. Derivado de esto, un creciente número de empresas deshidratadoras foráneas, de escala semi-industrial compran la producción rechazada a precio muy bajo, y emplean a los productores rurales y a sus familias en esas empresas. En tal esquema no hay vigilancia ni regulación por parte de los gobiernos locales o municipales. Para las empresas foráneas, sólo las pulpas de las frutas son de utilidad y los residuos son desechados a cielo abierto en los campos de cultivo o en tiraderos clandestinos, con las consecuencias ambientales causadas por la descomposición y lixiviados. En términos sociales la calidad del empleo es precaria, ofrecen trabajos temporales y a destajo, sin seguridad social ni prestaciones de ley. De ahí la importancia de implementar sistemas energéticos sustentables para el secado solar a escala familiar con la finalidad de dar valor agregado a las mermas y disminuir las pérdidas para transitar a esquemas de circularidad y cero residuos e impulsar el desarrollo de actividades como el turismo rural o el agro-turismo.

3.2 Proceso de Secado Solar

Estimación del Recurso Solar: Durante los meses de marzo a junio la irradiación promedio diaria, obtenida de la base de datos PVGIS, supera el promedio nacional de 5.5 kWh/m², con valores máximos de 7.36 kWh/m² en mayo y mínimos de 4.35 kWh/m² en diciembre. En la figura 2 se muestran los valores promedio mensuales de irradiación diaria disponible en la localidad, a partir de datos obtenidos de PVGIS.

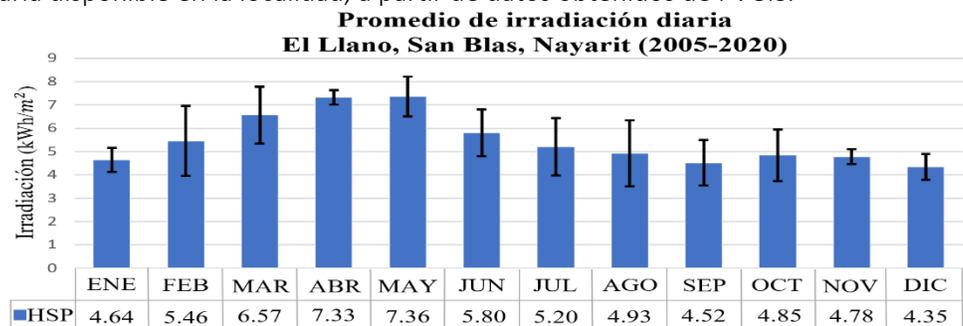


Figura 2. Irradiación solar promedio diario mensual en la comunidad de El Llano.

Diseño de los prototipos de secado: Para el diseño de los secadores se consideraron modelos fáciles de fabricar y construir con materiales asequibles y disponibles en el mercado local. El secador tiene

dimensiones generales de generales de 2.44 m x 1.22 m x 2.44 m, está construido en perfil de aluminio cuadrado de 1-¼" x 1-¼", escuadras de 1-1/2" x 3/16", cubierta perimetral y techumbre de policarbonato celular transparente de 6mm, con protección UV, la base en color humo. Cuenta con un área de secado de ~ 15 m² distribuida en 36 charolas en niveles, en las que se pueden colocar hasta 70 kg de pulpa de fruta. La carga y descarga de fruta se realiza a través de 2 puertas laterales abatibles. El secador tiene 4 ventiladores de 6" en la parte superior y 4 en la parte inferior. En las imágenes de la figura 3, se observan detalles constructivos del prototipo de secador solar implementado en la comunidad de El Llano.



Figura 3. Imágenes del secador solar familiar uni-modular. i) vista general de los seis niveles de charolas, ii) dimensiones generales, iii) colocación de ventiladores en la parte inferior y iv) detalles de la manufactura.

3.3 Pruebas del secado solar

Se realizaron pruebas de secado en días típicos del mes de febrero de 2023, para la medición de parámetros de humedad y temperatura bajo las siguientes condiciones de operación: a) Sin carga y sin convección; b) a plena carga y convección natural y c) A plena carga con convección forzada por ventiladores.

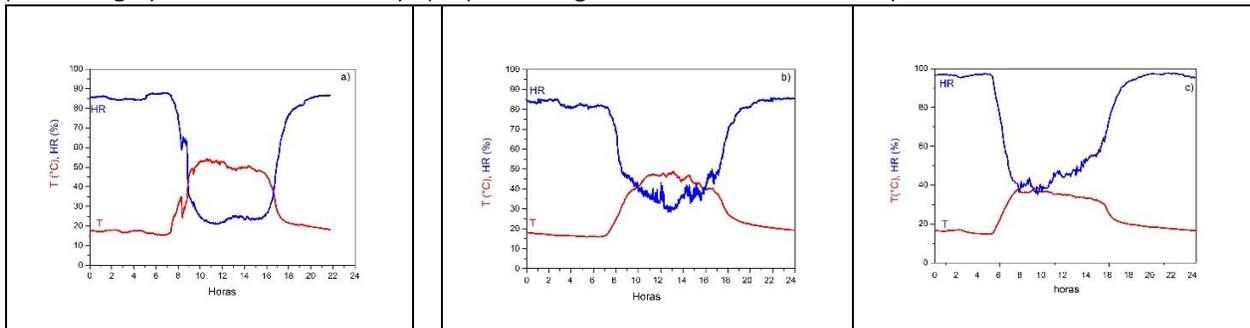


Figura 4. Temperatura y humedad relativa en el proceso de secado para las condiciones: a) Sin carga y sin convección; b) A plena carga y convección natural y c) A plena carga con convección forzada por ventiladores.

Como se observa en la figura 4 a) la temperatura se mantiene en un valor promedio de 50°C durante las 8 h continuas de operación, condición adecuada para llevar a cabo con éxito procesos de secado de productos agrícolas. Esta condición de temperatura se sostiene solo por 6 horas cuando el secador opera a plena carga con convección natural (figura 4b), suficiente para llevar a cabo procesos de secado solar, en jornadas de dos días solares, ya que la experiencia documentada en campo demuestra que se requieren periodos de 10 a 12 horas a temperaturas entre 60 y 60°C para lograr retirar el 70-80% de la humedad de las frutas. En la figura 4c) se observa que, con el uso de ventiladores para la extracción de humedad, la temperatura se mantiene por debajo de los 40°C durante el día solar, esto por un lado ayuda a conservar nutrientes de los productos, pero también podría incurrir en la proliferación de hongos y levaduras si no se tienen las condiciones de higiene e inocuidad adecuadas en el manejo de los productos.

4. Conclusiones

En este trabajo demostramos la viabilidad de implementación de secadores solares tipo invernadero como estrategia de circularidad y cero residuos en pequeñas comunidades productivas rurales como una forma de reducir las pérdidas de producción agrícola, dar valor agregado a las mermas de productos y generar mayores ingresos y bienestar en comunidades agrícolas y rurales. El diseño de secador solar implementado en este trabajo logra secar 70 kg de pulpa de fruta en 2 días solares. La implementación masiva de pequeños secadores solares en las cercanías de los sitios de cultivo junto con el diseño de políticas públicas para favorecer esquemas productivos de economía circular con enfoque pentahélice sugiere una vía hacia la agricultura rural sostenible al mismo tiempo que ayudaría a la disminución de emisiones de GEI del sector.

Agradecimientos: Al CONACYT - PRONACES 2022 por los recursos financieros para el proyecto 319456.

Referencias

- Al-Sinan, M. A., & Bubshait, A. A. (2022). The Procurement Agenda for the Transition to a Circular Economy. *Sustainability*, 14(18), 11528. <https://doi.org/10.3390/su141811528>
- Ardra, S., & Barua, M. K. (2022). Inclusion of circular economy practices in the food supply chain: Challenges and possibilities for reducing food wastage in emerging economies like India. *Environment, Development and Sustainability*. <https://doi.org/10.1007/s10668-022-02630-x>
- Baah, C., Agyabeng-Mensah, Y., Afum, E., & Kumi, C. A. (2023). Do circular economy practices accelerate CSR participation of SMEs in a stakeholder-pressured era? A network theory perspective. *Journal of Cleaner Production*, 394, 136348. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136348>
- Elías Soto, J. M. (2020). *Generalidades y particularidades del cultivo de la yaca (Artocarpus heterophyllus Lam.): El árbol de la fruta de los sabores combinados*. <http://repositorio.uaaan.mx:8080/xmlui/handle/123456789/47192>
- Emara, K. (2023). Sustainable solid waste management in rural areas: A case study of Fayoum governorate, Egypt. *Energy Nexus*, 9, 100168. <https://doi.org/10.1016/j.nexus.2022.100168>
- Messina, S., González, F., Saldaña, C., Peña-Sandoval, G. R., Tadeo, H., Juárez-Rosete, C. R., & Nair, P. K. (2022). Solar powered dryers in agricultural produce processing for sustainable rural development worldwide: A case study from Nayarit-Mexico. *Cleaner and Circular Bioeconomy*, 3, 100027. <https://doi.org/10.1016/j.clcb.2022.100027>
- Morseletto, P. (2020). Targets for a circular economy. *Resources, Conservation and Recycling*, 153, 104553. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.104553>
- Morseletto, P. (2023). Sometimes linear, sometimes circular: States of the economy and transitions to the future. *Journal of Cleaner Production*, 390, 136138. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136138>
- Raihan, A., Muhtasim, D. A., Farhana, S., Hasan, M. A. U., Pavel, M. I., Faruk, O., Rahman, M., & Mahmood, A. (2023). An econometric analysis of Greenhouse gas emissions from different agricultural factors in Bangladesh. *Energy Nexus*, 9, 100179. <https://doi.org/10.1016/j.nexus.2023.100179>