

## Henificación de alfalfa con energía solar indirecta Alfalfa haymaking with indirect solar energy

Juan C. Reyes-García <sup>a,\*</sup>, Carlos Vega-Ortiz <sup>a,b</sup>, José L. Larios-Ferrer <sup>a</sup>, Martín Badillo-Maldonado <sup>a</sup>,  
Denis B. Alpízar-Bonilla <sup>a</sup>

<sup>a</sup> Universidad Politécnica de la Energía, 42832, Tula de Allende, Hidalgo, México.

<sup>b</sup> Energy and Geoscience Institute, University of Utah, 42108, Salt Lake City, Utah, United States of America.

### Resumen

Este estudio presenta el análisis, modelado y construcción de una henificadora que utiliza energía solar indirecta para deshidratar alfalfa, un cultivo de alto valor nutricional para el ganado bovino con aplicación en regiones agroproductoras del Valle del Mezquital, Hidalgo. El sistema se basa en un techo solar activo con circulación forzada, donde las condiciones de secado, como la temperatura y la densidad de hilerado, se controlan mediante un sistema automatizado. Se realizó una simulación numérica del flujo de aire y la transferencia de calor para entender el rendimiento del prototipo, recreando las condiciones necesarias para obtener temperaturas de 40°C a 70°C en la cámara de secado, optimizando el proceso de henificación. A través de experimentos de campo bajo condiciones controladas, se construyó un prototipo con dimensiones 120 x 90 x 100 cm, con lo que se demostraron mejoras en el proceso de henificación artificial. La combinación de este método con otros ingredientes, como aglutinantes y aditivos, puede incrementar el valor nutricional del forraje, produciendo un heno de alta calidad. Los resultados se implementarán en la producción de heno en la Cooperativa Rancho Las Palmas, ubicada en Tlahuelilpan, Hidalgo.

**Palabras Clave:** Henificación artificial, Tasa de secado, Circulación forzada, Densidad de hilerado, Control automático.

### Abstract

This study presents the analysis, modeling, and construction of a food dehydrator that uses indirect solar energy to dehydrate alfalfa, a crop of high nutritional value for cattle, with application in agricultural regions of the Mezquital Valley, Hidalgo. The system is based on an active solar roof with forced circulation, where drying conditions such as temperature and windrow density are controlled by an automated system. A numerical simulation of airflow and heat transfer was carried out to understand the prototype's performance, recreating the necessary conditions to achieve temperatures ranging from 40°C to 70°C in the drying chamber, optimizing the food dehydration process. Through field experiments under controlled conditions, a prototype measuring 120 x 90 x 100 cm was built, demonstrating improvements in the artificial food dehydration process. The combination of this method with other ingredients, such as binders and additives, can increase the nutritional value of the forage, producing high-quality livestock feed. The results will be implemented in hay production at the Rancho Las Palmas Cooperative, located in Tlahuelilpan, Hidalgo.

**Keywords:** Haymaking, Drying rate, Forced ventilation, Swath density, Automatic control.

### 1. Introducción

La industria agropecuaria en México juega un papel predominante en las actividades socioeconómicas (INEGI, 2022). En 2016, a través de un decreto gubernamental, se instauró el 6 de marzo como el Día Nacional de la Ganadería en México, con el fin de reconocer y destacar la importancia del trabajo de quienes se dedican a esta actividad, así como su contribución al desarrollo del sector rural del país. Esta fecha

busca visibilizar el impacto que tiene la ganadería en la economía y en la sostenibilidad del campo nacional. Durante el año 2022, se destinaron aproximadamente 109 millones de hectáreas para la actividad ganadera en México. Este uso extensivo de la tierra estuvo respaldado por la dedicación de cerca de 841 mil personas, quienes se encargaron de la alimentación y el cuidado del ganado. Gracias a su labor, México logró posicionarse en el décimo lugar a nivel mundial en la producción primaria de ganado, lo que subraya la

\*Autor para la correspondencia: [juan.reyes@upenergia.edu.mx](mailto:juan.reyes@upenergia.edu.mx)

**Correo electrónico:** [juan.reyes@upenergia.edu.mx](mailto:juan.reyes@upenergia.edu.mx) (Juan Carlos Reyes-García), [carlos.vega@upenergia.edu.mx](mailto:carlos.vega@upenergia.edu.mx) (Carlos Vega-Ortiz), [leonel.larios@upenergia.edu.mx](mailto:leonel.larios@upenergia.edu.mx) (José Leonel Larios-Ferrer), [martin.badillo@upenergia.edu.mx](mailto:martin.badillo@upenergia.edu.mx) (Martín Badillo-Maldonado), [denis.alpizar@upenergia.edu.mx](mailto:denis.alpizar@upenergia.edu.mx) (Denis Berenice Alpízar-Bonilla).

relevancia de este sector en la economía nacional y global. En ese mismo año, la ganadería en México generó un total de 24.7 millones de toneladas de productos pecuarios, lo que representó el 8.2% del total de la producción agropecuaria y pesquera del país (SIAP-México, 2024). Considerando que las leguminosas forrajeras poseen un mayor contenido de proteínas y una calidad superior en comparación con las gramíneas, es imperativo fomentar su cultivo como una opción alimentaria viable para el ganado en México. Al incorporar estas leguminosas en la dieta del ganado, se potencia la producción de carne y leche de alta calidad proteica, contribuyendo a la mejora de la productividad del sector ganadero (SADR-México, 2023).

La producción de forrajes en México es un proceso clave que convierte materia inorgánica, como minerales, agua y dióxido de carbono, en materia orgánica mediante la fotosíntesis, aprovechando la energía solar. La disponibilidad de forraje está directamente vinculada con la alimentación del ganado, lo que a su vez impacta en la productividad agropecuaria. México, con su diversidad de condiciones ambientales y casi todas las formas climáticas existentes a nivel mundial, ofrece un contexto favorable para la producción de forraje, aunque también plantea desafíos. El forraje verde puede contener entre un 75% y 85% de humedad (Duthil, 1980; Nelson & Moser, 1994), lo que complica su conservación, ya que el proceso de henificación, o deshidratación del forraje, es crítico para preservar su valor nutritivo. Las pérdidas de nutrientes durante la henificación están directamente relacionadas con la duración del proceso, donde la deshidratación debe ser rápida para evitar la degradación de los nutrientes debido a la respiración y fermentaciones de las células vegetales.

En el estado de Hidalgo, la agricultura aprovecha la explotación de la energía solar, un proceso que es viable gracias a un suministro adecuado de agua y nutrientes que permiten el crecimiento óptimo de las plantas. Este enfoque es fundamental en una región donde las condiciones climáticas y la disponibilidad de recursos hídricos pueden variar significativamente. Monteith (1972), destaca que la agricultura es, en esencia, una forma de capturar y utilizar la energía solar (Navarro García & Navarro García, 2023; Szeicz, 1974), donde la eficiencia en el uso de esta energía puede determinar la productividad agrícola. La producción de materia seca en Hidalgo se puede entender como un proceso de conversión de energía luminosa en energía química, que luego se almacena en los tejidos vegetales. Algunos autores, como (García Guerrero & Losada Villasante, 1983), subrayan la sencillez y utilidad práctica de este concepto que tiene como objetivo maximizar la eficiencia de este proceso es vital. La capacidad de convertir la energía solar en materia seca de manera eficiente no solo impulsa la producción agrícola, sino que también contribuye al sostenimiento de la actividad agrícola en la región, donde la disponibilidad de recursos puede ser limitada.

La cantidad de radiación solar que recibe un punto específico de la superficie terrestre es un factor crucial en la producción de forraje (Punia et al., 2020; Villareal González et al., 2014). La eficiencia con la que esta energía solar se convierte en forraje y, posteriormente, en producto animal, depende en gran medida del manejo implementado en el sistema agrícola. Es importante destacar que ningún método de

conservación de forrajes puede mejorar la calidad intrínseca del alimento; sin embargo, ciertos beneficios pueden observarse en términos de la palatabilidad y consumo de materia seca, como ocurre con los productos henificados.

Entre los métodos reconocidos para la conservación de forrajes, se destacan principalmente el ensilaje y la henificación, que se basan en los principios de acidificación y deshidratación, respectivamente (Osorio-Giraldo et al., 2024; Rodríguez & Herrera, 2021). Ambos métodos son accesibles para diferentes tipos de explotaciones agrícolas, y la elección entre uno u otro depende de varios factores, incluyendo las condiciones climáticas, las tradiciones culturales, los cultivos forrajeros disponibles, el conocimiento técnico, la infraestructura, la maquinaria y el tipo de ganado. La decisión correcta sobre el método de conservación puede significar una diferencia significativa en la eficiencia del sistema de producción y en la calidad del forraje disponible para el ganado.

Los secadores construidos pueden ser clasificados como de tipo indirecto respecto a la incidencia del sol sobre el producto, de flujo forzado, respecto a la circulación del aire y de escala semiindustrial si se considera la capacidad de carga de la cámara y la velocidad de secado (Corvalan et al., 1990; Mujumdar & Menon, 2020). Las tecnologías utilizadas en el diseño y la construcción están ampliamente difundidas y corresponde a los contenidos de la teoría del secado solar, colectores solares de aire y sistema de circulación de aire (ASHRAE, 1986; Duffie & Beckman, 2013; Rabl, 1985). Así que con cualquier método de cosecha de alfalfa, el clima es un factor importante ya que afecta la cosecha y la calidad del forraje, y es necesario considerarlo al momento de programar el manejo (Buckmaster et al., 1990).

El presente estudio aplica la técnica de deshidratación artificial utilizando un techo solar activo mediante circulación forzada; para lo anterior se programan las condiciones de secado como la temperatura y densidad de hilerado en el sistema de control automático. El proyecto es implementado en el rancho Las Palmas, Tlahuelilpan, localizado en el municipio de Mixquiahuala de Juárez Hidalgo; en la Figura 1 se muestra el mapa de irradiación solar de la plataforma Global Solar Atlas, donde se observa que existen óptimas condiciones de irradiación en la región, estimándose en 1800 kWh/m<sup>2</sup> (SolarGIS, 2024).

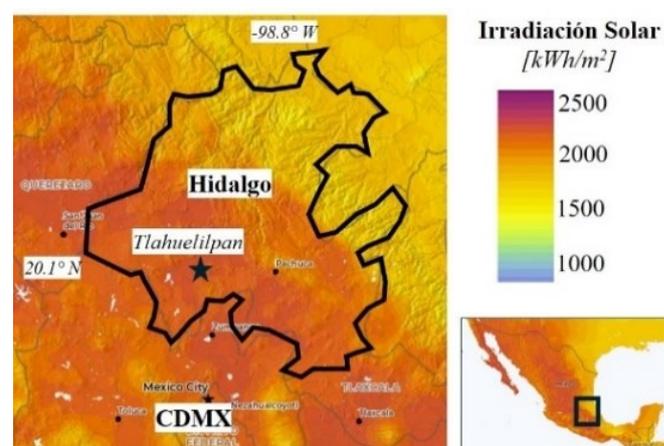


Figura 1: Localización del proyecto sobre mapa de radiación solar [Global Solar Atlas, 2024].

La estructura del trabajo se divide en este primer apartado introductorio, para después explicar el procedimiento y metodología seguidos para el estudio; después se presentan la discusión y las conclusiones del trabajo. Se finaliza dando algunas recomendaciones pertinentes de acuerdo a los resultados obtenidos.

## 2. Procedimiento

Para lograr un control preciso y eficiente en el proceso de secado, se implementó un sistema de control automático basado en Arduino, que permite regular y monitorear las condiciones ambientales en el interior del prototipo, facilitando la obtención de un secado uniforme y óptimo a condiciones de prueba de laboratorio, permitiendo ajustes en tiempo real en la variación de la temperatura y densidad de hilerado.

El sistema aprovecha la energía solar para calentar el aire, lo cual facilita la deshidratación de la alfalfa al acelerar la evaporación del agua contenida en el forraje. Estas pruebas permitieron identificar las combinaciones óptimas de densidad y temperatura que maximizaron la eficiencia del proceso de secado, proporcionando datos cruciales para el desarrollo de sistemas de deshidratación más eficientes y económicamente viables para la producción de alfalfa.

### 2.1 Materiales y Métodos

Para llevar a cabo los experimentos, se utilizó un prototipo de 120 x 90 x 100 cm como cámara de secado artificial (ver Figura 2), se experimentó con condiciones controladas en laboratorio a temperaturas de 20, 30 y 40°C, a tres diferentes densidades de hilerado de 2, 3 y 4 kg/m<sup>2</sup>, así como ventilación forzada en el techo solar activo, con el propósito de determinar la tasa de secado más óptimo.



Figura 2: Estructura del prototipo de la cámara de secado.

A temperatura media 19.56 °C del aire y velocidad media del viento en el mes de 9.94 km/h, ingresa al colector

impulsado por dos ventiladores de 70 m<sup>3</sup>/h a 9W que recorre la cámara del techo solar activo cubierto por policarbonato con una emisividad alrededor de 0.8, emitiendo toda la radiación térmica que recibe a la cámara de secado, donde se indica la dirección y magnitud de la velocidad de flujo a través de mapa de vectores en tercera dimensión (ver Figura 3). Desde el punto de inyección en los ventiladores, el aire se dispersa en la cámara de intercambio de calor, siendo expuesto a la temperatura en el panel superior, y es concentrado en los tubos donde se incrementa la velocidad de aire caliente.

El aire caliente que ingresa a la cámara de secado con una emisividad direccional espectral en su estructura a través de tuberías de PVC de 5.08 cm de diámetro y recubierta con papel aluminio con capacidad calorífica de 870 J/gK a una velocidad de 0.5 m/s hasta la base de la cámara de secado, previamente tratado con un filtro electrostático pasivo. Para disminuir las pérdidas térmicas y mejorar el área de colección calorífica se proyecta un comportamiento de la temperatura de trabajo en función de la distancia que recorre el aire caliente dentro del techo solar activo.

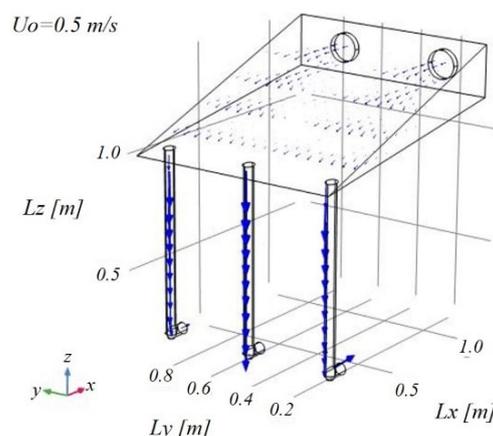


Figura 3: Campo vectorial de velocidad de flujo en el colector, mostrando el flujo de aire forzado desde la cámara de intercambio de calor a la cámara de secado a través de tuberías.

La instrumentación aplicada a la cámara de secado artificial, muestra un sistema de control de lazo cerrado, con el propósito de parametrizar la tasa de secado a temperaturas de 20 a 40°C y densidades de forraje de 0.5 a 4 Kg/m<sup>2</sup> (ver Figura 4).

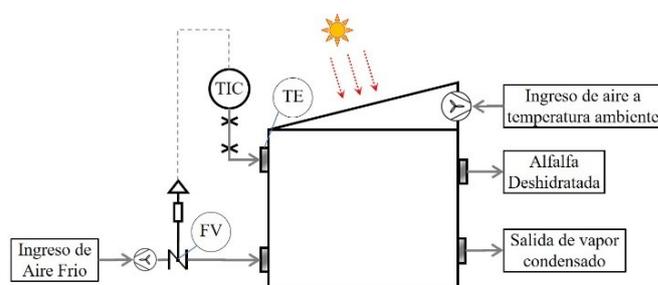


Figura 4: Sistema de control automático, mostrando la instrumentación utilizada en la cámara de secado artificial.

Se utilizó como elemento primario electrónico tipo NTC (Coeficiente de temperatura negativo) para monitorear la temperatura y humedad relativa dentro de la cámara de secado, el cual retroalimenta a la programación del Arduino quien

regula la velocidad de una bandeja rotativa con un motorreductor tipo gusano de 12V ajustable de 40Kg-cm a 2.5 rpm donde se coloca el hilerado (ver Figura 5).

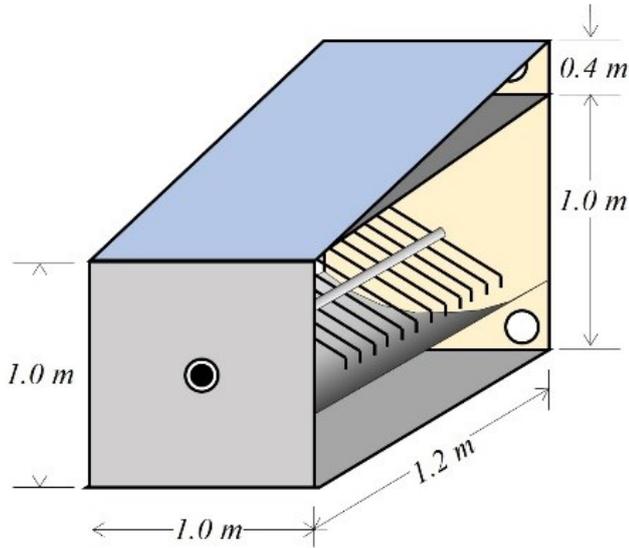


Figura 5: Bandeja (parrilla) rotativa de secado.

## 2.2 Simulación numérica

La simulación numérica de la henificadora se realiza en la plataforma COMSOL Multiphysics® (2024), que utilizan las ecuaciones acopladas de transporte de masa en modo Flujo Turbulento y de transferencia de calor ((1) y (2)).

$$\rho(u \cdot \nabla)u = \nabla \cdot [-pI + K], \quad (1)$$

$$\rho \nabla \cdot u = 0. \quad (2)$$

En las ecuaciones anteriores,  $\rho$  es la densidad del fluido,  $u$  es el vector de velocidad del fluido,  $\nabla$  es el operador nabla, que denota el gradiente,  $(u \cdot \nabla)u$  es el término convectivo que describe la tasa de cambio del momento debido al movimiento del fluido,  $\nabla \cdot$  es la operación de divergencia, que mide el flujo de un vector,  $-pI$  es el término de presión, donde  $p$  es la presión del fluido e  $I$  es la matriz identidad, y  $K$  es el tensor de esfuerzos viscosos, que incluye los efectos de la viscosidad del fluido. (2) es la ecuación de continuidad, que asegura la conservación de la masa en un flujo incomprensible. En otras palabras, esta ecuación indica que la cantidad de fluido que entra en un volumen de control es igual a la cantidad de fluido que sale, garantizando que no hay acumulación o pérdida de masa en el sistema.

Las ecuaciones de transferencia de calor se representan en (3) y (4).

$$\rho C_p u \cdot \nabla T + \nabla \cdot q = Q + Q_p + Q_{VD}, \quad (3)$$

$$q = -k \nabla T. \quad (4)$$

En (3)  $\rho$  es la densidad del fluido,  $C_p$  es la capacidad calorífica específica a presión constante,  $u$  es el vector de velocidad del fluido,  $\nabla$  es el operador nabla, que denota el gradiente,  $T$  es la temperatura del fluido,  $q$  es el flujo de calor por conducción,  $Q$  es el término de fuente de calor volumétrica (energía térmica añadida por unidad de volumen),  $Q_p$  es el

calor generado por procesos de producción internos, y  $Q_{VD}$  es el calor generado por disipación viscosa. Esta ecuación expresa el balance de energía en un fluido en movimiento. El primer término  $\rho C_p u \cdot \nabla T$  representa la advección del calor, que es el transporte de energía térmica debido al movimiento del fluido. El segundo término  $\nabla \cdot q$  representa la divergencia del flujo de calor por conducción. Los términos  $Q$ ,  $Q_p$  y  $Q_{VD}$  representan diferentes fuentes de calor en el sistema.

(4) es la ley de Fourier de conducción térmica, donde  $q$  es el flujo de calor por conducción,  $k$  es la conductividad térmica del material, y  $\nabla T$  es el gradiente de temperatura. La ley de Fourier establece que el flujo de calor por conducción es proporcional al gradiente negativo de la temperatura. Esto significa que el calor se mueve desde las regiones de mayor temperatura hacia las regiones de menor temperatura, y la velocidad de este flujo está determinada por la conductividad térmica del material.

En conjunto, estas ecuaciones describen cómo el calor se transporta dentro de un fluido. La ecuación de la energía tiene en cuenta tanto la advección (movimiento del fluido) como la conducción (transferencia de calor debido a diferencias de temperatura) y las diferentes fuentes de calor dentro del sistema. La ley de Fourier proporciona la relación específica para el flujo de calor por conducción. En el contexto de la henificadora, estas ecuaciones modelan el flujo de aire a través de la cámara de transferencia de calor, y cuantifican la temperatura a la cual son inyectados en la cámara de secado, de acuerdo con la velocidad del aire en el punto de inyección.

Las condiciones iniciales del sistema son 1 atmosfera y 24°C. La radiación solar promedio de 500 W/m<sup>2</sup> se aplica en el área superior, asumiendo un promedio a lo largo del día ajustado por pérdidas de energía a la atmosfera, transferencia de calor entre los componentes físicos, usando como referencia la radiación de 1000 W/m<sup>2</sup> en el cenit en condiciones ideales. Las condiciones de frontera es aislación térmica y flujo nulo de masa en todas las paredes externas del sistema. El aire se inyecta a través de dos ventiladores en la parte superior con tres velocidades modeladas, 0.5, 0.75 y 1.0 m/s a una temperatura ambiente de 24°C. El flujo de aire inyectado se traslada a través de los tubos para dirigir el aire caliente hacia la cámara de secado.

## 3. Resultados

Para determinar la relación entre las variables de temperatura, densidad de hilerado se utilizó una metodología de simulación de correlación, (ver Tabla 1) y (ver Figura 6).

Tabla 1: Mediciones de la temperatura y la densidad de hilerado.

Fecha [dd-mm-aa]	Temperatura [°C]	Densidad [kg/m <sup>3</sup> ]
15-Ene-24	40	4.00
16-Ene-24	38	3.64
17-Ene-24	36	3.28
18-Ene-24	34	3.00
19-Ene-24	32	2.26
20-Ene-24	30	2.00
21-Ene-24	28	1.84
22-Ene-24	26	1.48
23-Ene-24	24	1.12
24-Ene-24	20	1.00

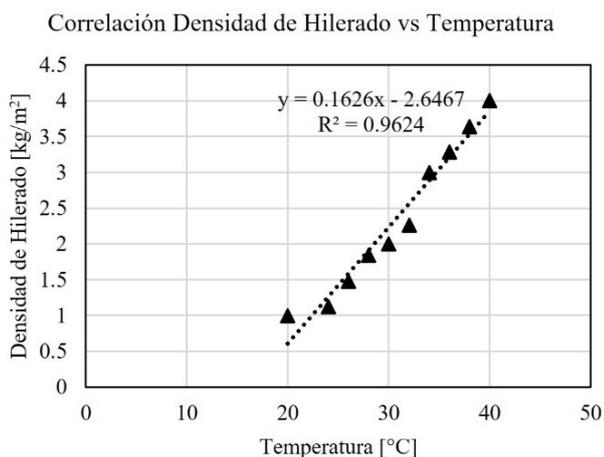


Figura 6: Correlación lineal entre la temperatura y la densidad de hilado.

de baja temperatura donde ocurre un enfriamiento por la acción del flujo de aire de los ventiladores. La temperatura en los tubos de conducción hasta un rango de 40-70 °C, de acuerdo a la velocidad de flujo.

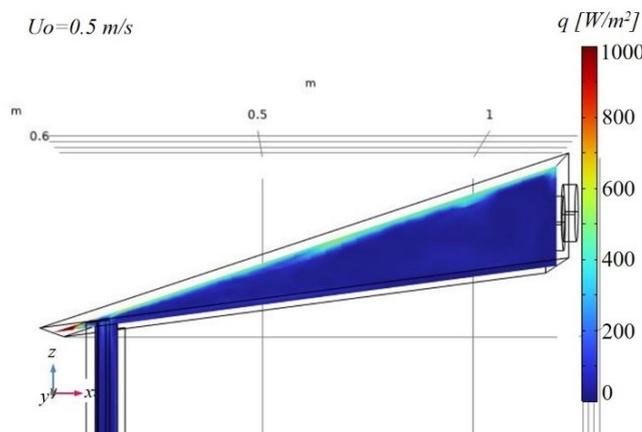


Figura 7: Flujo de calor conductivo desde el plano superior donde se recibe la incidencia de rayos solares.

Los resultados obtenidos determinan una correlación lineal, y un error estadístico de  $R^2=0.96$  y con pendiente positiva, es decir a mayor temperatura, mayor es la densidad en kg/m<sup>2</sup>, satisfaciendo la hipótesis planteada.

El enfoque en el uso de energía solar no solo disminuye los costos operativos, sino que también contribuye a una práctica agrícola más sostenible y respetuosa con el medio ambiente.

Caracterizando el proceso a través de una cámara de deshidratación y utilizando irradiación solar para elevar la temperatura del aire circulante, se pretende reducir costos de operación

Los resultados obtenidos con este método innovador de deshidratación se utilizaron para la producción de pellets en la Cooperativa Rancho Las Palmas, ubicada en Tlahuelilpan, Hidalgo. Este proceso de transformación resultó en un producto final de alta calidad, más fácil de manejar y almacenar, ofreciendo una alternativa práctica y económica para los agricultores locales. La capacidad de convertir alfalfa fresca en pellets compactos y nutritivos representa un avance significativo en la optimización de recursos y métodos de producción agrícola, con potencial de aplicación en otras regiones y cultivos, no sólo para la alfalfa, sino de todos aquellos frutos secos para el consumo humano.

Respecto a las simulaciones realizadas, en la Figura 7 se muestra la distribución del flujo conductivo de calor desde la incidencia solar en el plano superior determinado en W/m<sup>2</sup>. Debido al flujo de aire, el flujo de calor se limita a una capa delgada de aproximadamente 3 cm, que es la zona donde ocurre el máximo intercambio de calor. La magnitud del flujo conductivo se disipa al interior de la cámara de intercambio de calor.

La distribución de la temperatura resultante del modelo acoplado de transporte convectivo de fluidos y transferencia de calor se muestra en las Figuras 8 y 9, correspondientes a las vistas posterior-inferior y anterior-superior respectivamente, del bloque de intercambio de calor. La entrada de aire en los ventiladores se identifica de color azul correspondiente a la temperatura ambiente a 20 °C; conforme el aire se distribuye dentro de la cámara y entra en contacto con el panel de radiación solar, ocurre el fenómeno de transferencia de calor, elevando la temperatura. En la Figura 6 se observa en primer plano la superficie del techo de la henificadora, que es la que recibe la radiación solar. En este plano se identifican regiones

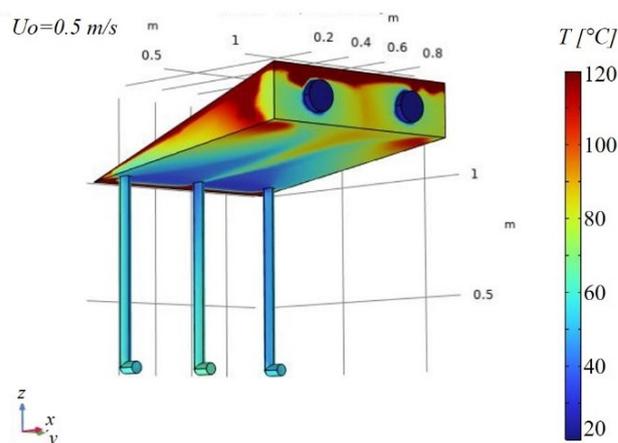


Figura 8: Distribución de Temperatura, vista inferior-posterior de la cámara de intercambio de calor. Se observa el flujo turbulento y las variaciones en temperatura que ocurren durante el calentamiento del aire.

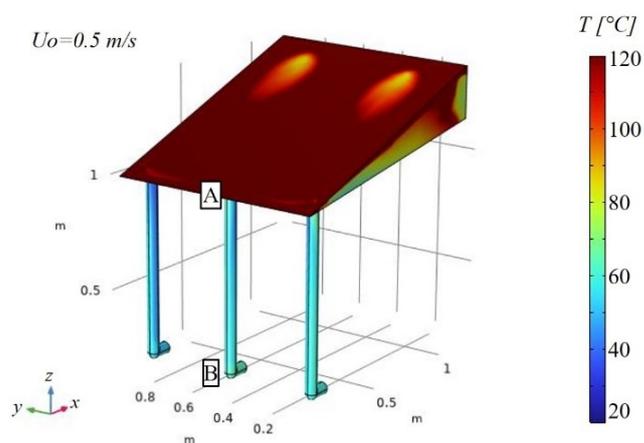


Figura 9: Distribución de temperatura, vista superior-anterior, mostrando la distribución de temperatura en el techo solar a la cámara de secado. La sección A-B es la longitud a lo largo de los tubos de conducción.

El modelo de simulación numérica se utilizó para determinar la correlación entre la velocidad de flujo y la temperatura a la salida del tubo, que a su vez es la temperatura de entrada a la cámara de secado.

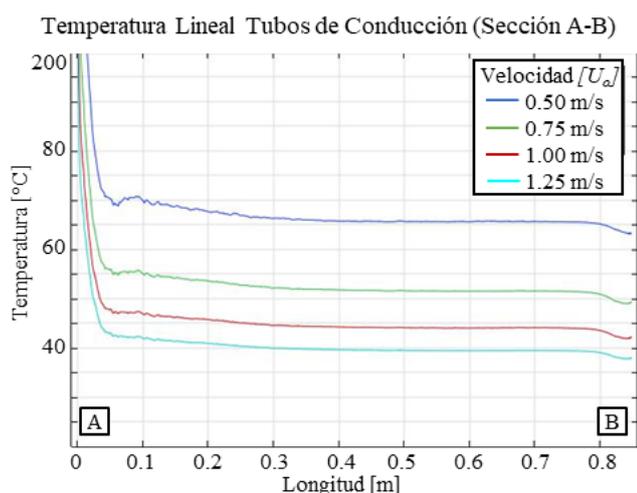


Figura 10. Comportamiento de la temperatura de trabajo vs velocidad de secado a lo largo de la sección A-B señalada en la Fig. 9.

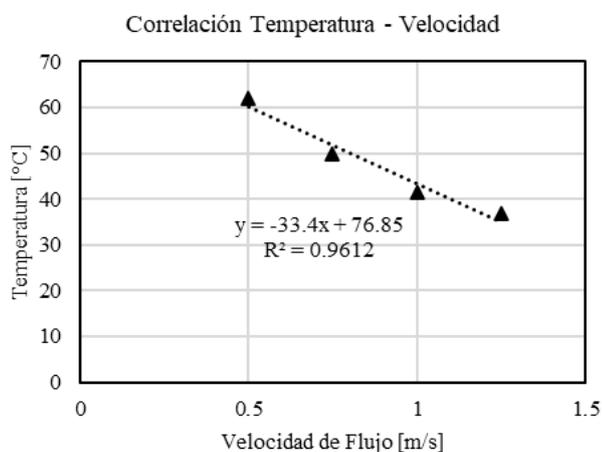


Figura 11. Correlación lineal entre la velocidad de flujo controlada por los ventiladores y la temperatura al final de los tubos de conducción.

La Figura 11 indica la variación de temperatura a lo largo del tubo de conducción de aire caliente, correspondiente al segmento A-B en el esquema. En el punto A, se tiene la admisión de aire caliente posterior al intercambio de calor por la incidencia solar, donde el modelo predice temperaturas de hasta 100 °C cuando se tiene incidencia de 500 W/m<sup>2</sup>. Las iteraciones realizadas con velocidades de flujo de 0.25, 0.5, 0.75, 1.0 y 1.25 m/s en los ventiladores de entrada de aire, producen diferentes perfiles de temperatura, que son determinantes para regular la temperatura promedio al final del tubo; para la velocidad de 0.5 m/s se estima una temperatura de 63.5 °C, mientras que la velocidad de 1.0 m/s predice una temperatura de 42.0 °C. La variación en la velocidad de flujo representa entonces un mecanismo de control de lazo cerrado para el secado de diferentes productos, que puede ser regulado por la frecuencia en los ventiladores de entrada de aire a través de la programación del controlador en el sistema.

#### 4. Discusión

La henificación de alfalfa con energía solar indirecta en Tlahuelilpan, Hidalgo, ofrece significativos beneficios, especialmente cuando se analizan a través de simulaciones

numéricas. Estas simulaciones han demostrado que el uso de energía solar para el secado de alfalfa puede reducir considerablemente el tiempo necesario para alcanzar el contenido de humedad óptimo. En comparación con los métodos tradicionales de secado, que pueden ser impredecibles debido a las variaciones climáticas, el uso de energía solar indirecta proporciona un control más preciso del proceso, asegurando un secado uniforme y eficiente. Esto no solo mejora la calidad del forraje, sino que también reduce las pérdidas postcosecha.

Las simulaciones numéricas también han resaltado los beneficios económicos de este método. Al utilizar energía solar, los costos asociados con el secado de alfalfa se reducen notablemente, ya que se disminuye la dependencia de combustibles fósiles y la maquinaria pesada. Los estudios han demostrado que los agricultores pueden ahorrar hasta un 40% en costos de energía, lo que se traduce en un aumento significativo en la rentabilidad (Bolin et al., 1982; Pirasteh et al., 2014). Además, estos ahorros permiten que los recursos económicos se destinen a otras áreas importantes de la producción agrícola, mejorando la sostenibilidad y la capacidad de inversión en tecnologías innovadoras.

Finalmente, las simulaciones numéricas han mostrado que la henificación de alfalfa con energía solar indirecta tiene un impacto positivo en la sostenibilidad ambiental de la zona agrícola del Valle del Mezquital. Al reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y la huella de carbono de las operaciones agrícolas, se contribuye a la mitigación del cambio climático y a la protección del medio ambiente local. Estos resultados subrayan la viabilidad de implementar tecnologías de energía renovable en la agricultura, promoviendo prácticas más sostenibles y posicionando al Valle del Mezquital como un ejemplo a seguir en el uso de energías limpias en el sector agrícola.

#### 5. Recomendaciones

Es fundamental que la cámara de secado esté construida con materiales aislantes térmicos adecuados para minimizar las pérdidas de calor y mejorar la eficiencia del proceso.

Ajustar la tasa de secado según las dimensiones del techo solar activo, permitiendo así maximizar la eficiencia energética y el rendimiento del sistema de deshidratación.

Considerar la implementación del sistema para deshidratar otros productos con potencial en el mercado local, como frutos secos, semillas y polen de miel, ampliando así las oportunidades comerciales en la región.

#### 6. Conclusiones

Este estudio ha demostrado que la automatización del proceso de deshidratación de alfalfa utilizando un sistema de control electrónico con energía solar indirecta es una solución eficaz para mejorar tanto la calidad nutricional del heno como la eficiencia del secado. A través de simulaciones numéricas y experimentos en laboratorio, se estableció que un flujo de aire en la henificadora de 1.0 m/s y una temperatura de 42.0°C son las condiciones óptimas para lograr un secado rápido y uniforme. La aplicación de energía solar, aprovechando la irradiación estimada en 1800 kWh/m<sup>2</sup> en el Valle del Mezquital, Hidalgo, permitió obtener un heno de alta calidad,

mejorando así la alimentación del ganado con un forraje más rico en nutrientes, lo cual beneficia la producción ganadera y optimiza el uso de recursos naturales en la región.

El uso de energía solar en este proceso contribuye significativamente al ahorro energético, disminuyendo la dependencia de combustibles fósiles, maquinaria costosa y gastos excesivos de energía eléctrica. Para los agricultores y ganaderos, esto representa una reducción en los costos operativos, a la vez que promueve una práctica agrícola más sostenible. La eficiencia energética alcanzada por el sistema no solo asegura un secado más rápido, sino que también incrementa la calidad del heno producido, lo que impacta directamente en la productividad y rentabilidad del sector agrícola y ganadero.

## Agradecimientos

Los autores agradecen la colaboración del Rancho Las Palmas en Tlahuelilpan, Hidalgo, por el apoyo en la realización y mediciones de las pruebas experimentales.

## Referencias

- AB, C. (2024). COMSOL Multiphysics® v. 6.2. [www.comsol.com](http://www.comsol.com)
- ASHRAE. (1986). Method of testing to determine the thermal performance of solar collectors. ASHRAE-93-1986/.
- Bolin, H. R., Salunkhe, D. K., & Lund, D. (1982). Food dehydration by solar energy. *Critical Reviews in Food Science & Nutrition*, 16(4), 327–354.
- Buckmaster, D. R., Rotz, C. A., & Black, J. R. (1990). Value of alfalfa losses on dairy farms. *Transactions of the ASAE*, 33(2), 351–360.
- Corvalan, R., Román Latorre, R., & Saravia, L. (1990). Ingeniería del secado solar . In *Subprograma VI nuevas fuentes y conservación de la energía. Quinto Centenario*.
- Duffie, J. A., & Beckman, W. A. (2013). Solar Engineering of Thermal Processes. In *Solar Engineering of Thermal Processes*. John Wiley & Sons, Inc. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/9781118671603.fmatter>
- Duthil, J. (1980). *Producción de Forrajes* (3rd ed.). Mundi-Prensa Libros, S.A.
- García Guerrero, M., & Losada Villasante, M. (1983). Conversión biológica de la energía solar. *Mundo Científico*, 26 (3), 616-630.
- INEGI. (2022). *Economía y Sectores Productivos*. <https://www.inegi.org.mx/temas/agricultura/>
- Monteith, J. L. (1972). Solar Radiation and Productivity in Tropical Ecosystems. *Journal of Applied Ecology*, 9(3), 747–766. <https://doi.org/10.2307/2401901>
- Mujumdar, A. S., & Menon, A. S. (2020). Drying of solids: principles, classification, and selection of dryers. In *Handbook of industrial drying* (pp. 1–39). CRC Press.
- Navarro García, G., & Navarro García, S. (2023). *Fertilizantes*. Química y Acción (2nd ed.). Ediciones MundiPrensa.
- Nelson, C. J., & Moser, L. E. (1994). Plant Factors Affecting Forage Quality. In *Forage Quality, Evaluation, and Utilization* (pp. 115–154). <https://doi.org/https://doi.org/10.2134/1994.foragequality.c3>
- Osorio-Giraldo, J. F., Calderón-Bedoya, V., López-de-Mesa, O., & Restrepo-Berrio, D. (2024). Importancia de la disponibilidad de alternativas forrajeras para la alimentación de ganado bovino. *Revista Politécnica*, 20(39), 18–30.
- Pirasteh, G., Saidur, R., Rahman, S. M. A., & Rahim, N. A. (2014). A review on development of solar drying applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 31, 133–148.
- Punía, H., Tokas, J., Malik, A., Satpal, Rani, A., Gupta, P., Kumari, A., Mor, V. S., Bhuker, A., & Kumar, S. (2020). Solar Radiation and Nitrogen Use Efficiency for Sustainable Agriculture BT - Resources Use Efficiency in Agriculture (S. Kumar, R. S. Meena, & M. K. Jhariya (eds.); pp. 177–212). Springer Singapore. [https://doi.org/10.1007/978-981-15-6953-1\\_6](https://doi.org/10.1007/978-981-15-6953-1_6)
- Rabl, A. (1985). *Active solar collectors and their applications*. Oxford University Press, USA.
- Rodríguez, M. G., & Herrera, V. H. (2021). Análisis comparativo de métodos de conservación de forraje y su impacto en la producción de leche bovina en el Trópico Alto. *Ciencias Agropecuarias*, 7(1 SE-ARTÍCULO DE REVISIÓN), 27–49. <https://doi.org/10.36436/24223484.401>
- SADR-Mexico. (2023). Promueve Agricultura siembra de leguminosas forrajeras para mejorar productividad del ganado en el trópico de México. Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. <https://www.gob.mx/agricultura/prensa/promueve-agricultura-siembra-de-leguminosas-forrajeras-para-mejorar-productividad-del-ganado-en-el-tropico-de-mexico>
- SIAP-Mexico. (2024). La ganadería mexicana en cifras. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. <https://www.gob.mx/siap/es/articulos/la-ganaderia-mexicana-en-cifras?idiom=es>
- SolarGIS. (2024). *Global Solar Atlas*. <https://globalsolaratlas.info/map?c=21.230502,-100.343628,8>
- Szeicz, G. (1974). Solar Radiation for Plant Growth. *Journal of Applied Ecology*, 11(2), 617–636. <https://doi.org/10.2307/2402214>
- Villareal González, J. A., Hernández Garay, A., Martínez Hernández, P. A., Guerrero Rodríguez, J. de D., & Velasco Zebadúa, M. E. (2014). Rendimiento y calidad de forraje del pasto ovilla (*Dactylis glomerata* L.) al variar la frecuencia e intensidad de pastoreo. *Revista Mexicana de Ciencias Pecuarias*, 5(2), 231–245.