

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO  
DEPARTAMENTO DE IRRIGACIÓN E INGENIERÍA MECÁNICA AGRÍCOLA  
POSGRADO EN INGENIERÍA AGRÍCOLA Y USO INTEGRAL DEL AGUA

MODELOS NEURODIFUSOS DEL MICROCLIMA DE UN SECADOR  
SOLAR TIPO INVERNADERO PARA DESHIDRATADO DE ESTEVIA  
(*Stevia rebaudiana*, L.)

TESIS

QUE COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRO EN  
INGENIERÍA AGRÍCOLA Y USO INTEGRAL DEL AGUA, PRESENTA:

ALEJANDRO GUERRERO SANTANA

BAJO LA SUPERVISIÓN DE: IRINEO LÓPEZ CRUZ, Ph.D.



Chapingo, Estado de México, Enero 2019.

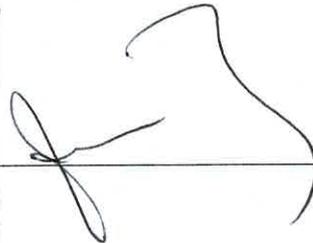
---

**MODELOS NEURODIFUSOS DEL MICROCLIMA DE UN SECADOR  
SOLAR TIPO INVERNADERO PARA DESHIDRATADO DE  
ESTEVIA (*Stevia rebaudiana*, L.)**

Tesis realizada por **Alejandro Guerrero Santana** bajo la supervisión del Comité Asesor indicado, aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

**MAESTRO EN INGENIERÍA AGRÍCOLA Y USO INTEGRAL DEL  
AGUA**

Director: Irineo L. López Cruz, Ph.D.:



Asesor: Raquel Salazar Moreno, Ph.D.:



Asesor: Efrén Fitz Rodríguez, Ph.D.:



# Índice general

Lista de figuras	v
Lista de cuadros	vii
Dedicatoria	vii
Agradecimientos	ix
Datos bibliográficos	x
Resumen	xi
Abstract	xii
<b>1. Introducción General</b>	<b>1</b>
1.1. Hipótesis . . . . .	4
1.2. Objetivo General . . . . .	5
1.3. Objetivos Particulares . . . . .	5
1.4. Estructura de la tesis . . . . .	5
<b>Bibliografía</b>	<b>5</b>
<b>2. Revisión de literatura</b>	<b>8</b>
2.1. Sistemas de secado solar . . . . .	8
2.1.1. Modo directo . . . . .	9

2.1.2. Modo indirecto . . . . .	13
2.1.3. Modo mixto . . . . .	16
2.2. Secadores solares con ventilación natural . . . . .	19
2.3. Secadores solares con ventilación forzada . . . . .	20
2.4. Modelación matemática de secadores solares . . . . .	21
2.4.1. Visión general de los sistemas neurodifusos . . . . .	23
2.4.2. Sistemas neurodifusos . . . . .	26
2.4.3. Clasificación de los sistemas neurodifusos . . . . .	27
2.4.4. Arquitectura ANFIS (Adaptive Neuro Fuzzy Inference System)	29
2.4.5. Desarrollo, prueba y consideraciones de ANFIS . . . . .	32
2.4.6. Trabajos previos sobre ANFIS . . . . .	35
2.5. Secado de hojas . . . . .	35
2.5.1. Factores que influyen en el secado de hojas . . . . .	38
2.5.2. Secado de estevia . . . . .	42
<b>Bibliografía</b>	<b>43</b>
<b>3. Deshidratado de estevia (<i>Stevia rebaudiana, L.</i>) en un secador solar tipo invernadero</b>	<b>53</b>
3.1. Introducción . . . . .	54
3.2. Materiales y métodos . . . . .	56
3.2.1. Descripción del secador solar tipo invernadero (SSSTI) . . . . .	56
3.2.2. Modelos empíricos del secado de estevia . . . . .	59
3.3. Resultados y discusión . . . . .	60
3.4. Conclusiones . . . . .	63
<b>Bibliografía</b>	<b>64</b>
<b>4. Prediction of air temperature and relative humidity in a solar greenhouse dryer using neuro-fuzzy models</b>	<b>68</b>
4.1. Introduction . . . . .	69
4.2. Materials and Methods . . . . .	71

4.2.1. Description of the SGDS . . . . .	71
4.2.2. Data acquisition . . . . .	72
4.2.3. Adaptive Neuro Fuzzy Inference System (ANFIS) . . . . .	73
4.2.4. Procedure . . . . .	76
4.2.5. Fitting measures . . . . .	76
4.3. Results . . . . .	77
4.3.1. Measured data . . . . .	77
4.3.2. Models architectures . . . . .	78
4.3.3. Evaluation and fitting quality . . . . .	80
4.4. Conclusion . . . . .	82
<b>Bibliography</b>	<b>83</b>

# Índice de figuras

2.1. Clasificación de los secadores solares (Janjai y Bala, 2012). . . . .	9
2.2. Secador solar directo tipo caja (Janjai y Bala, 2012). . . . .	10
2.3. Secador solar tipo invernadero (Shaarma et al., 1995). . . . .	13
2.4. Secador solar indirecto de convección natural (Janjai y Bala, 2012). . .	14
2.5. Arquitectura ANFIS (Chauhana et al., 2015). . . . .	30
2.6. Clasificación de hojas (Babu et al., 2018). . . . .	36
3.1. Sistema secador solar tipo invernadero de forma parabólica y cubierta de policarbonato ubicado en Chapingo, México. . . . .	57
3.2. Deshidratado de estevia en el SSSTI . . . . .	58
3.3. Dimensiones del SSSTI y puntos de medición de temperatura y hu- medad relativa a la altura del producto. . . . .	59
3.4. Gráfica de cajas para la curva de secado de cada experimento. . . . .	61
3.5. Variables climáticas y microclimáticas registradas. (a) Radiación so- lar, (b) Temperatura exterior, (c) Humedad relativa exterior, (d) Ve- locidad del viento exterior, (e) Temperatura interior y (f) humedad relativa interior. . . . .	62
3.6. Razones de humedad del producto y sus dos mejores modelos donde (a) y (b) corresponden al experimento 1, (c) y (d) al experimento 2, (e) y (f) al experimento 3 y, (g) y (h) al experimento 4. . . . .	64
3.7. Calidad visual de estevia deshidratada (izquierda) en el SSSTI; (de- recha) en invernadero con cubierta de plástico y ventilación natural durante época de lluvia. . . . .	65

---

4.1. SGDS located in Chapingo Univeristy, Mexico. . . . .	71
4.2. Dimensions of the SGDS and measurement points of air temperature and relative humidity at the product height. . . . .	72
4.3. ANFIS architecture (Jang, 1993). . . . .	73
4.4. Fuzzy reasoning (Jang, 1993; López-Cruz y Hernández-Larrogoiti, 2010a). . . . .	74
4.5. Time series (TS) (Río y Sanz-Molina, 2007). . . . .	75
4.6. Measured data: a) Radiation; b) Outside air temperature; c) Outside relative humidity; d) Wind speed; e) Inside air temperature; f) Inside relative humidity. . . . .	78
4.7. ANFIS architecture of model 1. . . . .	79
4.8. ANFIS architecture of model 2. . . . .	79
4.9. ANFIS architecture of model 3. . . . .	80
4.10. ANFIS architecture of model 4. . . . .	80
4.11. Measured data vs ANFIS model for: a) Temperature (model 1); b) Re- lative humidity (model 2); c) Temperature (model 3) and d) Relative humidity (model 4). . . . .	81
4.12. Scatter plot of measured data vs ANFIS predicted for: a) Temperature of model 1; b) Relative humidity of model 2; c) Temperature of model 3 and d) Relative humidity of model 4. . . . .	82

# Índice de cuadros

3.1. Modelos de curva de secado de capa delgada comúnmente utilizados (Sacilik et al., 2006) . . . . .	60
3.2. Coeficientes y estadísticas de los mejores modelos para la razón de humedad. . . . .	63
4.1. Max and min values for each variable. . . . .	77
4.2. Statistical values as measures of performance of the models of temperature obtained with grid partition and subtractive clustering. . . . .	81

# Dedicatoria

*A mi familia, a Gleira.*

# Agradecimientos

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por la beca de manutención.

A la Universidad Autónoma Chapingo (UACH) y al Posgrado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua (IAUIA) por esta gran experiencia.

Al Dr. Agustín, Orbelín, Rabelo, Citlali y Ambrocio por el apoyo y consejos durante las fases experimentales de este trabajo.

A los miembros de mi comité asesor por su tiempo, paciencia y ser personas ejemplares para mi.

# Datos biográficos

Alejandro nace (Noviembre 4, 1990) en Lo Arado, Jalisco. Es aquí donde recibe su educación básica y adquiere el interés en los temas relacionados con las ciencias naturales.

En 2006 ingresa a la Preparatoria Agrícola de la UACH. En 2010 ingresa al Departamento de Ingeniería Mecánica Agrícola donde tiene el primer acercamiento a la investigación gracias a una estancia preprofesional con el grupo de investigación Ingeniería Rural de la Universidad de Almería. Al egresar se desempeña en la industria privada durante dos años.

En 2016 ingresa al Posgrado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua y fortalece el gusto por las ciencias naturales, el conocimiento y el método científico.



---

## RESUMEN

### <sup>1</sup>MODELOS NEURODIFUSOS DEL MICROCLIMA DE UN SECADOR SOLAR TIPO INVERNADERO PARA DESHIDRATADO DE ESTEVIA (*Stevia rebaudiana L.*).

<sup>2</sup>Alejandro Guerrero Santana y <sup>3</sup>Irineo López Cruz

El desarrollo de modelos matemáticos permite aumentar el conocimiento que se tiene sobre un sistema, incluso hacer predicciones sobre su comportamiento. Esto nos ayudan a tomar mejores decisiones sobre su manejo, mejorar el diseño, y/o controlar el sistema. Cuando se trata de sistemas que involucra la transferencia de calor y masa, por lo regular se acude a modelos mecanicistas representados por ecuaciones diferenciales. Dichos modelos involucran entradas y parámetros que en algunas ocasiones son muy difíciles de obtener. Además, dichos modelos necesitan pasar por análisis de incertidumbre y de sensibilidad. Dichos análisis complican el estudio cuando se trabaja con poco tiempo. Una alternativa es utilizar modelos de caja negra, como los neurodifusos. Estos tienen como ventaja que solamente necesitan datos de entrada-salida del sistema que se desea estudiar para poder modelar su comportamiento. En este trabajo se generan modelos neurodifusos de arquitectura ANFIS utilizando el *Neuro-Fuzzy Designer Toolbox* de Matlab. Se realizaron cuatro experimentos de deshidratado con 75 kg de estevia cada uno, donde se midió la temperatura y humedad relativa del aire de secado. La pérdida de peso de la estevia se midió cada 30 minutos con cuatro muestras de 300 g. Los datos climáticos que se registraron fueron la humedad y temperatura del aire, la velocidad del viento y la radiación solar. Con los datos obtenidos se estimaron los coeficientes para modelos de razón de humedad del producto que obtuvieron las estadísticas RMSE y EF de 0.01 a 0.08 y 0.93 a 0.99, respectivamente. Finalmente, se concluyó con modelos neurodifusos ANFIS para la predicción de temperatura y humedad del aire de secado que obtuvieron las estadísticas RMSE de 1.63 a 4.70, MAE de 1.18 a 4.05, EF de 0.86 a 0.98 y r de 0.96 a 0.99, demostrando potencial para futura aplicación al deshidratado solar de productos agrícolas.

**Palabras clave:** predicción, temperatura, humedad relativa, hojas.

---

<sup>1</sup>Tesis de Maestría en Ingeniería, Posgrado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua, Universidad Autónoma Chapingo.

<sup>2</sup>Autor.

<sup>3</sup>Director de tesis.

---

## ABSTRACT

### <sup>1</sup>NEURO-FUZZY MODELS OF THE MICROCLIMATE OF A SOLAR GREENHOUSE DRYER FOR STEVIA (*Stevia rebaudiana L.*) DRYING.

<sup>2</sup>Alejandro Guerrero Santana and <sup>3</sup>Irineo López Cruz.

The development of mathematical models allow us to increase the knowledge we have about a system, even make predictions about its behavior. These help us to make better decisions about its management, improve the design, and/or control the system. When dealing with systems that involve the transfer of heat and mass, we usually go to mechanistic models represented by differential equations. These models involve inputs and parameters that are sometimes very difficult to obtain. In addition, these models need to go through sensitivity and uncertainty analysis. These analysis complicate the study when you work with short time. An alternative is to use black-box models, such as neuro-fuzzy. These have the advantage that they only need input-output data from the system to study in order to model their behavior. In this paper, neuro-fuzzy models with ANFIS architecture are developed using Neuro-Fuzzy Designer Toolbox of Matlab. Four drying experiments were carried out with 75 kg of stevia each one, where the temperature and relative humidity of the drying air was measured. The weight loss of stevia was measured every 30 minutes with four samples of 300 g. The climatic data registered were the humidity and temperature of the air, the speed of the wind and the solar radiation. With the data obtained, the coefficients were estimated for nine thin-layer models that obtained the RMSE and EF statistics from 0.01 to 0.08 and 0.93 to 0.99, respectively. Finally, it was concluded with ANFIS neurofuzzy models for the prediction of temperature and humidity of the drying air obtained by the RMSE statistics from 1.63 to 4.70, MAE from 1.18 to 4.05, EF from 0.86 to 0.98 and r from 0.96 to 0.99, demonstrating potential for future application to the solar drying of agricultural products.

**Key words:** prediction, temperature, relative humidity, leaves.

---

<sup>1</sup>Master's Thesis in Engineering, Postgraduate in Agricultural Engineering and Integral Use of Water, Chapingo University.

<sup>2</sup>Author.

<sup>3</sup>Advisor.

# Capítulo 1

## Introducción General

La pérdida y el desperdicio de alimentos son factores fundamentales en los problemas de hambre, bajos ingresos e inseguridad alimentaria que tienen todos los países en desarrollo. Este problema no solamente afecta la seguridad alimentaria de las personas, también al desarrollo económico de los países y medio ambiente, ya que producir comida que no se consume desperdicia tierra, agua, energía, insumos y mano de obra, además de generar emisiones innecesarias de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). Por esto, la pérdida de alimentos debe minimizarse en cualquier país, independientemente de su nivel de desarrollo económico (FAO, 2012; Gustavsson et al., 2011; Smil, 2004).

El gobierno mexicano, a través la Cruzada Nacional Sin Hambre creó el Grupo de Pérdidas y Mermas de Alimentos que cuantificó la cantidad de alimento que se pierde, concluyendo que se desperdician 16 litros de leche, 3.6 kg de papa, 2.6 kg de cebolla, 3.5 kg de carne de cerdo y 4.2 kg de carne de res por persona cada semana, suficiente para alimentar 7.4 millones de personas al año. Los alimentos más desperdiciados en porcentajes son guayaba (57.73%), leche de vaca (57.14%), mango (54.54%), pescado (54.07%), aguacate (53.97%), plátano (53.76%), nopal (53.26%), arroz (46.87%) y pepino (45.46%) (FAO, 2012).

Las perspectivas sugieren que, para satisfacer las futuras demandas mundiales, la producción de alimentos debe aumentar de manera significativa. No obstante, no

---

parece que se preste atención a las pérdidas existentes en la cadena de suministro de alimentos, que son considerables (Raak et al., 2017).

Para aumentar el acceso a los alimentos, y disminuir su precio para los consumidores, es necesario mejorar la eficiencia de la cadena de suministro de alimentos. Siempre se debe buscar que invertir en la reducción de la merma de alimentos obtenga más beneficios que sus costes (Chabound y Daviron, 2017).

El término Cadena de Suministros de Alimentos (CSA) se refiere al proceso que pasan los productos destinados al consumo humano, desde la cosecha hasta que llegan al consumidor (Chabound y Daviron, 2017; Raak et al., 2017).

La característica principal de los alimentos es su naturaleza perecedera. Debido al contenido de humedad que poseen, se favorecen las condiciones para el crecimiento de hongos, la oxidación, la fermentación, y otros procesos bioquímicos que ocurren de manera natural (Patil y Gawande, 2016).

El deshidratado es uno de los métodos más antiguos para la preservación de alimentos. Su principal objetivo es remover el agua de un producto lo más rápido posible y alcanzar el contenido de humedad final requerido para un almacenamiento seguro (Volskens et al., 1999). Dicho de otra manera, el secado es el proceso de disminución de la humedad de un producto a un valor específico mediante la aplicación de energía térmica (El-Sebaili y Shalaby, 2012).

La energía que se encuentra disponible de forma gratuita en la atmósfera es conocida como energía verde. Una forma renovable de energía. Esta energía puede ser utilizada en varios procesos, por ejemplo, generar energía eléctrica, calefacción, deshidratado, etc. (Prakash et al., 2016).

Cualquier alimento que tenga contenido de humedad alto debe ser consumido antes de que se dañe, por lo tanto, es requerido un proceso de deshidratado para su

---

preservación. En resumen, el secado es una combinación de transferencia de calor y masa (Kumar et al., 2016), es decir, que simultáneamente se debe transmitir energía al alimento para suministrarle el calor requerido y que el agua se desplace a través del alimento y se elimine del mismo (Colina-Irezabal, 2014).

El secado a sol abierto tiene varias desventajas, como el deterioro de los productos debido al polvo, la lluvia, infestaciones, etc. Además, el secado solar a cielo abierto requiere grandes extensiones de terreno y mucho tiempo de secado (Ayensu, 1997). Esto se ha solucionado con el uso de sistemas de secado bajo cubierta, como el Sistema Secador Solar Tipo invernadero (SSSTI) (Garduño, 2017b).

En el presente, la demanda de tecnologías de secado está incrementando principalmente en la industria alimentaria y en la industria dedicada a las plantas medicinales. La estevia (*Stevia rebaudiana*, L.) es una planta de origen sudamericano que se utiliza en ambas industrias (Castillo-Téllez et al., 2018; Prakash et al., 2016; Babu et al., 2018).

Las técnicas de modelado son importantes para la descripción del comportamiento de sistemas. Un experimento puede ser peligroso y, en ocasiones no son factibles debido a la inaccesibilidad de los datos de entrada y de salida. El costo de un experimento puede ser muy elevado. Los tiempos requeridos para la experimentación pueden no estar dentro de las posibilidades del investigador. Los modelos matemáticos son importantes para el diseño de secadores, facilitar su operación, aumentar la calidad de los productos deshidratados y ahorrar energía (Prakash et al., 2016).

Recientemente, se ha estudiado el control del microclima de los secadores solares, Sin embargo, la aplicación de este se basa fuertemente en la disponibilidad de los modelos matemáticos que describen la dinámica del microclima y la pérdida de humedad del producto. El procedimiento para establecer modelos mecanicistas por lo general lleva mucho tiempo y es costoso. En situaciones donde los datos experimentales están disponibles, un modelado basado en base de datos o un modelado de caja

negra, por ejemplo, el modelado neurodifuso, es una alternativa viable al modelado mecanicista (Hernández-Larragoiti, 2009; Tien y Van-Straten, 1998).

Los métodos de secado solar han sido modelados con varias técnicas, entre ellas, Dinámica de Fluidos Computacional (CFD), Redes Neuronales Artificiales (RNA), *Adaptive Neuro Fuzzy Inference System* (ANFIS), Lógica Difusa (FL), Ecuaciones Diferenciales (ED), cinética de secado, etc (Prakash et al., 2016; Bagheri et al., 2015).

El interés por realizar este trabajo fue que las técnicas de modelado ANFIS no han sido explotadas en el ámbito del secado solar, a pesar de su gran capacidad para representar fenómenos físicos como el que se presenta en el deshidratado de alimentos. Los modelos neurodifusos proponen cálculos matemáticos para representar un sistema con base en datos de entrada-salida, haciéndolos una opción cuando se dispone de datos experimentales y se carece de tiempo para estudiar y dominar las leyes físicas que dominan el objeto de estudio (Vieira et al., 2004). ANFIS destaca entre los modelos neurodifusos por ser un sistema híbrido que utiliza un algoritmo de aprendizaje llamado *backpropagation* para determinar los parámetros de las funciones de membresía de entrada y el método de mínimos cuadrados para determinar los parámetros consecuentes. Por lo tanto, ANFIS reúne las cualidades de las técnicas lógica difusa y redes neuronales artificiales, y corrige las desventajas que tienen de manera individual (Vieira et al., 2004).

## 1.1. Hipótesis

El Sistema Secador Solar Tipo Invernadero (SSSTI) puede ser modelado matemáticamente con la teoría neurodifusa y el enfoque de series temporales. Y que dichas representaciones hacen predicciones de la temperatura y la humedad relativa del aire de secado.

### 1.2. Objetivo General

Predecir con modelos neurodifusos de arquitectura ANFIS (*Adaptive Neuro Fuzzy Inference System*) la temperatura y humedad relativa del aire de secado durante el deshidratado de estevia (*Stevia rebaudiana, L.*) en un secador solar tipo invernadero ubicado en Chapingo, México

### 1.3. Objetivos Particulares

- Deshidratar estevia (*Stevia rebaudiana, L.*) en un secador solar tipo invernadero durante cuatro distintos escenarios climáticos.
- Colectar los datos de entrada-salida para entrenar modelos neurodifusos.
- Desarrollar modelos neurodifusos tipo ANFIS con y sin el enfoque de series de tiempo utilizando el *Toolbox Neuro-Fuzzy Designer* de Matlab®.

### 1.4. Estructura de la tesis

La presente comienza en el Capítulo 2 con una revisión de los trabajos sobre modelación neurodifusa. En el Capítulo 3 se realizan cuatro experimentos de secado de estevia (*Stevia rebaudiana, L.*) en distintas condiciones climáticas. Y por último, en el Capítulo 4, se desarrollan los modelos neurodifusos de arquitectura ANFIS para la predicción de temperatura y humedad relativa del aire dentro del secador solar durante el deshidratado de estevia (*Stevia rebaudiana, L.*).

# Bibliografía

- Ayensu, A. (1997). “Dehydration of food crops using a solar dryer with convective heat flow”. En: *Sol Energy* 59, págs. 121-126.
- Babu, A., G. Kumaresan, V. Raj y R. Velraj (2018). “Review of leaf drying: Mechanism and influencing parameters, drying methods, nutrient preservation, and mathematical models”. En: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 90, págs. 536-556.
- Bagheri, N., T. Nazilla y H. Javadikia (2015). “Development and evaluation of an adaptive neuro fuzzy interface models to predict performance of a solar dryer”. En: *Agric Eng Int: CIGR J* 17.2, págs. 112-121.
- Castillo-Téllez, M., I. Pilatowsky-Figueroa, B. Castillo-Téllez, E. C. López-Vidaña y A. López-Ortiz (2018). “Solar drying of Stevia (*Rebaudiana Bertoni*) leaves using direct and indirect technologies”. En: *Sol Energy* 159, págs. 898-907.
- Chabound, G. y B. Daviron (2017). “Food losses and waste: Navigating the inconsistencies”. En: *Global Food Security* 16, págs. 1-7.
- Colina-Irezabal, M. L. (2014). *Deshidratación de alimentos*. México: Trillas.
- El-Sebaei, A. y S. M. Shalaby (2012). “Solar drying of agricultural products: a review”. En: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16, págs. 37-43.
- FAO (2012). *Pérdidas y desperdicio de alimentos en el mundo - Alcance, causas y prevención*. Inf. téc. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Roma.
- Garduño, Á. (2017b). “Construcción, evaluación y modelación matemática de un secador solar tipo invernadero”. Tesis doct. México: Universidad Autónoma Chapingo.

- Gustavsson, J., C. Cederberg, U. Sonesson, R. van Otterdijk y A. Meybeck (2011). *Global food losses and food waste: extent, causes and prevention*. Inf. téc. Food y Agriculture Organization of the United Nations. Roma.
- Hernández-Larragoiti, L. (2009). “Modelos neuro-difusos para temperatura y humedad del aire en invernaderos”. Tesis de maestría. México: Universidad Autónoma Chapingo.
- Kumar, M., S. K. Sansaniwal y P. Khatak (2016). “Progress in solar dryers for drying various commodities”. En: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 55, págs. 346-360.
- Patil, R. y R. Gawande (2016). “A review on solar tunnel greenhouse drying system”. En: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 56, págs. 196-214.
- Prakash, O., V. Laguri, A. Pandey, A. Kumar y A. Kumar (2016). “Review on various modelling techniques for the solar dryers”. En: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 62, págs. 396-417.
- Raak, N., C. Symmank, S. Zahn, J. Aschemann-Witzel y H. Rohm (2017). “Processing and product-related causes for food waste and implications for the food supply chain”. En: *Waste Management* 51, págs. 461-472.
- Smil, V. (2004). “Improving efficiency and reducing waste in our food system”. En: *Environmental Science* 1, págs. 17-26.
- Tien, B. T. y G. Van-Straten (1998). “A Neuro-Fuzzy Approach to Identify Lettuce Growth and Greenhouse Climate”. En: *Artificial Intelligence Review* 12, págs. 71-93.
- Vieira, J., F. Morgado-Dias y A. Mota (2004). “Neuro-Fuzzy Systems: A survey”. En: *WSEAS Transactions on Systems* 3, págs. 414-419.
- Volskens, R. G.J. H., P. G. Out y B. Schulte (1999). *Market opportunities for solar drying*. Inf. téc. Solar thermal, ecofys energy y environment. The Netherlands.

# Capítulo 2

## Revisión de literatura

### 2.1. Sistemas de secado solar

Existe una gran variedad de secadores solares para diferentes regiones tropicales y subtropicales. En términos generales, los secadores solares se clasifican en dos categorías: secadores solares pasivos y activos (Figura 2.1). Los secadores solares pasivos utilizan solamente fuentes de energía verde. Estos se clasifican en tres categorías, que son directos, indirectos o mixtos. Los secadores solares activos utilizan una fuente no renovable como fuente de calor complementaria o como una fuente auxiliar para impulsar ventiladores que hagan circular el aire a través del producto (Janjai y Bala, 2012; Bala, 1998).

Los secadores solares también pueden clasificarse como secadores solares de convección natural y secadores solares de convección forzada. En los secadores solares de convección natural, el flujo de aire generalmente se crea mediante la flotabilidad, mientras que, en los secadores solares de convección forzada, el flujo de aire se obtiene mediante el uso de un ventilador operando por un módulo de electricidad o por combustible fósil (Janjai y Bala, 2012; Kassem et al., 2011).



Figura 2.1: Clasificación de los secadores solares (Janjai y Bala, 2012).

### 2.1.1. Modo directo

Los secadores solares directos se pueden clasificar como secadores solares tipo caja/gabinete, tipo túnel y tipo invernadero. En secadores solares directos, los productos se colocan en la unidad de calefacción que está cubierta con una cubierta transparente. Por lo tanto, la misma unidad sirve como calentador de aire y unidad de secado. El secador solar tipo caja es un ejemplo de secadores solares directos (Figura 2.2). Consiste en una caja cuadrada, bandejas de producto y una cubierta transparente en la parte superior. La radiación solar se transmite a través de la cubierta transparente y se absorbe en la superficie interior ennegrecida. Debido a la acumulación de energía, la temperatura dentro del secador aumenta. A medida que aumenta la temperatura dentro del secador, el aire ingresa a través del panel frontal y sale a través del panel posterior debido al flujo de aire inducido por la flotabilidad. Como resultado, hay un flujo continuo de aire sobre el material. Este tipo de secador solar es muy adecuado para secar pequeñas cantidades (10-15 kg) de frutas y verdu-

## 2.1. Sistemas de secado solar

---

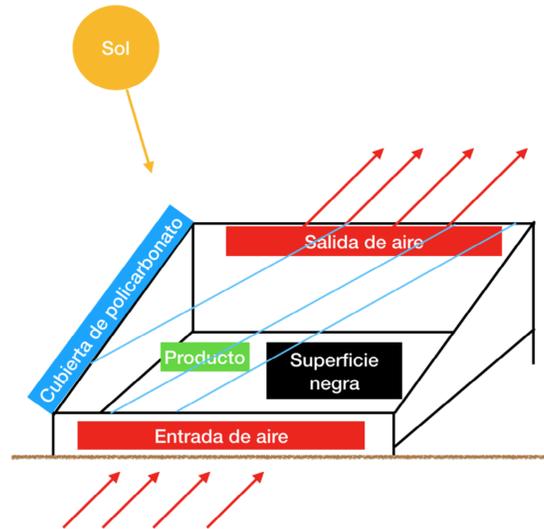


Figura 2.2: Secador solar directo tipo caja (Janjai y Bala, 2012).

ras a escala doméstica.

Se ha realizado un extenso estudio sobre el secado solar de productos agrícolas utilizando secadores solares tipo gabinete/caja y tipo túnel (Thanvi y Pandey, 1987; PAU, 1986; Sodha et al., 1985; Srivastava y Sulebde, 1984). Sodha et al., 1985 desarrollaron un modelo analítico para predecir la temperatura y el contenido de humedad durante el secado de las frutas en un secador solar tipo gabinete/caja.

El Brace Research Institute de la Universidad de McGill, Canadá, desarrolló un secador tipo gabinete (Lawand, 1975). El secador es esencialmente una caja, en la que se pueden secar frutas, verduras u otros materiales. Consiste en una caja rectangular, aislada en su base y preferiblemente en los lados, y cubierta con una cubierta transparente de doble capa hecha de paneles de vidrio de 2 mm de espesor o una película plástica de 0.5 mm de espesor. Se concluyó que el secador tipo gabinete puede ser útil para aplicaciones domésticas para secar frutas y verduras en países en desarrollo.

Bena y Fuller (2002) combinaron un secador solar de convección natural tipo

directo y un calentador de biomasa simple para demostrar una tecnología de secado adecuada para procesadores a pequeña escala de frutas y verduras secas en áreas no electrificadas de países en desarrollo. De una serie de pruebas de evaluación del sistema, se encontró que la capacidad del secador era de 20 a 22 kg de piña fresca dispuesta en una sola capa de rebanadas de 0.01 m de grosor (Bena y Fuller, 2002).

Doe et al. (1998) desarrollaron y probaron un secador solar tipo túnel para el secado de peces en Bangladesh, el secador consiste en un marco triangular de bambú con el lado norte cubierto con policarbonato negro, la base y el lado sur cubierto con policarbonato claro. La temperatura máxima registrada fue de 48°C con temperatura exteriores de 27°C. Los peces alcanzaron el contenido de humedad requerido en tres días sin ninguna infestación por larvas. Sin embargo, este tipo de secadores no existe en Bangladesh porque no cumple con los requerimientos de los granjeros, y la razón de secado es muy baja debido a la baja flotabilidad inducida por el flujo de aire (Doe et al., 1997).

Lawand (1977) desarrolló un secador de cajas de zapatos, el objetivo principal era mejorar la calidad del producto al reducir la contaminación e interferencia del polvo, los insectos y los humanos. Consiste en una tapa transparente (lámina de vidrio o película de plástico) que cubre una caja aislada hecha de materiales baratos y fácilmente disponibles como madera, ladrillo, concreto, hierro galvanizado o láminas de aluminio. El material a secar se coloca sobre una malla de alambre o una malla de acero colocada a unos pocos centímetros sobre el piso de la caja. Los orificios de ventilación se proporcionan en la parte superior e inferior de la caja. La radiación solar transmitida a través del techo se absorbe en la superficie interior. A medida que aumenta la temperatura interna, el aire caliente sale de los orificios de ventilación por convección natural. Al hacerlo, el aire fresco es conducido hacia arriba a través de la base. Como resultado, hay un flujo continuo de aire sobre el material a secar. Con este tipo de secador solar se pueden obtener diferencias de temperatura entre el aire ambiente interno y externo de aproximadamente 40°C (Lawand, 1977).

## 2.1. Sistemas de secado solar

---

Un secador solar tipo gabinete fue desarrollado y probado en la Universidad de Khon Kaen, Tailandia (Limtragool, 1984). El secador solar tipo gabinete estaba hecho de láminas de plástico negro, y un marco de acero de grado ligero pegado a un marco de bambú y el piso estaba cubierto con una pequeña grava de 3 cm de espesor sobre. Había cuatro bandejas de cacahuete, apiladas una encima de la otra, con un área total de la bandeja de 3.12 m<sup>2</sup>. Puede contener 0.22 m<sup>3</sup> de cacahuetes.

El Instituto Central de Ingeniería Agrícola (CIAE), India, agregó un aspirador operado por el viento a su diseño de secador de gabinete para el secado de material alimenticio procesado en húmedo y perecedero. El secador consta de dos cámaras de madera recubiertas con vidrio de dimensiones generales de 2.25 m de largo por 1.22 m de ancho por 2.39 m de alto con cuatro bandejas inclinadas para sostener el material a secar. Las bandejas están forradas con una pantalla de hierro galvanizado. El aspirador de chimenea ayuda a promover el flujo de aire a través de las cámaras. Se pudieron obtener temperaturas internas de aproximadamente 6-15°C por encima de la temperatura ambiente. El chile, la coliflor, el maní y las papas se han secado satisfactoriamente con este secador de gabinete.

Ekechukwu y Norton (1997) diseñaron y desarrollaron un secador solar directo de convección natural que es adecuado para el secado de la mayoría de los cultivos. Consiste en una cámara de secado transparente y una chimenea solar transparente. La radiación solar que pasa a través de la cubierta transparente incide directamente en los productos y extrae la humedad de los productos. Este tipo de secador es adecuado para productos como ciertas variedades de uvas y dátiles, que pueden estar directamente expuestos a la radiación solar (Ekechukwu y Norton, 1997).

Jeffery y Mary (2002) desarrollaron una técnica que podía extender la duración de las ventas de tomate deshidratándolos utilizando un espacio de invernadero fuera de temporada. Un invernadero (13.71 m por 3.65 m) se convirtió en una sala de secado y área de trabajo, el lado sur se convirtió en un gran secador solar al retirar los bancos del invernadero y a los estantes usados. El bastidor soporta veinte bandejas

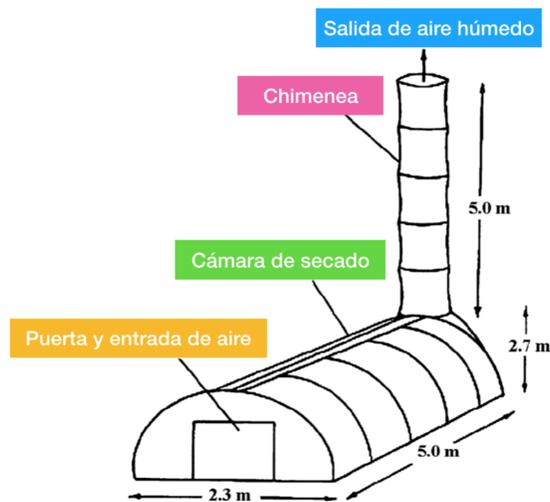


Figura 2.3: Secador solar tipo invernadero (Shaarma et al., 1995).

de aluminio 14 pulgadas por 24 pulgadas. En verano se secaron con éxito varios lotes de diversas hierbas, pimientos y ajos. La calidad de los productos secos fue buena en términos de color, textura y sabor. Los agricultores están utilizando esta tecnología para el secado de verduras (Jeffery y Mary, 2002).

Shaarma et al. (1995) desarrollaron un secador solar pasivo tipo invernadero como se muestra en la Figura 2.3, es esencialmente un secador solar pasivo de tipo directo con una gran chimenea, y el flujo de aire es inducido por la flotabilidad (Shaarma et al., 1995).

### 2.1.2. Modo indirecto

Es el tipo de secador solar más antiguo, y consiste en un colector solar separado con una cubierta transparente en la parte superior y una unidad de secado con una cubierta opaca en la parte superior. Estos están conectados en serie (Figura 2.4). En un secador de este tipo, el cultivo está contenido dentro del gabinete de secado en una cama relativamente delgada, que se extiende completamente por el gabinete. El

## 2.1. Sistemas de secado solar

---

aire, que se calienta en un colector solar simple tipo placa plana, luego fluye como resultado de las fuerzas de flotación resultantes de las diferencias de temperatura a través del lecho de cultivo, lo que produce el aire de secado. Las tasas de secado alcanzadas hasta la fecha con estos secadores no han sido, en general, muy satisfactorias (Tiwari et al., 2016).

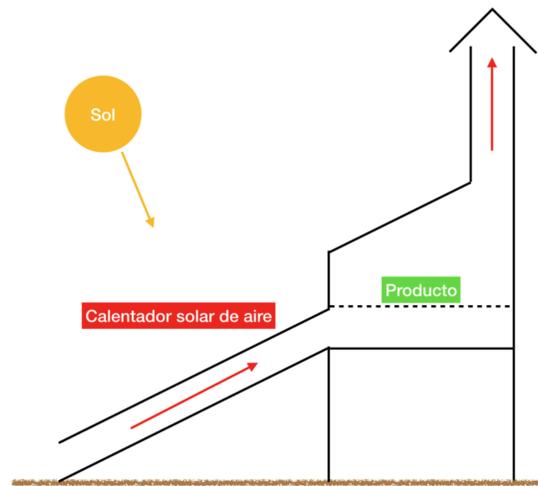


Figura 2.4: Secador solar indirecto de convección natural (Janjai y Bala, 2012).

Oosthuizen (1995) identificó parte de este inconveniente debido al hecho de que los secadores generalmente no se han adaptado a los requisitos del producto (Oosthuizen, 1995). Se han realizado muchos intentos de desarrollar estos secadores solares indirectos de convección natural véase (Brenndorfer et al., 1985; Sodha et al., 1985; Boonthumjinda, 1980; Exell y Kornsakoo, 1978). Los conceptos básicos involucrados en el modelado de tales secadores se analizan por otros autores (Exell y Kornsakoo, 1978). Oosthuizen (1988; 1986) describe un modelo informático que parece ser capaz de predecir las características principales de dichos secadores (Oosthuizen, 1988; Oosthuizen, 1986). Bala y Woods (1994) informaron sobre un modelo matemático para simular el secado solar indirecto por convección natural de arroz en bruto y Bala y Woods (1995) también desarrollaron una técnica para el diseño óptimo de secadores solares de convección natural (Bala y Woods, 1995; Bala y Woods, 1994).

Malasia construyeron y evaluaron un secador solar de convección natural de calentamiento indirecto (Mah y Chin, 1980). El sistema consta de 1.83 m de largo, 0.91 m de ancho y 0.34 m. Tiene un calentador solar de aluminio con convección natural acoplado a una cámara de secado completamente aislada. Este último medía 1 m por 1 m por 2 m de altura y estaba provisto de 6 bandejas apiladas verticalmente con 2.54 cm de profundidad, cada una capaz de sostener hasta 7.84 kg de arroz. Aquí, varias bandejas se llenaron con arroz húmedo y se cargaron en la cámara de secado. Tan pronto como se secaron las bandejas de la parte inferior hasta los contenidos de humedad deseados (13-14 % en peso), se retiraron y se agregaron bandejas nuevas en la parte superior de la pila. Por lo tanto, en cualquier momento, el número total de bandejas se mantuvo igual. Los resultados mostraron que 16-24 kg de arroz podrían secarse diariamente a partir de un contenido de humedad inicial de aproximadamente 21-22 % (bh) hasta un contenido de humedad final de aproximadamente 15-16 % (bh). La profundidad del arroz por bandeja debe limitarse a 2.54 cm para garantizar un secado uniforme, y la profundidad total del arroz debe limitarse a 5.1 cm (2 bandejas) para asegurar un flujo de aire satisfactorio. Sin embargo, la profundidad podría aumentarse si los colectores se hicieran más grandes (Ong, 1981).

También se probó en la Universidad de Annamalai un secador de arroz de convección natural de 250 kg de capacidad que utiliza una lámina de polietileno negro como absorbente (1985). El grosor del lecho de arroz se optimizó a 9 cm, y se requirieron dos días soleados consecutivos para secar el arroz de 30 a 14 % (bh) contenido de humedad. Aunque los secadores solares de convección natural indirecta parecen tener una amplia aplicación en muchos países en desarrollo para el secado de cultivos como el arroz y el maíz, no existe debido a las tasas de secado extremadamente bajas.

Ong (1986) diseñó un tipo simple de secado solar de bajo costo similar al de Laul et al. (1970) para su uso en la región de Asia y el Pacífico. Consiste en un calentador de aire solar de placa plana convencional conectado a una cámara de secado. La cámara de secado consiste en una pila vertical de bandejas en la que se coloca el ma-

## 2.1. Sistemas de secado solar

---

terial a secar. El aire ambiente ingresa por el extremo inferior abierto del colector. La radiación solar que cae sobre la placa colectora calienta el aire en su interior. El aire caliente sube y se descarga en la cámara de secado. De este modo, el aire circula por convección natural. La velocidad del flujo de aire podría aumentarse incorporando una chimenea alta a la cámara de secado, o podría colocarse un ventilador operado por el viento en la parte superior de la cámara y, por lo tanto, mejorar la velocidad de secado (Ong, 1986; Laul et al., 1970).

El secador solar de convección natural se utilizó en el secado de diversos cultivos comerciales en Indonesia. Hydari y Suharwadji informaron su uso para el secado de cebolla. La cámara de secado cubierta de plástico (200 kg de capacidad) medía 1.2 m por 1.2 m por 3,5 m de altura y contenía siete bandejas separadas por 30 cm. Tres calefactores solares de aire de placa de metal plano ennegrecidos se conectaron a la cámara de secado en sus tres lados. La carga y descarga se realizaron en el cuarto lado. Cada calentador solar mide 1.2 m de ancho por 3.5 m de largo y 20 cm de profundidad, provisto de una cubierta de plástico. Los resultados mostraron que el secador solar redujo el número promedio de días de secado de 10 a 3, con una pérdida de peso promedio del 22 % en comparación con alrededor del 35 % utilizando el método tradicional al aire libre (Hydari y Suharwadji, 1981).

### 2.1.3. Modo mixto

El secador solar de modo mixto consiste en un colector solar separado y una unidad de secado, ambos con cubierta transparente en la parte superior, y el sistema está conectado en serie. La radiación solar se recibe en el colector, así como en la caja del secador. La energía solar que pasa a través de la cubierta transparente del colector calienta el absorbente que transfiere el calor al aire. La energía solar que pasa a través de la cubierta transparente del recipiente de secado calienta el producto en la cama que transfiere el calor al aire que pasa a través de la cama del producto y evapora la humedad del producto. El aumento de la temperatura del aire en la parte

## 2.1. Sistemas de secado solar

---

superior de la cama del producto aumenta la tasa de flujo de aire inducido por la flotabilidad. Por lo tanto, la tasa de secado aumenta debido a la mayor temperatura del producto y al aumento de la tasa de flujo de aire inducido por la flotabilidad (Tiwari et al., 2016; Janjai y Bala, 2012).

Se han realizado muchos estudios para desarrollar un secador solar mixto (Simate, 2003; Zaman y Bala, 1989; Exell y Kornsakoo, 1978). Simate (2003) analiza los conceptos básicos involucrados en el modelado de tales secadores, y el modelo de simulación por computadora se combina con el costo de los materiales del secador y una técnica de búsqueda para encontrar las dimensiones óptimas de dichos secadores (Simate, 2003). Este modelo se basa en el concepto de diseño óptimo de secadores solares desarrollado por Bala y Wood (1995).

Exell y Kornsakoo (1978) desarrollaron un secador solar para proporcionar al agricultor de arroz en el sudeste asiático un método barato y simple pero eficiente para secar la cosecha de la estación húmeda. El secador consta de 3 componentes principales, es decir, el colector solar, la caja de arroz y la chimenea. El colector solar consiste en una sustancia negra mate distribuida en el suelo y provista de cubiertas superiores y laterales transparentes. El secador se diseñó inicialmente con un lecho de cáscara de arroz quemado como absorbente y una lámina de plástico transparente de polietileno estabilizada contra los rayos UV como cubierta transparente. Sin embargo, estos materiales podrían sustituirse por materiales disponibles localmente, como carbón, plástico negro o láminas de metal pintadas de negro, piedras de color oscuro, etc (Exell y Kornsakoo, 1978).

Wibulswas y Thaina (1980) en Tailandia realizaron pruebas de laboratorio en secadores de gabinetes conectados a calentadores solares de aire de placa plana de convección natural. El secador de gabinete que mide 1.04 m por 0.75 m por 1.03 m de altura y contiene 5 bandejas de secado. La parte superior de la pared posterior del gabinete está provista de puertos de salida ajustables para eliminar el aire húmedo por convección natural. Los calentadores solares de aire miden 1.04 m de ancho por

## 2.1. Sistemas de secado solar

---

1.8 m de largo e inclinaron 14 grados respecto a la horizontal. Se emplearon en los colectores tres tipos de cubiertas superiores transparentes, a saber, vidrio, plástico acrílico y plástico reforzado con fibra. Se evaluaron dos tipos de superficies absorbentes, a saber, virutas de torno de metal negro y una lámina de acero suave pintada de negro suspendida sobre aislamiento de espuma de poliestireno. Los resultados de las pruebas mostraron que el calentador de aire con lámina de metal y cubierta de vidrio funcionó mejor, y la cámara de secado con cubiertas de vidrio son más eficientes y económicas que las cubiertas con polietileno (Wibulswas y Thaina, 1980).

Shaarma et al. (1995) investigaron un secador de modo mixto por convección natural, y es esencialmente una versión simplificada del tipo túnel. El secador consiste en un colector solar acristalado conectado en serie con una unidad de secado con una chimenea en Extremo posterior de la unidad de secado para producir un flujo de aire inducido por la flotabilidad en el secador. Este simple secador solar está ubicado en una sola caja de madera cúbica. La caja se ha dividido en dos mitades. Un calentador de aire solar esmaltado ubicado en la base de la cámara de secado proporciona calor adicional. El aire precalentado en el colector solar se eleva a través de la segunda mitad del sistema. Se proporciona una chimenea en la parte superior de la unidad de secado. El aire caliente deshidrata el producto y se agota por la chimenea. El producto seco se coloca en las bandejas móviles que se mantienen en los marcos metálicos. En este tipo de secador, la construcción se simplifica utilizando un colector horizontal de placa plana y unidades de secado (Shaarma et al., 1995).

El secador solar de caja negra de Kenia fue desarrollado por Eckert (1998), y más de 90 secadores fueron probados durante 1996-1997. El tamaño del secador es de 2 m por 0.8 m, capacidad de secado de 15 a 20 kg de mangos frescos por día en el clima de Kenia, lo que da como resultado aproximadamente 0.50 kg por día de secado producto. La temperatura alcanza hasta 40°C por encima de la temperatura ambiente. La gente de Kenia declaró que el secador era técnicamente confiable, económicamente viable y socialmente aceptable. Se concluyó que el secador solar de caja negra puede ser apropiado para el secado a pequeña escala en áreas con un clima propicio para

### 2.3. Secadores solares con ventilación natural

---

el secado solar con convección (Eckert, 1998).

Sin embargo, estos tipos de secadores solares no se utilizan en los trópicos y subtropicos. Pangavhane y Sawhney (2002) revisaron críticamente el secado solar de la uva practicado en toda la India y presentaron brevemente los rendimientos, los méritos y las desventajas del secador tipo rack, el secador tipo Soyagi-Hana (un tipo de techo inclinado), un gabinete solar, un secador solar de techo, secador solar con ventilación natural, secador solar de tipo indirecto para frutas y verduras, secador solar de múltiples capas, secador solar tipo invernadero, secador solar tipo túnel con colector, secador solar híbrido y secador solar de convección natural multipropósito (Pangavhane y Sawhney, 2002). Se llegó a la conclusión de que el secador solar de uva debería ser multipropósito, a gran escala y económicamente atractivo. Durante la noche, es necesario desarrollar un sistema que tenga un respaldo de almacenamiento térmico. Entre los secadores solares existentes, el secador solar tipo invernadero tiene una serie de ventajas sobre otros tipos de secadores solares. Esto se debe al hecho de que el secador solar de invernadero tiene una estructura simple, gran capacidad de carga y un rendimiento térmico relativamente bueno. Además, el secador solar para invernaderos se basa en la tecnología de invernadero agrícola, que ya ha sido bien desarrollada, tanto en términos de materiales como de método de construcción (Tiwari, 2003).

## 2.2. Secadores solares con ventilación natural

Las ventajas del secado solar por convección natural sobre el secado solar por convección forzada son que requiere una inversión menor, aunque es difícil controlar la temperatura de secado y la velocidad de secado puede ser limitada. Sin embargo, debido a su bajo costo y simple operación y mantenimiento, el secador solar de convección natural parece ser la opción obvia para el secado de productos agrícolas en una escala familiar.

## 2.3. Secadores solares con ventilación forzada

El éxito alcanzado por los secadores solares de convección natural ha sido muy limitado debido al bajo flujo de aire inducido por la flotabilidad, esto estimuló a los investigadores a desarrollar secadores solares de convección forzada. Agregar un ventilador para proporcionar el flujo de aire requerido dará tasas de secado mucho más altas que las logradas por los secadores solares de convección natural. El flujo de aire requerido se puede suministrar usando un ventilador operado por un módulo de electricidad o combustible fósil. El sistema de operación fotovoltaica tiene la ventaja de que puede ser operado independientemente de la red eléctrica. Estos secadores pueden utilizarse para secar frutas, verduras, especias e incluso pescado para la producción industrial a pequeña escala (Patial y Gawanw, 2016; Tiwari et al., 2016; Janjai y Bala, 2012).

Se han publicado varios estudios sobre el secado solar con ventilación de granos como el arroz, frutas y vegetales. Sin embargo, este tipo de secadores solares de convección forzada requiere un controlador de temperatura para mantener la temperatura dentro del límite permitido.

Se han realizado muchos estudios sobre el secado solar de arroz con ventilación eléctrica en el sudeste asiático y se ha demostrado que el secador tipo lote seca el arroz con éxito. Pero estos no se usan principalmente debido a que estos no cumplen con los requisitos o la calidad no se refleja en el precio.

Ong y Than (1982) reportaron de un secado de arroz utilizando un secador solar de convección forzada por calentamiento indirecto en Malasia (Ong y Than, 1982). El calentador de aire solar de perfil trapezoidal se conectó a la cámara de secado por convección natural. Este último fue modificado para permitir que el aire caliente del colector solar se dirija a la cámara usando un ventilado. El trabajo posterior para mejorar la carga/descarga del arroz demostró que 225 kg de arroz se podían secar diariamente desde un contenido de humedad de aproximadamente 21 % a menos del

14% en un buen día soleado (Lim y Ng, 1982). El rendimiento diario del secador por convección forzada fue 3 veces y 14 veces más alto que el de la convección natural y el secado al aire libre, respectivamente, basado en un área de colector similar. Johari y Jusoo (1980) probaron un secador por lotes de circulación forzada en Malasia y pudieron secar 138 kg de arroz con un contenido de humedad del 18% (base húmeda) hasta el 13% en 3 horas (Johari y Jusoo, 1980). Ibrahim (1978) también desarrolló un secador de lotes solar de circulación forzada de tamaño de laboratorio para arroz utilizando un contenedor de secado con un área de sección transversal de  $0.6 \text{ m}^2$  conectado a un panel colector que mide 0.84 m de ancho por 3.66 m de largo por 0.27 m de alto y secar un lecho de arroz de 100 mm de profundidad desde un 20% de contenido de humedad hasta un 13% en aproximadamente en 2-3 horas (Ibrahim, 1978). Tran et al. (1980) experimentó con un sistema de secado solar de flujo continuo utilizando un soplador eléctrico para la circulación de aire en Malasia. El calentador de aire solar consta de dos calentadores de aire solares de placa plana conectados en serie. Cada una de ellas midió 2.44 m de ancho por 3.05 m de largo y se construyó remachando una lámina de zinc galvanizado corrugado pintado en negro en una lámina plana lisa. Se proporcionó una cubierta de vidrio superior y un aislamiento inferior de cáscara de coco. La cámara de secado consiste en un sistema de elevador de cangilones accionado por motor que descarga arroz desde la parte superior de la cámara de secado. Los resultados mostraron que se podían secar 150 kg de arroz a partir de contenidos de humedad de aproximadamente 20% hasta 13% (base seca) en 3 a 4 h (Tran et al., 1980).

## 2.4. Modelación matemática de secadores solares

Las técnicas de modelado matemático son importantes para la descripción del comportamiento de los sistemas experimentales. Un experimento puede ser demasiado peligroso y costoso. En ocasiones, el tiempo requerido para un experimento sobrepasa los límites humanos. El modelado matemático es importante para el diseño de un secador y facilitar su operación, así como para aumentar la calidad del

producto y ahorrar energía. También se utiliza para simular el flujo de aire caliente (Agatonovic-Kustrin y Beresford, 2000).

Las redes neuronales artificiales (RNA) son una técnica de modelado inspirada en el funcionamiento de las neuronas biológicas. Se usan para conjuntos de datos que tienen interacciones no lineales. Las RNA no necesitan conocimiento de la fuente de información (sistema) (Akpınar et al., 2003).

En el proceso de secado, el flujo de aire es constante. También se utiliza la transferencia de calor como medio. En el proceso de secado, el movimiento del aire y varios procesos de transferencia están conectados con la velocidad del aire. En esta condición se utiliza el modelado de Dinámica de Fluidos Computacional (CFD). Durante el proceso de secado, la velocidad del aire se mide con la ayuda de un anemómetro. El flujo de aire caliente en diferentes posiciones de la cámara de secado se determina mediante el uso de sensores (Diamante y Munro, 1991).

En el campo de la energía solar, las técnicas de modelado RNA se utilizan en la estimación de la relación de concentración local y la predicción del rendimiento de los sistemas de calentamiento solar de agua de los sistemas de secado (Kalogirou, 2001). Las RNA también se utilizan en el modelado del motor Stirling (Ahmadi et al., 2015). Kalogirou (2004) utilizó RNA para la optimización del sistema solar y reduce el tiempo requerido para el diseño del sistema solar (Kalogirou, 2004).

El sistema de modelado ANFIS se basa en un Sistema de Inferencia Difusa. El sistema de modelado ANFIS se utiliza para el modelado y control de sistemas. Se basa en datos de entrada y salida del sistema a modelar. La magnitud del conjunto de datos de entrada y salida es muy crítica, por lo que debe haber una gran cantidad de datos disponibles. La generación de datos es una situación costosa cuando la magnitud del conjunto de datos de entrada y salida es grande (Buragohain y Mahanta, 2008). Mellit y Pavan (2010) utilizaron las RNA para la predicción del rendimiento de una planta fotovoltaica en Trieste (Mellit y Pavan, 2010).

Zadeh (1965) desarrolló la lógica difusa moderna a mediados de los años sesenta. La teoría de la lógica difusa tiene un vínculo débil con la teoría de la probabilidad. La teoría de la probabilidad es tratar con el conocimiento inexacto que se comunica en el esquema bayesiano (Zadeh, 1965).

Mellit et al. (2009) utilizaron inteligencia artificial (IA) para resolver problemas complicados en el modelado, pronóstico, predicción, identificación, optimización y control de sistemas (Mellit et al., 2009).

### 2.4.1. Visión general de los sistemas neurodifusos

Las técnicas modernas de inteligencia artificial han encontrado aplicación en casi todos los campos del conocimiento. Sin embargo, se da un gran énfasis a las áreas de ciencias, tal vez la mayor expresión del éxito de estas técnicas se encuentra en el campo de la ingeniería. Estas, las redes neuronales y la lógica difusa, se aplican muchas veces para resolver problemas de ingeniería donde las técnicas clásicas no proporcionan una solución fácil y precisa. El término neuro-difuso nació de la fusión de estas dos técnicas. Como cada investigador combina estas dos herramientas de manera diferente, entonces, se creó cierta confusión sobre el significado exacto de este término. Aún no existe un consenso absoluto, pero en general, el término neuro-difuso significa un tipo de sistema caracterizado por una estructura similar de un controlador difuso donde los conjuntos y reglas difusos se ajustan utilizando técnicas de redes neuronales de forma iterativa con vectores de datos (datos de entrada y salida) (Vieira et al., 2004).

Tales sistemas muestran dos formas distintas de comportamiento. En una primera fase, llamada fase de aprendizaje, se comporta como redes neuronales que aprenden sus parámetros internos no lineales. Más tarde, en la fase de ejecución, se comporta como un sistema difuso (Vieira et al., 2004).

Por separado, cada una de estas técnicas posee ventajas y desventajas que, cuando se mezclan entre sí, proporciona mejores resultados que los obtenidos con el uso de cada técnica aislada.

### Sistemas difusos

La teoría de los conjuntos difusos fue iniciada por Zadeh en 1965. Los sistemas difusos proponen un cálculo matemático para traducir el conocimiento humano subjetivo de los procesos reales. Esta es una forma de manipular el conocimiento práctico con cierto nivel de incertidumbre. El comportamiento de tales sistemas se describe a través de un conjunto de reglas difusas, como: **SI premisa ENTONCES consecuencia** que utiliza variables lingüísticas con términos simbólicos. Cada término representa un conjunto difuso. Los términos del espacio de entrada (típicamente 5-7 para cada variable lingüística) componen la partición difusa (Zadeh, 1965).

El mecanismo de inferencia difusa consta de tres etapas: en la primera etapa, los valores de las entradas numéricas se asignan mediante una función de acuerdo con el grado de compatibilidad de los respectivos conjuntos difusos, esta operación puede denominarse *fuzzyfication*. En la segunda etapa, el sistema difuso procesa las reglas de acuerdo con las fuerzas de disparo de las entradas. En la tercera etapa, los valores difusos resultantes se transforman nuevamente en valores numéricos, esta operación puede llamarse *defuzzyfication*. Esencialmente, este procedimiento hace posible el uso de categorías difusas en la representación de palabras y abstrae ideas de los seres humanos en la descripción del procedimiento de toma de decisiones (Vieira et al., 2004). Las ventajas de los sistemas difusos son:

- Capacidad para representar incertidumbres inherentes del conocimiento humano con variables lingüísticas;
- Interacción simple del experto del dominio con el ingeniero diseñador del sistema;

## 2.4. Secadores solares con ventilación natural

---

- Fácil interpretación de los resultados, debido a la representación de las reglas naturales;
- Fácil extensión de la base de conocimiento a través de la adición de nuevas reglas;
- Robustez en relación a las posibles perturbaciones en el sistema.

Y sus desventajas son:

- Incapaz de generalizar, o cualquiera de las dos, solo responde a lo que está escrito en sus base de reglas;
- No son robustos en relación con los cambios topológicos del sistema, tales cambios demandarían alteraciones en la base de reglas;
- Depende de la existencia de un experto para determinar las reglas lógicas de inferencia.

### **Redes neuronales artificiales**

Las redes neuronales artificiales intentan dar forma a las funciones biológicas del cerebro humano. Esto lleva a la idealización de las neuronas como unidades discretas de procesamiento distribuido. Sus conexiones locales o globales dentro de una red también están idealizadas, lo que lleva a la capacidad del sistema nervioso para asimilar, aprender o prever reacciones o decisiones que deben tomarse. La principal característica de las redes neuronales es el hecho de que estas estructuras pueden aprender con ejemplos (vectores de entrenamiento, muestras de entrada y salida del sistema). Las redes neuronales modifican su estructura interna y los pesos de las conexiones entre sus neuronas artificiales para realizar el mapeo, con un nivel de error aceptable para la aplicación, de la relación entrada-salida que representa el comportamiento del sistema modelado (Vieira et al., 2004). Las ventajas de las redes neuronales son:

- Capacidad de aprendizaje;

- Capacidad de generalización;
- Robustez en relación a las perturbaciones.

Y sus desventajas son:

- Interpretación imposible de la funcionalidad;
- Dificultad para determinar número de capas y el número de neuronas;

### 2.4.2. Sistemas neurodifusos

Desde el momento en que los sistemas difusos se vuelven populares en aplicaciones industriales, la comunidad percibió que el desarrollo de un sistema difuso con buen desempeño no es una tarea fácil. El problema de encontrar funciones de membresía y reglas apropiadas es frecuentemente un proceso agotador de prueba y error. Esto condujo a la idea de aplicar algoritmos de aprendizaje a los sistemas difusos. Las redes neuronales, que tienen algoritmos de aprendizaje eficientes, se presentaron como una alternativa para automatizar o apoyar el desarrollo de sistemas difusos de ajuste. La mayoría de las primeras aplicaciones estaban en control de procesos. Gradualmente, su aplicación se extendió a todas las áreas del conocimiento, análisis de datos, clasificación de datos, detección de imperfecciones y apoyo a la toma de decisiones, etc. (Vieira et al., 2004).

Las redes neuronales y los sistemas difusos pueden combinarse para unir sus ventajas y remediar su desventaja individual. Las redes neuronales introducen sus características computacionales de aprendizaje en los sistemas difusos y reciben de ellas la interpretación y claridad de la representación de los sistemas. Por lo tanto, las desventajas de los sistemas difusos se compensan con las capacidades de las redes neuronales. Estas técnicas son complementarias, lo que justifica su uso en conjunto (Vieira et al., 2004).

### **2.4.3. Clasificación de los sistemas neurodifusos**

En general, todas las combinaciones de técnicas basadas en redes neuronales y lógica difusa pueden denominarse sistemas neuro-difusos. Las diferentes combinaciones de estas técnicas se pueden dividir en las siguientes clases (Nauck y Kurse, 1997):

#### **Sistema neurodifuso cooperativo**

En los sistemas cooperativos hay una fase de preprocesamiento donde los mecanismos de aprendizaje de las redes neuronales determinan algunos sub-bloques del sistema difuso. Por ejemplo, los conjuntos difusos y/o las reglas difusas (memorias asociativas difusas (Kosko, 1992) o el uso de algoritmos de agrupamiento para determinar las reglas y la posición de los conjuntos difusos (Czogala y Leski, 2000)). Una vez calculados los sub-bloques difusos, se eliminan los métodos de aprendizaje de la red neuronal y se ejecuta solo el sistema difuso.

#### **Sistema neurodifuso concurrente**

En los sistemas concurrentes, la red neuronal y el sistema difuso trabajan continuamente juntos. En general, las redes neuronales preprocesan las entradas (o posprocesan las salidas) del sistema difuso.

#### **Sistema neurodifuso híbrido**

En esta categoría, se utiliza una red neuronal para aprender algunos parámetros del sistema difuso (parámetros de los conjuntos difusos, reglas difusas y pesos de las reglas) de un sistema difuso de una manera iterativa. La mayoría de los investigadores usan el término neuro-difuso para referirse solo al sistema híbrido neuro-difuso.

Hay varias formas diferentes de desarrollar sistemas híbridos neuro-difusos; por

lo tanto, como es un tema de investigación reciente, cada investigador ha definido sus propios modelos particulares. Estos modelos son similares en su esencia, pero presentan diferencias básicas (Vieira et al., 2004).

Muchos tipos de sistemas neuro-difusos están representados por redes neuronales que implementan funciones lógicas. Esto no es necesario para la aplicación de un algoritmo de aprendizaje en un sistema difuso, sin embargo, la representación a través de redes neuronales es más conveniente porque permite visualizar el flujo de datos a través del sistema y las señales de error que se utilizan para actualizar sus parámetros. El beneficio adicional es permitir la comparación de los diferentes modelos y visualizar sus diferencias estructurales. Hay varias arquitecturas neuro-difusas como (Vieira et al., 2004):

- **Fuzzy Adaptive Learning Control Network (FALCON)** (Lin y Lee, 1991);
- **Adaptive Network based Fuzzy Inference System (ANFIS)** (Jang, 1993);
- **Generalized Approximate Reasoning based Intelligence Control (GARIC)** (Berenji y Khedkar, 1992);
- **Neuronal Fuzzy Controller (NEFCON)** (Nauck y Kursse, 1997);
- **Fuzzy Inference and Neural Network in Fuzzy Inference Software (FINEST)** (Tano et al., 1996);
- **Fuzzy Net (FUN)** (Sulzberger et al., 1993);
- **Self-Constructing Neural Fuzzy Inference Network (SONFIN)** (Figueiredo y Gomide, 1999);
- **Fuzzy Neural Network (NFN)** (Juang y Chin, 1998);
- **Dynamic/Evolving Fuzzy Neural Network (EFuNN and dmEFuNN)** (Kasabov y Song, 1999).

#### 2.4.4. Arquitectura ANFIS (Adaptive Neuro Fuzzy Inference System)

El sistema de modelado ANFIS se basa en la equivalencia funcional, bajo ciertas restricciones, entre el RBF (función de base radial) y el sistema difuso tipo Takagi-Sugeno-Kang (TSK) (Gunnawiek et al., 1996). Una sola salida se resuelve directamente pesando la entrada mediante reglas difusas. Esta regla se basa en el conocimiento de varios datos de entrada del sistema. ANFIS se obtiene con la ayuda de un algoritmo computacional que se basa en una red neuronal.

ANFIS en su forma más simple es un sistema de razonamiento difuso con parámetros entrenados por algoritmos basados en RNA. Los parámetros lineales generalmente se estiman utilizando los algoritmos de mínimos cuadrados (Least Square, LS) convencionales, mientras que los parámetros de las funciones de membresía, o funciones de pertenencia, (Membership Function, MF) se ajustan utilizando un método de aprendizaje de redes neuronales híbridas. Se desarrolló un enfoque sistemático mediante un modelo difuso Sugeno (conocido como Takagi-Sugeno-Kang) (Jang, 1993) para generar las reglas difusas sobre la base de los datos de entrada-salida disponibles. ANFIS es un modelo de dos entradas que utiliza la siguiente regla difusa:

Regla 1: SI  $x$  es  $A_1$  y  $y$  es  $B_1$  ENTONCES  $f_1 = p_1x + q_1y + r_1$ .

Regla 2: SI  $x$  es  $A_2$  y  $y$  es  $B_2$  ENTONCES  $f_2 = p_2x + q_2y + r_2$ .

La arquitectura típica de un ANFIS de dos entradas se muestra en la Figura 2.5. Se aprecian cinco capas de cuadrados o círculos. Los cuadrados representan nodos adaptativos, mientras que los círculos denotan nodos fijos. La función de cada capa se explica a continuación.

**Capa 1.** Esta capa está compuesta por  $i$  nodos cuadrados (nodos adaptables). La salida de esta capa representa el grado de pertenencia difusa de las entradas  $x$  e

## 2.4. Secadores solares con ventilación natural

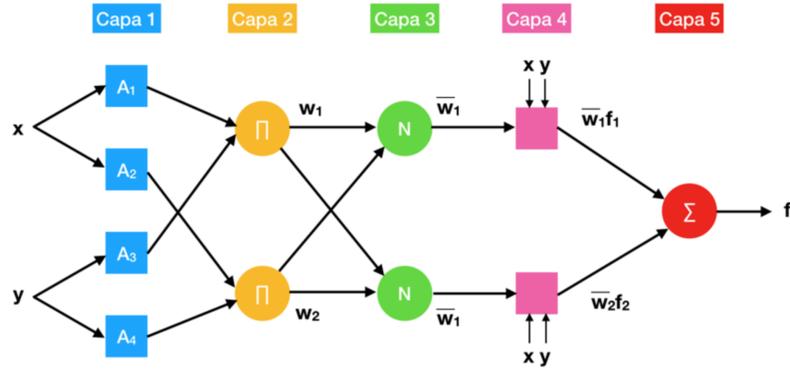


Figura 2.5: Arquitectura ANFIS (Chauhana et al., 2015).

$y$ , según se indica a continuación:

$$O_i^1 = \mu_{A_i}(x) \quad (2.1)$$

para  $i = 1, 2$

$$O_j^1 = \mu_{A_j}(y) \quad (2.2)$$

para  $j = 1, 2$

Cualquier función de pertenencia difusa (como la función de forma de campana) tiene valores entre 0 y 1 puede asignarse a  $\mu_{A_i}(x)$ ,  $\mu_{B_j}(y)$  de la siguiente manera:

$$\mu_i(x) = e^{-\frac{[x_i - c_i]^2}{[\sigma_i]^2}} \quad (2.3)$$

$i = 1, 2$ .

**Capa 2.** Esta capa está compuesta por  $i$  nodos circulares denotados por la letra  $\Pi$  (es decir, todos los nodos son fijos). Cada nodo en esta capa calcula la fuerza de tiro de la regla mediante la multiplicación:

$$O_k^2 = w_k = \mu_{A_i}(x) \times \mu_{B_j}(y) \quad (2.4)$$

$$i = 1, 2$$

$$j = 1, 2$$

$$k = 2(i - 1) + j$$

**Capa 3.** Esta capa está compuesta por  $i$  nodos circulares denotados por la letra N (nodos fijos). el  $i$ -ésimo nodo circular en esta capa calcula la fuerza de tiro ponderada de la siguiente manera:

$$O_i^3 = \bar{w}_i = \frac{w_i}{w_1 + w_2} \quad (2.5)$$

$$i = 1, 2$$

donde  $\bar{w}_i$  representa la fuerza de tiro normalizada (o ponderada).

**Capa 4.** Esta capa está compuesta por  $i$  nodos cuadrados (nodos adaptables). Las salidas de cada nodo en esta capa son el producto de un polinomio de primer orden tipo Sugeno y la fuerza de tiro normalizada.

$$O_i^4 = \bar{w}_i f_i = \bar{w}_i (f_i = p_i x + q_i y + r_i) \quad (2.6)$$

$$i = 1, 2$$

donde  $\bar{w}_i$  es la salida de la capa 3 y  $\{p_i x + q_i y + r_i\}$  es el conjunto de parámetros.

**Capa 5.** Esta capa está compuesta por un solo y fijo nodo etiquetado donde la

letra  $\Sigma$ . Este nodo calcula el total de salidas como una sumatoria, como se muestra:

$$O_i^5 = \sum_{i=1}^{n=2} f_i \bar{w}_i = \frac{f_1 w_1 + f_2 w_2}{w_1 + w_2} \quad (2.7)$$

### 2.4.5. Desarrollo, prueba y consideraciones de ANFIS

ANFIS tiene dos conjuntos de parámetros ajustables, los parámetros de premisa en la primera capa y los parámetros consiguientes en la cuarta capa. El proceso de aprendizaje implica ajustar la premisa y los parámetros consiguientes por separado hasta que se logre la respuesta deseada del FIS (siglas en inglés para Fuzzy Inference System). Este proceso implica un rápido entrenamiento y adaptación de FIS utilizando un algoritmo de aprendizaje híbrido, que combina los mínimos cuadrados (LS) y los algoritmos de propagación hacia atrás (Back Propagation, BP). En el primer paso, los parámetros de la función de pertenencia (MF) a la premisa son fijos y la salida ANFIS se expresa como una combinación lineal de los parámetros consiguientes. En este punto, el método de mínimos cuadrados se utiliza para estimar los valores óptimos de los parámetros consiguientes. La fijación de los parámetros de la premisa en esta etapa ayudará a reducir el espacio de búsqueda y, por lo tanto, a acelerar la convergencia durante el proceso de entrenamiento. Los algoritmos de aprendizaje híbridos utilizan un proceso de dos pasos para lograr este objetivo. En el primer paso, los parámetros de la premisa se mantienen fijos, las señales se propagan hacia adelante desde la capa 1 a la capa 4 y los parámetros consiguientes se encuentran por el método de mínimos cuadrados. En el segundo paso, los parámetros consiguientes son fijos, mientras que las señales de error se propagan hacia atrás desde la salida hasta el final de la entrada, donde los parámetros de la premisa se actualizan mediante el algoritmo estándar de BP (Jang, 1993). El algoritmo de propagación hacia atrás utiliza el método de descenso de gradiente (GD) para obtener parámetros de premisa. Sin embargo, se utilizan varios algoritmos no lineales de mínimos cuadrados para estimar los parámetros consecuentes, como el algoritmo de Gauss-Newton, Levenberg-Marquardt o el método del gradiente conjugado. En seguida se muestra

un resumen de las ventajas y desventajas de los algoritmos principales utilizados en ANFIS (Madsen et al., 2004).

Gradiente descendiente (GD). Ventajas: Funciona en espacios de cualquier número de dimensiones, incluso en los de dimensión infinita. Desventajas: Relativamente lento cerca del mínimo. Puede tomar muchas iteraciones para calcular un mínimo local con la precisión requerida. Para funciones no diferenciales, los métodos de gradiente están mal definidos.

### Algoritmo de Levenberg-Marquardt (LMA)

- **Ventajas:** Puede encontrar la solución incluso si comienza muy lejos del mínimo óptimo. Un algoritmo popular de ajuste de curvas aplicado en muchas aplicaciones de software que involucran soluciones a problemas genéricos de ajuste de curvas.
- **Desventajas:** Puede converger a un mínimo local en lugar de global.

### Gradiente conjugado (CG)

- **Ventajas:** Puede verse como un método directo, ya que puede producir la solución exacta después de un número finito de iteraciones.
- **Desventajas:** Inestable con respecto a pequeñas perturbaciones.

### Gauss-Newton (GN):

- **Ventajas:** No requiere el cálculo de las segundas derivadas, lo que puede ser difícil de encontrar.
- **Desventajas:** La convergencia no está garantizada (incluso la convergencia local). Si la estimación inicial está lejos del mínimo deseado o la matriz está

mal condicionada, el algoritmo puede converger lentamente o no converger en absoluto.

Como puede verse, cada algoritmo tiene ventajas y limitaciones en términos de complejidad computacional, velocidad y convergencia. Sin embargo, el algoritmo de Levenberg-Marquardt (LMA) ha ganado la mayor popularidad en la resolución de problemas no lineales. La identificación de una buena estructura ANFIS requiere la implementación de un aprendizaje eficiente de descenso de gradiente a los parámetros de la función de membresía. El uso de las técnicas de agrupación en clústeres para encontrar reglas de FIS tiene la ventaja de estar más adaptado a los datos de entrada que cuando se genera FIS sin usar agrupación en clústeres. Esto puede ayudar a eliminar el problema de la explosión combinatoria de reglas, especialmente con datos de entrada de mayor dimensión. La agrupación en clúster se puede utilizar para identificar los grupos de conjuntos de datos grandes en un conjunto de datos dado para producir una representación concisa del comportamiento del sistema. Cuando existe poco o ningún conocimiento previo de los datos, se puede utilizar el enfoque de agrupamiento difuso para desarrollar el modelo difuso. Las funciones de pertenencia y las reglas difusas asociadas se pueden determinar con la ayuda de algunos métodos de agrupación, agrupando los conjuntos de datos en agrupaciones o subconjuntos. Esto dará como resultado un conjunto de centros de agrupamiento que actúan como puntos de datos prototípicos que describen un modo característico específico del sistema y representan el núcleo de la regla difusa SI-ENTONCES. En la agrupación sustractiva, un algoritmo eficiente de una pasada estima el número de agrupación y los centros en un conjunto de datos específico. Los centros del clúster se pueden usar para generar el sistema primario de inferencias difusas de tipo Sugeno que es capaz de modelar el comportamiento de los datos. Finalmente, ANFIS ajusta los parámetros del modelo neurodifuso (Jumah y Mujumdar, 2005).

### 2.4.6. Trabajos previos sobre ANFIS

Bagheri et al. (2015) investigaron y desarrollaron modelos físicos y modelos ANFIS. El resultado que se obtiene de este estudio son correlaciones de 0.51, 0.78, 0.78 y 0.82 entre los datos experimentales y los modelos físico. Mientras que, las correlaciones de los datos experimentales y el modelo ANFIS son de 0.936, 0.935, 0.936 y 0.986. Según algunos análisis de errores, los resultados obtenidos del modelo ANFIS son la configuración más apropiada para la predicción de la eficiencia energética en comparación con el modelo empírico (Bagheri et al., 2015).

Prakash y Kumar (2014) utilizaron ANFIS para predecir la temperatura de piloncillo, la temperatura y el contenido de humedad en el aire de un secador solar tipo invernadero durante su operación bajo convección natural. Para determinar y calcular la temperatura del piloncillo, la temperatura y la humedad dentro del secador solar tipo invernadero en función de la intensidad de la radiación solar y la temperatura ambiente utilizaron el software MATLAB. El resultado de esta investigación se obtiene con rangos de 0.7% y 1.0% de error. El coeficiente de correlación se obtiene entre 0.90 y 0.98 (Prakash y Kumar, 2014).

ANFIS se utiliza en el área de la modelación y operación de sistemas mal definidos e inseguros (Akpınar et al., 2006). La ventaja de ANFIS es el mapeo de entrada-salida basado en el conocimiento humano y los pares de datos de entrada-salida especificados (Jang, 1993).

## 2.5. Secado de hojas

Las hojas verdes tienden a perecer rápidamente y tampoco están disponibles en cantidad suficiente durante todo el año, ya que la mayoría son estacionales (Vyankatrao, 2015). El alto contenido de humedad inherente en las hojas debe reducirse rápidamente a un porcentaje de contenido de humedad residual aceptable para evitar

## 2.5. Secado de hojas

---

cualquier reacción enzimática u oxidación (Lin et al., 2010). Las hojas normalmente pierden hasta el 85 % de su peso en el secado (Chen y Mujumdar, 2006). El secado general da como resultado la concentración de nutrientes, aunque, durante el proceso de secado, pueden producirse varias pérdidas de componentes con bajo punto de ebullición que afectan la composición nutricional, física y química de las hojas secas. En general, se informa que las hojas secas tienen niveles de nutrientes activos que son tres o cuatro veces más altos que los de las hojas frescas (Navale et al., 2014; Joshi y Mehta, 2010).

La clasificación de las hojas según su propósito se muestra en la Figura 2.6. Las hojas como la moringa, el perejil, el coriandro, la ortiga, la malva y el eneldo se usan ampliamente con fines culinarios por su sabor y aroma distintivos. Además de mejorar el sabor, también se utilizan para adornar varios platos para hacerlos visualmente atractivos. Las hojas verdes son típicamente bajas en calorías, bajas en grasa, altas en proteínas, altas en hierro, tienen fibra dietética, calcio y muy altas en fitoquímicos como la vitamina C, vitamina K, luteína, carotenoides y ácido fólico. El valor terapéutico alcanzado mediante el uso de hierbas medicinales para el tratamiento y la prevención de enfermedades está aumentando rápidamente. Tulsi, Mint, Stevia, Banana, Neem, Karanj, Artemisiadracunculus, Kalmegh, etc. son algunos ejemplos de hojas medicinales comunes de la India (Babu et al., 2018).

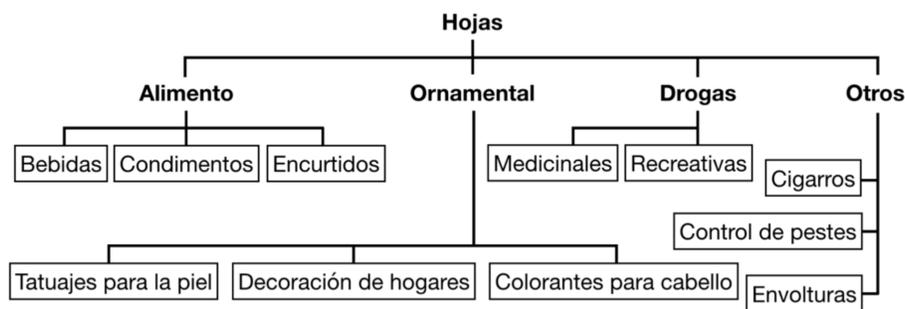


Figura 2.6: Clasificación de hojas (Babu et al., 2018).

Las hojas comestibles también se usan para condimentar alimentos, como el

## 2.5. Secado de hojas

---

orégano y el romero. Las hojas también son ampliamente utilizadas para hacer encurtidos. Algunas de las hojas más utilizadas son la hoja de uva, la hoja de cerezo, la col, la hoja de cobre, la hierba india, etc.

Las hojas también se elaboran para hacer bebidas como el té. Algunas hojas se utilizan para preparar tintes naturales. Una de estas hojas es la henna, que se usa en gran medida para el arte corporal y la coloración del cabello. Las hojas de algunas hierbas pueden repeler insectos no deseados y prevenir plagas. Menta, menta verde, menta y pennyroyal son algunas de estas hierbas que sirven como excelentes repelentes de insectos. Los aceites naturales y el aroma de estas hierbas cuando se plantan alrededor de una casa pueden ayudar a mantener alejados a criaturas no deseadas como moscas, ratones, hormigas, pulgas, polillas, etc. Las hojas de plátano se siguen utilizando tradicionalmente como platos para servir, ya que aumentan el aroma y el sabor cuando se sirven alimentos calientes. Los antioxidantes naturales presentes en las hojas se liberan como resultado del calor de los alimentos calientes que se sirven directamente en una hoja de plátano. También sirven como envoltorios de alimentos. Las hojas de palmera, *Patravaleaves*, *Beautiasuperba*, *Beutiamonosperma* y *Bauhinia frondosa* (hojas de Sal u hojas de Seali) y hojas secas caídas también pueden emplearse como platos y vasos ecológicos (Babu et al., 2018).

Las drogas recreativas más populares que se usan en el mundo son el tabaco, la cafeína, la cocaína, la mariguana. La mayoría de estas drogas adictivas están hechas de hojas de plantas como la planta de coca, el *nicotianatabacum*, etc. En la naturaleza, las hojas coloridas son a menudo mucho más atractivas que muchas otras. las flores Las plantas con follaje colorido son una vista popular en otoño. Sin embargo, para ensamblar una exhibición interior de follaje de otoño, es útil si estas hojas se secan y preservan primero. Las hojas secas pintadas también se usan popularmente para la decoración de interiores.

El secado de las hojas se realiza por métodos naturales o artificiales. Las hojas caídas (debido a la estación del año) o muertas se recolectan del área de la planta y

se extienden en una hoja para un secado natural en un lugar con poca humedad. Este proceso puede durar desde unos pocos días hasta más de una semana, dependiendo de la humedad atmosférica. El secado al sol abierto, el secado a la sombra y el secado al viento a temperatura ambiente son métodos tradicionales de secado natural que aún se utilizan en las zonas rurales de la India. Se han empleado varios métodos de secado artificial, como el método de convección forzada, para secar grandes cantidades de hojas a un ritmo más rápido y con una calidad aceptable (Prabhat, 2014). Los métodos de secado por convección forzada considerados son el secado en bandejas (50-80°C), el secado en cinta transportadora, el secado al vacío (60-75°C), el secado químico, los métodos especiales de secado como el secado por congelación (- 50°C), secado por microondas (180-900 W), secado por radiofrecuencia (1-300 MHz), etc.

### 2.5.1. Factores que influyen en el secado de hojas

El uso de parámetros de secado inapropiados da como resultado la pérdida de calidad y componentes nutritivos durante el secado. Por lo tanto, las hojas de diferentes tipos requieren condiciones de operación específicas y óptimas, cada una con sus propias ventajas que proporcionarán la calidad requerida constante del producto final. Las condiciones de secado tales como la condición climática, el tiempo de secado, el arreglo en las mesas de secado y la humedad relativa del aire deben controlarse para garantizar la calidad de humedad final deseada.

La velocidad a la que se evapora el agua en el secado al aire libre depende de las condiciones climáticas externas. Según la ubicación geográfica y la estación del año, la temperatura del aire y la humedad relativa, varían. En condiciones climáticas cálidas y secas, las hojas expuestas se secan en unos pocos días, ya que el agua se evapora muy rápidamente. Por otro lado, el secado puede llevar más tiempo en condiciones climáticas húmedas, según el contenido de humedad inicial, el movimiento del aire y la temperatura de secado, la humedad relativa y la profundidad de las hojas en la bandeja que se colocan. El efecto del clima externo (la sombra y el viento) será

predominante en el secado al Sol.

En los secadores mecánicos como la bomba de calor y los secadores de bandejas, generalmente el consumo de energía será menor si las condiciones ambientales son secas, ya que se reduce la energía extra necesaria para deshumidificar el aire.

### **Temperatura del aire de secado**

Cuando la temperatura del aire de entrada aumenta, la humedad relativa será menor y el potencial de secado se incrementará. El aumento de la temperatura con la circulación reducida tiene control sobre la velocidad de secado al aumentar la capacidad de retención de humedad del aire, y también al acelerar la velocidad de difusión de la humedad a través de las hojas (Premi et al., 2012). Por otro lado, cuando la humedad relativa es fija, la mayor temperatura del aire de alimentación aumenta la velocidad de secado (Walker y Niyomkarn, 1993).

En un día cálido, se puede evaporar más agua a ya que se dispone de más energía térmica para aumentar la velocidad de evaporación. En contraste, el agua tiene una energía térmica inadecuada para su evaporación cuando el clima es frío afuera. Por lo tanto, el secado disminuye considerablemente cuando hace frío. Esta observación es confirmada por numerosos estudios (Costa-Ariany et al., 2014; Demir et al., 2004).

Durante muchos años, las hojas se han secado en secadores con temperaturas que oscilan entre 40 y 60°C (Miraei-Ashtiani et al., 2017; Erbay e Icier, 2009). Se encontró que la temperatura de secado entre 50 y 60°C era factible para secar varias plantas medicinales (Rocha et al., 2011). Se ha indicado que la temperatura de secado de 50°C causa una pérdida mínima de calidad en el secado de hierbas y especias (Shaw et al., 2007). Sin embargo, durante el secado con aire caliente, las hojas sufren cambios físicos, estructurales, químicos y nutricionales que pueden afectar los atributos de calidad como la textura, el color, el sabor y el valor nutricional (Ahmad-Qasem

et al., 2013). La pérdida de ingredientes activos es mayor cuando aumenta la temperatura del aire. Esto se debe a la evaporación de compuestos de baja volatilidad durante el secado (Hussein et al., 2015; Poomsa-ad et al., 2011). Además, se observa una notable pérdida de color a altas temperaturas (aprox. 60°C) como resultado de la degradación de la clorofila en las células de la hoja (Ardestani et al., 2015). Se observó descomposición cuando las hojas de betel se secaron a 80°C (Pin et al., 2009). Las temperaturas muy altas en la etapa inicial pueden causar el endurecimiento, la formación de ampollas o el quemado (Akhtaruzzaman et al., 2013; Dwivedy et al., 2012). Incluso si estos efectos son compensados por una mayor velocidad de evaporación, esto resulta en una dureza indeseable.

Por otro lado, el aire húmedo de muy baja temperatura puede estimular la descomposición al acelerar la actividad de la enzima dentro de las hojas o incluso provocar un ataque microbiano y, en consecuencia, disminuir la velocidad de secado (Kusturee et al., 2012).

La temperatura del aire de secado uniforme es apropiada durante estos dos procesos de secado distintos, garantiza la consistencia en la calidad del producto final. El control de la temperatura de escape también es igualmente importante, ya que muestra la cantidad de calor que se ha utilizado del aire de secado entrante. El rango de temperatura del aire de 40-60°C es el más adecuado para secar hojas sin una pérdida significativa de calidad.

### **Humedad relativa del aire de secado**

La temperatura y la humedad relativa del aire entrante y saliente calentado están relacionados con la captación de humedad del aire y el producto a secar. La humedad relativa es la razón entre la presión parcial de vapor de agua y la presión parcial de vapor de agua a saturación, a la misma temperatura. Cuanto mayor está presente en el aire (alta humedad relativa), menor será la velocidad a la que el agua puede

evaporarse y el aire puede contener menos humedad solamente. La humedad relativa se puede reducir aumentando la temperatura del bulbo seco del aire para evaporar la humedad del material.

Si la temperatura del aire caliente se mantiene constante, una humedad relativa más baja en el ambiente, resulta en una mayor tasa de secado debido al mayor gradiente de humedad entre el material alimenticio y el ambiente, como resultado de la reducción del contenido de humedad en las capas superficiales cuando la humedad relativa se reduce.

### **Razón de flujo del aire de secado**

El tiempo de secado y la calidad del producto dependen de la velocidad del aire y de su circulación uniforme. Los secadores pasan, generalmente el con una temperatura de 40-50°C. El aire en la superficie del producto que ha recogido la humedad se reemplaza continuamente por aire con baja humedad relativa para eliminar la humedad (Rocha et al., 2012). A una temperatura constante, la tasa de secado máxima posible se obtiene mediante una rápida circulación de aire a través de la superficie del producto, lo que resulta en una rápida eliminación de la humedad por evaporación. Esto se debe a que el flujo de aire más rápido es mejor para barrer la capa límite de aire estancada alrededor del producto alimenticio húmedo. Pero una velocidad más alta a menudo puede resultar en el arrastre de las hojas. Además, no siempre se recomienda una mayor tasa de secado, ya que puede causar mayores tensiones que pueden causar daños al producto (grietas o distorsiones). A un rango inferior de velocidad del ventilador, el flujo de aire a través de la pila es principalmente un flujo laminar, y la transferencia de calor entre la superficie del producto y la corriente de aire en movimiento no es particularmente efectiva (Walker y Niyomkarn, 1993). La baja efectividad (externamente) de la transferencia de calor no es un problema porque el movimiento de humedad interno es la limitación clave para la remoción de humedad.

Si el volumen de aire está por debajo del valor normal requerido para un secado efectivo del producto, la temperatura deberá aumentarse para producir la misma cantidad de calor. Al aumentar el volumen de aire, la capacidad de un secador se puede aumentar hasta cierto punto. Una menor velocidad del ventilador, un pequeño conducto de escape y una válvula de amortiguación parcialmente cerrada dan como resultado un volumen reducido de flujo de aire. Existe una restricción para aumentar el flujo de aire, ya que un flujo de aire excesivo puede ocasionar la expulsión de las partículas pequeñas (polvo de la hoja).

En general, se necesitan altas temperaturas, baja humedad relativa y alta velocidad del aire para un secado más rápido (Karimi et al., 2012; Erbay e Icier, 2009) al tiempo que se garantiza que la calidad del producto no se vea comprometida. Bogers y colaboradores encontraron que la velocidad de secado del aire no tiene un impacto significativo en el comportamiento de secado de las capas delgadas. Esto parece estar en conflicto con los casos prácticos, donde el flujo de aire a menudo limitaba la capacidad de los secadores (Bogers et al., 2006).

### 2.5.2. Secado de estevia

Las hojas de Stevia pueden consumirse frescas o secas y trituradas, o pueden tener los edulcorantes activos extraídos como sólidos cristalinos o en una solución. El edulcorante comercial está hecho de hojas secas (10-13 % de humedad). La hoja seca tiene un mayor contenido de glucósidos de esteviol: 9 a 13 % de esteviósido y 6 a 8 % de rebaudiósido A (reb-A) (Rojas y Waldemar, 2009).

El secado de la planta y las hojas de Stevia se logra típicamente por exposición directa a la luz solar o por hornos. El método tradicional de secado al sol es utilizado principalmente por agricultores rurales debido a su naturaleza económica y simple, pero tiene varias limitaciones: secado inadecuado, ataques de organismos co-

## 2.5. Secado de hojas

---

mo insectos, aves y roedores, daños estructurales, exposición a lluvias y pérdidas de componentes volátiles y nutrientes, los cuales pueden degradar la calidad del producto final. Las ramas deben exponerse al sol durante 4 a 6 h. Se sugiere que el mejor momento para recolectar y almacenar las hojas es cuando se vuelven quebradizas con 10 a 12 % de humedad (Rojas y Waldemar, 2009).

En el proceso de secado a sol abierto, las ramas y las hojas de estevia se colocan sobre un trozo de tela o plástico apropiado sin sobreponerlas y se dejan hasta el atardecer, y si no están completamente secas, se recolectan y almacenan en el interior. Este proceso se continúa día tras día, hasta que se completa, y las hojas se separan posteriormente de los tallos. En condiciones de baja humedad y capas finas, la humedad en las hojas se puede reducir de 80 % a 10 % en un período de 9 horas a 10 horas. (Oddore, 1999). Si no se seca rápidamente después del corte, la calidad se deteriora debido a la oxidación, y se pierde hasta un tercio del contenido de esteviósido después de tres días de exposición (Oddore, 1999).

Es muy conveniente usar colectores solares de aire para mejorar la eficiencia de varias modalidades de secado solar (Ekechukwu y Norton, 1999). En general, el rendimiento de un secador depende en gran medida de las variaciones de aislamiento, temperatura ambiente y humedad relativa (Ekechukwu y Norton, 1999).

Se sabe que las condiciones de secado específicas afectan la calidad de las hojas finales (García-Navarrete, 2016). En particular, hay pocos trabajos publicados sobre el secado solar de las hojas de estevia, incluida la cinética en un túnel de secado solar por convección y los modelos matemáticos propuestos para el secado de las hojas (Lemus-Mondaca et al., 2014).

# Bibliografía

- Agatonovic-Kustrin, S. y R. Beresford (2000). “Basic concepts of artificial neural network (ANN) modeling and its application in pharmaceutical research”. En: *J Pharm Biomed Anal* 22, págs. 711-727.
- Ahmad-Qasem, M. H., E. Barrón-Catalán, V. Micol, A. Mulet y V. J. García-Pérez (2013). “Influence of freezing and dehydration of olive leaves (var. Serrana) on extract composition and antioxidant potential”. En: *Food Res Int* 50, págs. 189-196.
- Ahmadi, M., M. A. Ahmadi, S. A. Sadatsakkak y M. Feidt (2015). “Connectionist intelligent model estimates output power and torque of stirling engine”. En: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 50, págs. 871-883.
- Akhtaruzzaman, M., M. R. Ali, M. M. Rahman y M. S. Ahamed (2013). “Drying tea in a Kilburn vibro fluid bed dryer”. En: *J Bangladesh Agric Univ* 11.1, págs. 152-158.
- Akpinar, E., A. Midilli e Y. Bicer (2003). “Single layer drying behaviour of potato slices in a convective cyclone dryer and mathematical modelling”. En: *Energy Convers Manag* 44.10, págs. 1689-1705.
- Akpinar, E., Y. Bicer y F. Cetinkaya (2006). “Modelling of thin layer drying of parsley leaves in a convective dryer and under open sun”. En: *Food and Energy* 75.3, págs. 308-315.
- Ardestani, S. M. A., M. Sadeghi, B. Beheshti y N. Hamdami (2015). “Vibro-fluidized bed heat pump drying of mint leaves with respect to phenolic content, antioxidant activity and color indices”. En: *Chem Ind Chem Eng Q* 21.2, págs. 239-247.

- Babu, A., G. Kumaresan, V. Raj y R. Velraj (2018). “Review of leaf drying: Mechanism and influencing parameters, drying methods, nutrient preservation, and mathematical models”. En: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 90, págs. 536-556.
- Bagheri, N., T. Nazilla y H. Javadikia (2015). “Development and evaluation of an adaptive neuro fuzzy interface models to predict performance of a solar dryer”. En: *Agric Eng Int: CIGR J* 17.2, págs. 112-121.
- Bala, B. K. (1998). *Solar drying systems: simulation and optimization*. Inf. téc. Agrotech Publishing, India.
- Bala, B. K. y J. L. Woods (1994). “Simulation of the indirect natural convection solar drying of rough rice”. En: *Solar Energy* 53.3, págs. 259-266.
- (1995). “Optimization of a natural convection solar drying system”. En: *Energy* 20, págs. 285-294.
- Bena, B. y R. J. Fuller (2002). “Natural convection solar dryer with biomass back-up heater”. En: *Solar Energy* 72.1, págs. 75-83.
- Berenji, H. R. y P. Khedkar (1992). “Learning and Tuning Fuzzy Logic Controllers through Reinforcements”. En: *IEEE Transactions on Neural Networks* 3, págs. 724-740.
- Bogers, R. J., L. E. Craker y D. Lange (2006). *Medical and aromatic plants*. The Netherlands: Springer.
- Boonthumjinda, S. (1980). “Performance of the AIT solar rice dryer during the wet season”. En: *Proceedings of symposium on solar science and technology*. Bangkok.
- Brenndorfer, B., L. Kenned, C. O. O. Bateman, D. S. Trim, G. C. Mrema y C. Werele-Brobba (1985). *Solar dryers: their role in post-harvest processing*. Inf. téc. Marlborough House, Pall Mall, London: Commonwealth Science Council.
- Buragohain, M. y C. Mahanta (2008). “A novel approach for ANFIS modelling based on full factorial design”. En: *Appl Soft Comput* 8, págs. 609-625.
- Chauhana, P. S., A. Kumar y P. Tekasakul (2015). “Applications of software in solar drying system: A review”. En: *Renew Sustain Energy Rev* 51, págs. 1326-1337.
- Chen, G. y A. S. Mujumdar (2006). *Drying of herbal medicines and tea. Handbook of industrial drying*. Third. CRC Press.

- Costa-Ariany, B. S., F. B. Freire, M. C. Ferreira y J. T. Freire (2014). “Convective drying of regular mint leaves: analysis based on fitting empirical correlations, response surface methodology and neural networks”. En: *Acta Sci* 6.2, págs. 271-278.
- Czogala, E. y J. Leski (2000). *Neuro-Fuzzy Intelligent Systems; studies in fuzziness and soft computing*. Germany: Springer.
- Demir, V., T. Gunhan, A. K. Yagciolu y A. Degirmencioglu (2004). “Mathematical modeling and the determination of some quality parameters of air-dried bay leaves”. En: *Biosyst Eng* 88.3, págs. 325-335.
- Diamante, L. M. y P. A. Munro (1991). “Mathematical modelling of the thin layer solar drying of sweet potato slices”. En: *Solar Energy* 51.4, págs. 271-276.
- Doe, P. E., M. Ahmed, M. Muslemuddin y K. Sachithanathan (1997). “A polythene tent drier for improved sun drying of fish”. En: *Food Technology in Australia*, págs. 437-444.
- Dwivedy, S., K. Rayaguru y G. R. Sahoo (2012). “Effect of drying methods on quality characteristics of medicinal Indian borage (*Coleus aromaticus*) leaves”. En: *J Food Process Technol* 3.11.
- Eckert, M. (1998). “Mango drying: a tree product value and income generating enterprise in rural areas”. En: *ITFSP internal paper* 19.
- Ekechukwu, O. V. y B. Norton (1997). “Experimental studies of integral-type natural circulation solar energy tropical crop dryers”. En: *Energy Convers Manag* 38, págs. 1483-1500.
- (1999). “Review of solar energy drying III: low temperature air-heating solar collectors for crop drying applications”. En: *Energy Convers Manag* 49.6, págs. 657-667.
- Erbay, Z. y F. Icier (2009). “Optimization of hot air drying of olive leaves using response surface methodology”. En: *J Food Eng* 91, págs. 530-541.
- Exell, R. H. B. y S. Kornsakoo (1978). “A low cost solar rice dryer”. En: *Approp Technol* 5.1, págs. 23-24.
- Figueiredo, M. y F. Gomide (1999). “Design of fuzzy systems using neuro-fuzzy networks”. En: *IEEE Transactions on Neural Networks* 10.4, págs. 815-827.
- García-Navarrete, F. J. (2016). “Evaluación de los efectos del proceso de secado sobre la calidad de la Stevia”. Tesis de maestría. Universidad Nacional de Colombia.

- Gunnewiek, L. H., E. Brundrett y K. G. T. Hollands (1996). "Flow distribution in unglazed transpired plate solar air heaters of large area". En: *Solar Energy* 58.6, págs. 227-237.
- Hussein, I. I., M. Mamman y M. Abdulrasheed (2015). "Effect of varying drying temperature on the antibacterial activity of Moringaoleifera Leaf (Lam)". En: *J Pharm Biol Sci* 10.4, págs. 39-43.
- Hydari, A. y H. Suharwadji (1981). *Application and future prospect of onion solar dryer*. Inf. téc. Bandung, Indonesia.: Applications of solar energy in agricultural y post-harvest activities.
- Ibrahim, M. N. (1978). *Utilization of solar energy for crop drying in Malaysia*. Inf. téc. Manila, Philippines: Proceedings of solar drying workshop.
- Jang, J. S. R. (1993). "ANFIS: adaptive-network-based fuzzy inference system". En: *IEEE Trans Syst Man Cybern* 23, págs. 665-685.
- Janjai, S. y B. K. Bala (2012). "Solar drying technology". En: *Food Energy Reviews* 4, págs. 16-54.
- Jeffery, A. y A. Mary (2002). *Value adding to small farms through processing excess production*. Inf. téc. Energy y Sustainable Agriculture Program.
- Johari, E. y A. Jusoo (1980). *A preliminary study on the use of solar energy for drying of paddy*. In: *Proceedings of workshop on alternative renewable sources of energy for rural applications*. Inf. téc. Serdang, Malaysia: Universiti Pertanian Malaysia.
- Joshi, P. y D. Mehta (2010). "Effect of dehydration on the nutritive value of drumstick leaves". En: *J Metab Syst Biol* 1.1, págs. 5-9.
- Juang, F. C. y T. Chin (1998). "An on-line self-constructing neural fuzzy inference network and its applications". En: *IEEE Transactions on Fuzzy Systems* 6, págs. 12-32.
- Jumah, R. y A. S. Mujumdar (2005). "Modeling intermittent drying using an adaptive neuro-fuzzy inference system". En: *Drying Technology* 23.5, págs. 1075-1092.
- Kalogirou, S. A. (2001). "Artificial neural networks in renewable energy systems applications: a review". En: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 5, págs. 373-401.

- Kalogirou, S. A. (2004). “Optimization of solar systems using artificial neural networks and genetic algorithms”. En: *Appl Energy* 77, págs. 384-405.
- Karimi, F., S. Rafiee, A. Taheri-Garavand y M. Karimi (2012). “Optimization of an air-drying process for Artemisia absinthium leaves using response surface and artificial neural network models”. En: *J Taiwan Inst Chem Eng* 43, págs. 29-39.
- Kasabov, N. y Q. Song (1999). *Dynamic Evolving Fuzzy Neural Networks with ‘m-out-of-n’ Activation Nodes for On-Line Adaptive Systems*. Inf. téc. Departement of Information Science, University of Otago.
- Kassem, A. E. S., M. A. Al-Sulaiman y A. E.M. A. y S. S. Jassem (2011). “Predicting drying efficiency during solar drying process of grapes clusters in a box dryer using artificial neural network”. En: *Australian Journal of Basic and Applied Science* 5.6, págs. 230-241.
- Kosko, B. (1992). *Neural Networks and Fuzzy Systems: A Dynamical System Approach to Machine Intelligence*. Inf. téc. Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice Hall.
- Kusturee, J., Y. Mudtapha y R. Phadungsak (2012). “Design and analysis of the commercialized drier processing using a combined unsymmetrical double-feed microwave and vacuum system (case study: tea leaves)”. En: *Chem Eng Process* 49, págs. 89-95.
- Laul, M. S., S. D. Bhalerac, V. R. Rane y B. L. Amla (1970). “Studies on the sun drying of chillies”. En: *Indian Food Packer* 24, págs. 22-25.
- Lawand, T. (1975). *A survey of solar agricultural dryers*. Inf. téc. Montreal, Canada: Brace Research Institute.
- (1977). *he potential of solar agricultural dryers in developing areas*. Inf. téc. Brace Research Institute.
- Lemus-Mondaca, R. A., A. Vega-Galez, N. O. Moraga y S. Astudillo (2014). “Dehydration of Stevia rebaudiana Berton leaves: kinetics, modelling and Energy Features”. En: *J Food Process Preserv* 50.5, págs. 508-520.
- Lim, T. G. y C. Ng (1982). “Further investigation of a forced-convection solar paddy dryer”. Tesis doct. University of Malaya.

- Limtragool, J. (1984). *Solar groundnut dryers project in Northeast Thailand*. Inf. téc. RERIC NEWS, págs. 7-8.
- Lin, T. C. y C. S. Lee (1991). “Neural Network Based Fuzzy Logic Control and Decision System”. En: *IEEE Transactions on Computers* 49.12, págs. 1320-1336.
- Lin, X., L. Zhang, H. Lei, H. Zhang, Y. Cheng y R. Zhu (2010). “Effect of drying technologies on quality of green tea”. En: *International Agricultural Engineering Journal* 19.3.
- Madsen, K., H. B. Nielsen y O. Tingleff (2004). *Methods for non-linear least squares problems*. Inf. téc. Technical University of Denmark: Informatics y Mathematical Modelling.
- Mah, Y. H. y N. H. Chin (1980). “Preliminary studies of an absorption refrigerator and a natural convection solar paddy dryer”. Tesis doct. University of Malaya.
- Mellit, A. y A. M. Pavan (2010). “Performance prediction of 20 kWp grid-connected photovoltaic plant at Trieste (Italy) using artificial neural network”. En: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 51, págs. 2431-2442.
- Mellit, A., S. A. Kalogirou, L. Hontoria y S. Shaari (2009). “Artificial intelligence techniques for sizing photovoltaic systems: a review”. En: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 13, págs. 406-419.
- Miraei-Ashtiani, S. H., A. Salarikia y M. Reza-Golzarian (2017). “Analyzing drying characteristics and modeling of thin layers of peppermint leaves under hot-air and infrared treatments”. En: *Inf Process Agric*.
- Nauck, D. y R. Kurse (1997). *Neuro-Fuzzy Systems for Function Approximation*. Inf. téc. 4th International Workshop Fuzzy-Neuro Systems.
- Navale, S. R., S. Upasni, V. M. Harpale y K. C. Mohite (2014). “Effect of solar drying on the nutritive value of Fenugreek leaves”. En: *International Journal Engineering Advances Technologies* 4.2.
- Oddore, B. (1999). *How grow Stevia*. Inf. téc. Connecticut: INC Pawcatuck.
- Ong, K. S. (1981). *Results of Investigations into forced and natural convection solar air heater and crop dryer*. In: *Proceedings of regional Asia and Pacific workshop on the application of solar energy in agricultural and post-harvest activities*. Inf. téc. Bandung, Indonesia.

- Ong, K. S. (1986). *The State-of-art report on solar drying in ASEAN countries*. Inf. téc. Bangkok: FAO.
- Ong, K. S. y C. F. Than (1982). *A forcen convection solar paddy dryer*. Bulletin. Malaysia: Institution of Engineers.
- Oosthuizen, P. H. (1986). “A numerical study of the performance of natural free convective solar rice dryer”. En: *Hemisphere Press, Drying*, págs. 670-677.
- (1988). “Modelling of an indirect natural convective solar rice dryer”. En: *9th symposium on engineering applications of mathematics*. University of Western Ontario, págs. 431-441.
- (1995). “The design of indirect solar rice dryers”. En: *J Eng Int Dev* 2, págs. 20-27.
- Pangavhane, D. R. y R. L. Sawhney (2002). “Review of research and development work solar dryers for grape drying”. En: *Energy Convers Manag* 43, págs. 45-61.
- Patial, R. y R. Gawanw (2016). “A review on solar tunnel greenhouse drying system”. En: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 56, págs. 196-214.
- PAU (1986). *Natural convection solar dryers*. Research Report. Punjab, India: College of Agricultural Engineering, Punjab Agricultural University.
- Pin, K. Y., T. G. Chuah, A. R. Abdull, C. L. Law, M. A. Rasadah y T. S. Y. Choong (2009). “Drying of betel leaves (*Piper betle* L.): quality and drying kinetics”. En: *Dry Technol: Int J* 27.1, págs. 149-155.
- Poomsa-ad, N., K. Deejing y L. Wiset (2011). “Performance of heat pump dryer for Kaffir lime leaves and quality of dried products under different temperatures and media”. En: *World Acad Sci Eng Technol* 5.
- Prabhat, K. (2014). “Vacuum-microwave drying characteristics of spearmint leaves”. En: *J Food Res Technol* 2.2, págs. 87-92.
- Prakash, O. y A. Kumar (2014). “ANFIS modelling of a natural convection greenhouse drying system ofor jaggery: an experimental validation”. En: *International Journal of Sustainable Energy* 32.2, págs. 316-335.
- Premi, M., H. Sharma y A. Upadhyay (2012). “Effect of air velocity and temperature on the drying kinetics of drumstick leaves (*Moringa oleifera*)”. En: *Int J Food Eng* 8.4.

- Rocha, R. P., E. C. Melo y L. L. Radünz (2011). "Influence of the drying process on the quality of medicinal plants: a review". En: *J Med Plants Res* 5.33, págs. 7076-7084.
- Rocha, R. P., E. C. Melo, A. J. Demuner, L. L. Radünz y H. Braun (2012). "Effect of drying air velocity on the quality of essential oil from lemon grass". En: *Glob Sci Technol* 5.1, págs. 23-31.
- Rojas, M. y S. Waldemar (2009). "Stevia, edulcorante orgánico del siglo XXI". Tesis doct. Lima, Perú: Universidad Nacional Agrarioa La Molina.
- Shaarma, V. K., A. Colagelo y G. Spagna (1995). "Experimental investigation of different solar driers suitable for fruits and vegetable drying". En: *Renew Energy*.
- Shaw, M., V. Meda, J. L. Tabil y A. Opoku (2007). "Drying and color characteristics of coriander foliage using convective thin layer and microwave drying". En: *J Microw Power Electomagn Energy* 41.2.
- Simate, I. N. (2003). "Optimization of mixed mode and indirect mode natural convection solar dryers". En: *Renew Energy* 28, págs. 435-453.
- Sodha, M. S., A. Dang, P. K. Bansal y S. B. Sharma (1985). "An analytical experimental study of open sun drying and a cabinet type dryer". En: *Energy Convers Mgmt* 25, págs. 263-271.
- Srivastava, G. K. y G. A. Sulebde (1984). "Solar drying of red chilli". En: *Indian Food Packer* 29.6, págs. 5-10.
- Sulzberger, S. N., N. Tschichold y S. Vestli (1993). "FUN: Optimization of Fuzzy Rule Based Systems Using Neural Networks". En: *Neural Networks*. Proceedings of IEEE. San Francisco, págs. 312-316.
- Tano, S., T. Oyama y T. Arnould (1996). "Deep Combination of Fuzzy Inference and Neural Network in Fuzzy Inference". En: *Fuzzy Sets and Systems* 82.2, págs. 151-160.
- Thanvi, K. O. y P. C. Pandey (1987). "Development of low cost solar agricultural dryer for arid regions of India energy in agricultural dryer for arid regions of India". En: *Energy Agri* 6, págs. 35-40.
- Tiwari, G. N. (2003). *Greenhouse Technology for Controlled Environment*. India: Narosa Publishing House.

- Tiwari, S., G. N. Tiwari e I. M. Al-Helal (2016). “Development and recent trends in greenhouse dryer: A review”. En: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 65, págs. 1048-1054.
- Tran, V. V., S. B. Mahmud y E. B. Ali (1980). “Experimental results of a continuous solar dryer for paddy”. En: *ENA GA 80*. Proceedings of MNC-WEC. Kuala Lumpur, Malaysia.
- Vieira, J., F. Morgado-Dias y A. Mota (2004). “Neuro-Fuzzy Systems: A survey”. En: *WSEAS Transactions on Systems* 3, págs. 414-419.
- Vyankatrao, N. P. (2015). “Effect of drying methods on nutritional value of some vegetables”. En: *Biosci Discov* 6.
- Walker, J. C. F. y L. Niyomkarn (1993). *Development of solar air heaters for a cabinet-type solar dryer*. Inf. téc. Manila, Philippines.
- Wibulswas, P. y S. Thaina (1980). “Comparative performances of cabinet dryers with separate air heaters”. En: *Fuel and power to rural communities in the third world, CEGET*. Domaine Universitaire de Bordeaux-Talence.
- Zadeh, L. A. (1965). “Fuzzy Sets”. En: *Information and Control* 8, págs. 338-353.
- Zaman, M. A. y B. K. Bala (1989). “Thin layer solar drying of rough rice”. En: *Sol Energy* 42, págs. 167-171.

## Capítulo 3

# Deshidratado de estevia (*Stevia rebaudiana, L.*) en un secador solar tipo invernadero

<sup>1</sup>Alejandro Guerrero Santana, <sup>2</sup>Irineo López Cruz, Raquel Salazar Moreno y Efrén Fitz Rodríguez.

### RESUMEN

La planta de estevia ha adquirido gran importancia y ha aumentado su consumo en el mundo, porque es un gran edulcorante natural, hasta 300 veces más dulce que el azúcar común (Sacarosa). Su mayor contenido edulcorante se concentra principalmente en hojas secas, por lo que es importante estudiar el proceso de secado. En este trabajo, se presenta la deshidratación experimental de las hojas de estevia en un Sistema Secador Solar Tipo Invernadero (SSSTI). Los resultados experimentales demostraron la viabilidad de esta técnica para el secado solar de las hojas de estevia. Se observó que el secador solar tipo invernadero tiene condiciones superiores en cuanto a tiempos de secado, mejor control de las condiciones de operación y mayor protección contra los efectos de la temperatura en comparación con la exposición

---

<sup>1</sup>gs.alejandro@igloud.com

<sup>2</sup>ilopez@correo.chapingo.mx

directa a la radiación solar. La cinética de secado fue muy similar entre las muestras y el equilibrio se alcanzó entre 5 y 6 horas. Los modelos Page y el exponencial de dos términos para la razón de secado fueron los que mejor se ajustaron a los datos experimentales con un  $R^2$  de 0.93 a 0.99 y un RMSE de 0.01 a 0.08.

## 3.1. Introducción

El secado de hojas al sol es un método tradicional, donde las hojas están directamente expuestas a la radiación solar al extenderlas sobre una alfombra o periódico en el suelo, o colgadas en cuerdas. Este método de secado diurno de pequeña capacidad se considera la mejor alternativa para los propietarios de grandes patios que optan por el secado por convección natural. La radiación solar calienta tanto las hojas como el aire circundante y, por lo tanto, el agua se evapora de las hojas (Gidado-Lima et al., 2014). Esto generalmente se realiza a una temperatura del aire atmosférico promedio de 28 a 40°C con una humedad relativa de menos del 60 %.

Para un secado al sol efectivo, se necesita aire seco, caliente y libre de partículas de polvo. Al no disponer de estas condiciones cuando se utiliza esta técnica, se presentan pérdidas y disminución en la calidad de las hojas (Pangavhane y Sawhney, 2002). Además, la ausencia de protección del producto aumenta la probabilidad de infestación por insectos, roedores y otros animales (Janjai y Bala, 2012; Prakash et al., 2016).

La tecnología de secado solar bajo cubierta, que permite el control de factores microclimáticos como la temperatura y la humedad relativa del aire, ha sido una solución a la problemática de mermas, baja calidad y contaminación de los productos (Yaldiz et al., 2001; Kipping et al., 2012; Colina-Irezabal, 2010). Uno de los sistemas de secado solar que destaca debido a su capacidad de procesamiento de producto, es el secador solar tipo invernadero (Janjai et al., 2009; Garduño, 2017b).

Todo sistema de secado solar debe ser diseñado en forma apropiada para satis-

### 3.1. Introducción

---

facilitar los requerimientos de un producto específico, condiciones climáticas del lugar para presentar un desempeño óptimo en términos de tiempo de secado y calidad final del producto. Esto significa que el diseño del secador está en función de factores ambientales y el producto a deshidratar. Pero los experimentos a gran escala con diferentes productos, estaciones del año, configuraciones del sistema pueden resultar muy costosos y requieren periodos prolongados (Bala y Woods, 1994). Por esto, el desarrollo de modelos matemáticos y simulación por computadora son una herramienta básica para predecir el comportamiento de un sistema de secado solar. Hasta ahora, el desarrollo de modelos matemáticos de los secadores solares se ha mantenido limitado en su mayor parte a los modelos basados en principios físicos, es decir, a la representación del sistema por medio de sistemas de ecuaciones diferenciales. Una alternativa recientemente utilizada a este tipo de modelos es la técnica basada en lógica difusa y redes neuronales artificiales (ambas dentro del área inteligencia artificial) que ha probado ser capaz de representar fenómenos de transferencia de calor y masa con precisión (Prakash et al., 2016). Los modelos neurodifusos ANFIS requieren grandes cantidades de datos debido a su naturaleza empírica.

El objetivo del presente trabajo es evaluar de manera experimental un secador solar tipo invernadero de forma parabólica, con cubierta de policarbonato y convección forzada, mediante pruebas de secado de hojas y tallos de estevia para obtener una cantidad suficiente de datos para construir modelos neurodifusos.

## **3.2. Materiales y métodos**

### **3.2.1. Descripción del secador solar tipo invernadero (SSS-TI)**

El sistema secador solar tipo invernadero (SSSTI), mostrado en la Figura 4.1, se encuentra ubicado en la Universidad Autónoma Chapingo, Texcoco, Estado de México (19° 29' N, 98° 53' O a 2,250 msnm). El SSSTI está orientado de norte a sur y sus dimensiones son 9 por 12 m de base por 2.4 m de altura, también cuenta con una superficie interior de 108 m<sup>2</sup> y un volumen aproximado de 211 m<sup>3</sup>. La estructura es de acero galvanizado, la cubierta es de policarbonato de doble capa de 6 mm de ancho y el piso es de concreto con un espesor de 0.15 m. El secador cuenta con cuatro entradas de aire de 1.23 m de ancho por 0.53 m de alto y una más (puerta) de 2 por 2 m, todas cubiertas con malla antiáfidos de 40 por 26 hilos. En la pared sur se encuentran instalados dos extractores con una capacidad de 9,435 m<sup>3</sup> por hora cada uno, los cuales son accionados con motores monofásico de 0.5 HP (373 W) cada uno y permiten la renovación del aire en el interior del secador en un tiempo aproximado de 40 s. En el interior del SSSTI se encuentran instaladas 24 mesas con charolas de 1.8 por 1.5 m, obteniendo así una superficie útil de secado de 64 m<sup>2</sup> (Garduño, 2017b).

Se realizaron cuatro experimentos de secado de hoja de estevia, en cada uno se utilizaron 75 kg de producto (incluyendo tallo y hoja). Los experimentos se llevaron a cabo los días 8, 10, 11 y 12 de mayo de 2018 e iniciaron a las 8:30 a.m., 9:11 a.m., 8:30 a.m. y 8:00 a.m., respectivamente. Los experimentos concluyeron cuando el producto alcanzó un peso constante. En el experimento 1 la temperatura se mantuvo inferior a los 35°C debido a que se realizó en un día nublado, en el experimento 2 y 3 se manejó un escenario de ventilación natural y en el experimento 4 la temperatura se fijó con un máximo de 50°C de acuerdo con las condiciones que requiere la estevia para conservar un mayor contenido de endulcorante (Samsudin y Aziz, 2013). En la Figura 3.2 se muestra la estevia en el interior del SSSTI.

### 3.2. Materiales y métodos

---



Figura 3.1: Sistema secador solar tipo invernadero de forma parabólica y cubierta de policarbonato ubicado en Chapingo, México.

La pérdida de peso del producto durante el tiempo se registró con cuatro muestras ( $M_1, M_2, M_3, M_4$ ), las que se pesaron en intervalos de 30 minutos utilizando una balanza digital modelo VE-1000 con una precisión de  $\pm 0,01\text{g}$  (Microscopios VELAB S.A. de C.V.). Para cada muestra se utilizaron 300 g de producto. Al final, las muestras se utilizaron para determinar el porcentaje de materia seca mediante el método de la estufa ( $100^\circ\text{C}$  durante 24 horas).

El contenido de humedad en base húmeda  $M_{bh}(\%)$  durante el proceso de secado, se determinó a partir del peso de las muestras en el tiempo y la materia seca final por medio de la ecuación

$$M_{bh} = \frac{W_m - W_d}{W_m} \times 100 \quad (3.1)$$

donde  $W_m$  es el peso de la muestra húmeda (kg) y  $W_d$  es el peso de la muestra seca. Con los datos obtenidos de los 4 experimentos, se realizaron regresiones no lineales para ajustar 9 modelos de capa delgada (Sacilik et al., 2006).

La razón de humedad del producto para el ajuste de los modelos se expresó con (3.2)(Sacilik et al., 2006):

### 3.2. Materiales y métodos

---



Figura 3.2: Deshidratado de estevia en el SSSTI

$$MR = \frac{M}{M_0} \quad (3.2)$$

donde  $M$  es el contenido de humedad en cualquier tiempo (kg de agua/kg de materia húmeda) y  $M_0$  es el contenido de humedad inicial (kg de agua/kg de materia húmeda).

Durante los cuatro experimentos se registraron, cada minuto, las variables climáticas radiación solar ( $R_o$ ,  $W\ m^2$ ), velocidad del viento ( $W_{So}$ ,  $m\ s^{-1}$ ), temperatura del aire ( $T_o$ ,  $^{\circ}C$ ) y humedad relativa del aire ( $RH_o$ , %). Todas tomadas de la estación meteorológica del Laboratorio de Biosistemas del Departamento de Ingeniería Mecánica Agrícola de la Universidad Autónoma Chapingo, ubicada a 30 metros del SSSTI.

Se utilizaron dos puntos de medición (Figura 3.3) a la altura del producto en el centro del secador. La temperatura del aire a la altura del producto ( $T_i$ ,  $^{\circ}C$ ) y la humedad relativa ( $RH_i$ , %) con sensores HMP50 (Campbell Scientific Inc., USA), conectados a un registrador de datos CR1000 (Campbell Scientific Inc., USA). Los sensores se protegieron de la radiación solar con tubos de 0.5 m de longitud forrados

### 3.2. Materiales y métodos

---

con aluminio (Erell, 2005). Los datos fueron registrados cada minuto durante todo el proceso de secado de estevia.

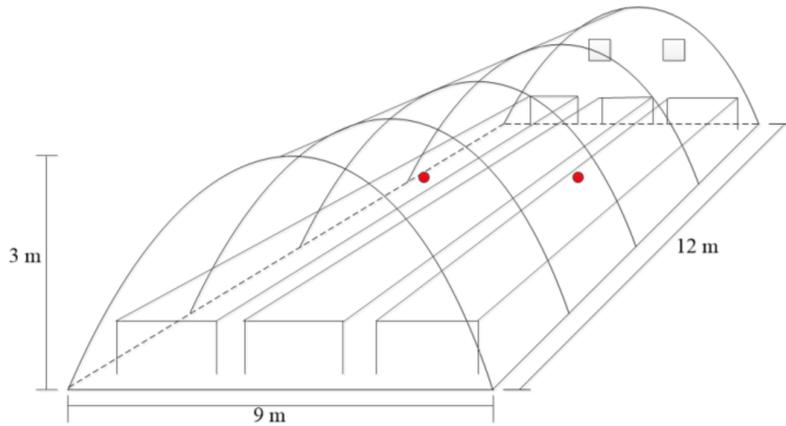


Figura 3.3: Dimensiones del SSSTI y puntos de medición de temperatura y humedad relativa a la altura del producto.

#### 3.2.2. Modelos empíricos del secado de estevia

Los modelos de capa fina adecuados para secar varias hojas se resumen en el Cuadro 3.1.

Las estadísticas de ajuste utilizadas para evaluar el desempeño de los modelos con los parámetros estimados en las regresiones fueron: la raíz cuadrada del error cuadrático medio (RMSE) y la eficiencia (EF). Las estadísticas se calculan de la siguiente manera (Wallach et al., 2014):

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N D_i^2} \quad (3.3)$$

$$EF = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{\sum_{i=1}^N (Y_i - \bar{Y})^2} \quad (3.4)$$

### 3.3. Resultados y discusión

---

Cuadro 3.1: Modelos de curva de secado de capa delgada comúnmente utilizados (Sacilik et al., 2006)

#	Nombre	Modelo
1	Newton	$MR = e^{-kt}$
2	Page	$MR = e^{-kt^n}$
3	Henderson y Pabis	$MR = ae^{-kt}$
4	Logarítmico	$MR = ae^{-kt} + c$
5	De dos términos	$MR = ae^{-k_0t} + be^{-k_1t}$
6	De dos términos exponenciales	$MR = ae^{-kt} + (1 - a)e^{-kat}$
7	Wang y Singh	$MR = 1 + at + bt^2$
8	Aproximación difusa	$MR = ae^{-kt} + (1 - a)e^{-kbt}$
9	Henderson y Pabis Modificado	$MR = ae^{-kt} + be^{-gt} + ce^{-ht}$

donde  $D_i = MR_{exp,i} - MR_{pre,i}$ ,  $MR_{exp,i}$  es la razón de humedad experimental (kg de agua/kg de materia húmeda) y  $MR_{pre,i}$  es la razón de humedad predicha por el modelo (kg de agua/kg de materia húmeda).

### 3.3. Resultados y discusión

En promedio, el contenido de humedad para el experimento 1 se redujo hasta un 25 %. En el experimento 2, la humedad del producto se redujo hasta el 13 %, en el experimento 3 se alcanzó un contenido de humedad del 18 % y para el experimento 4 un contenido de humedad fue de 11 % (Figura 3.4).

Cabe mencionar que durante el experimento 1 se presentaron condiciones de baja radiación solar y alta humedad relativa, lo que ocasionó que la temperatura máxima dentro del secador solar no rebasara los 40°C. En los experimentos 2 y 3 se mantuvo el secador con los extractores apagados, por lo que la temperatura dentro del secador llegó a los 60°C. En el experimento 4 se fijó una temperatura máxima de 50°C, esta temperatura ocasionó que se alcanzara el mínimo contenido de humedad en menor tiempo, lo que coincide con los resultados de Babu et al., 2018 y Castillo-Téllez et al., 2018 quienes deshidrataron estevia a diferentes temperaturas y a escala pequeña. A

### 3.3. Resultados y discusión

---

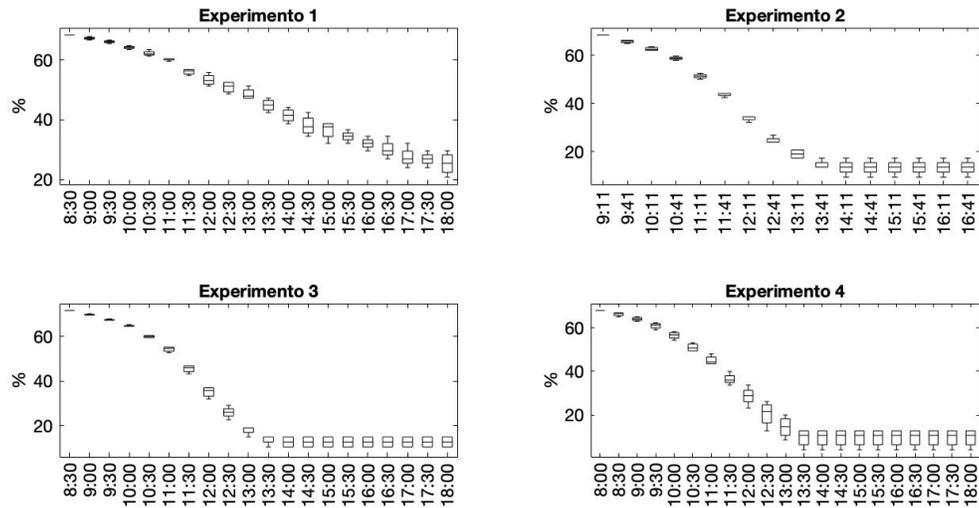


Figura 3.4: Gráfica de cajas para la curva de secado de cada experimento.

continuación, en la Figura 3.5 se aprecian las variables registradas, donde la temperatura y la humedad relativa del aire de secado son el promedio de los dos puntos de medición.

Para las razones de humedad del producto, se hizo el ajuste de curva utilizando el Toolbox Curve Fitting de Matlab para los modelos mencionados. En el Cuadro 3.2 se resumen los dos mejores modelos para cada experimento, incluyendo los valores de sus coeficientes y las estadísticas EF y RMSE.

En la Figura 3.6 se encuentran las razones de humedad de los cuatro experimentos y se comparan con sus dos mejores modelos. Se elige mostrar los dos mejores modelos ya que, a pesar de que el primero tiene un mejor ajuste, los primeros valores que se estiman se encuentran en un rango matemáticamente aceptable pero inaceptable en un rango físico, es decir, se calcula una razón de humedad superior a 1. Esto no sucede en el modelo con el segundo mejor ajuste. Nótese este fenómeno en las gráficas (c), (e) y (g).

### 3.3. Resultados y discusión

---

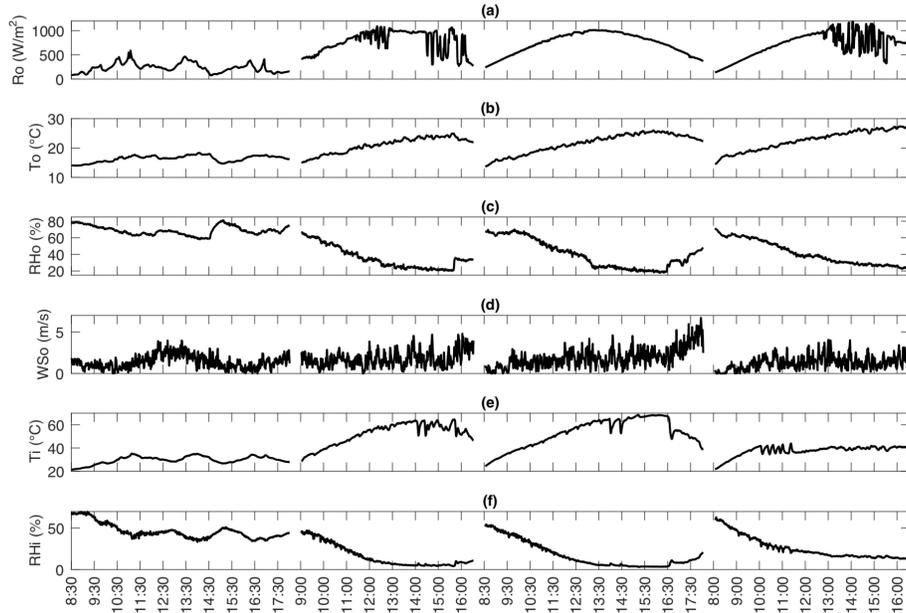


Figura 3.5: Variables climáticas y microclimáticas registradas. (a) Radiación solar, (b) Temperatura exterior, (c) Humedad relativa exterior, (d) Velocidad del viento exterior, (e) Temperatura interior y (f) humedad relativa interior.

Por último, parte de la estevia fue limpiada, triturada y empacada en contenedores de cristal con capacidades de 50, 100 y 150 gramos. En la Figura 3.7 se compara la calidad visual que tiene la hoja de estevia deshidratada en el SSSTI contra la que tiene la estevia deshidratada con un método tradicional.

El secado de Stevia generalmente se realiza a la intemperie o dentro de un invernadero convencional. En invernadero, el proceso toma en promedio dos días en condiciones de radiación solar alta y es posible llegar a tener pérdidas de hasta el 5% por humedecimiento y ennegrecimiento de hoja durante la noche. Durante la época de lluvias este problema se acentúa, pues el tiempo de secado dura de cuatro a cinco días y llegan a existir pérdidas de hasta un 70% del producto (Garduño, 2017b).

La eficiencia de un secador solar se basa en qué tan rápido baja la humedad de

### 3.4. Conclusiones

Cuadro 3.2: Coeficientes y estadísticas de los mejores modelos para la razón de humedad.

Experimento	Modelo	Coeficientes	EF	RMSE
1	9	$a = 0.05293, b = 0.4828$ $c = 1.459, g = 0.2749,$ $h = 0.06958, k = 7.168$	0.99	0.01
	2	$k = 0.00846, n = 1.614$	0.99	0.01
2	6	$a = 2.258, k = 0.2038$	0.96	0.06
	2	$k = 0.01881, n = 1.83$	0.94	0.08
3	8	$a = 1.53, b = 4.723, k = 0.1239$	0.93	0.08
	6	$a = 2.205, k = 0.1506$	0.93	0.08
4	6	$a = 2.73, k = 0.1729$	0.96	0.06
	2	$k = 0.01308, n = 1.853$	0.95	0.08

un producto a un límite de seguridad. El experimento que resultó en un contenido de humedad menor con menos tiempo fue el experimento 4 (Figura 3.4). Esto se debe a que la media de la temperatura del aire de secado se mantuvo estable. Esta observación hace evidente que es necesario aplicar técnicas de control más sofisticadas, como control inteligente, para mejorar el rendimiento del secados. Dichas técnicas requieren obligatoriamente modelos matemáticos del sistema a controlar.

### 3.4. Conclusiones

Mediante la deshidratación en un SSSTI se mantiene el producto aislado del medio ambiente y se logra deshidratar la hoja de estevia incluso en días nublados ya que la humedad relativa en el interior del secador siempre se mantiene por debajo de la del ambiente y la pérdida de agua de la hoja se favorece.

Mantener constante la temperatura del aire en el interior del secador no solo ayuda a no dañar las propiedades el producto, sino que también a deshidratar más rápido la hoja de estevia e incluso lograr un menor contenido de humedad, como sugieren los experimentos.

### 3.4. Conclusiones

---

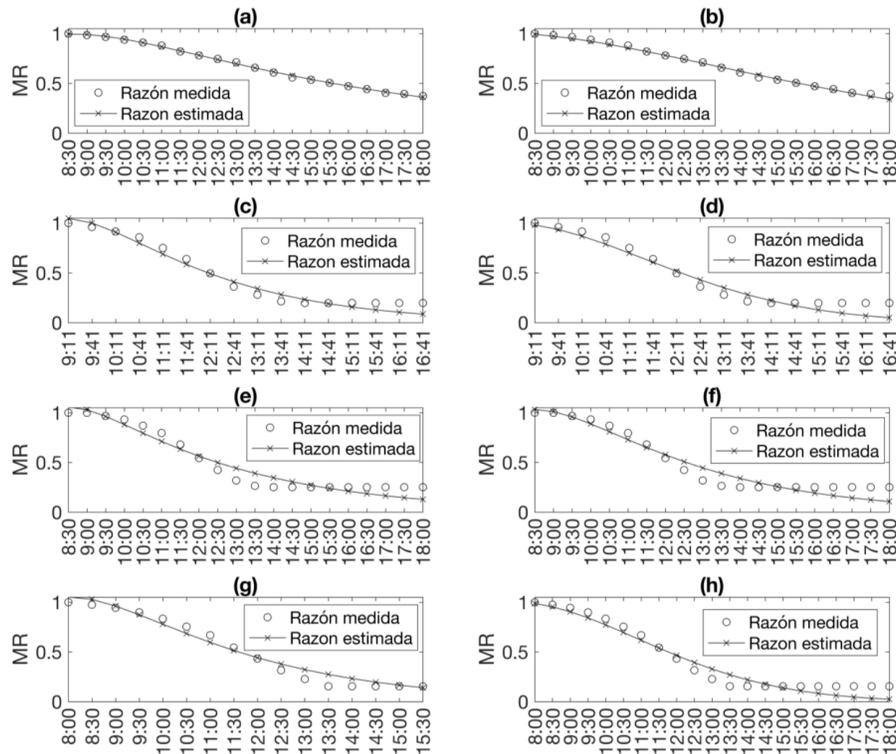


Figura 3.6: Razones de humedad del producto y sus dos mejores modelos donde (a) y (b) corresponden al experimento 1, (c) y (d) al experimento 2, (e) y (f) al experimento 3 y, (g) y (h) al experimento 4.

Por último, se logró el objetivo de tomar la cantidad de datos necesarios para la generación de modelos ANFIS, logrando un total de 2,194 registros. Los modelos neurodifusos y su desarrollo se presentan en el capítulo siguiente.

### 3.4. Conclusiones

---



Figura 3.7: Calidad visual de estevia deshidratad (izquierda) en el SSSTI; (derecha) en invernadero con cubierta de plástico y ventilación natural durante época de lluvia.

# Bibliografía

- Babu, A., G. Kumaresan, V. Raj y R. Velraj (2018). “Review of leaf drying: Mechanism and influencing parameters, drying methods, nutrient preservation, and mathematical models”. En: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 90, págs. 536-556.
- Bala, B. K. y J. L. Woods (1994). “Simulation of the indirect natural convection solar drying of rough rice”. En: *Solar Energy* 53.3, págs. 259-266.
- Castillo-Téllez, M., I. Pilatowsky-Figueroa, B. Castillo-Téllez, E. C. López-Vidaña y A. López-Ortiz (2018). “Solar drying of Stevia (*Rebaudiana Bertoni*) leaves using direct and indirect technologies”. En: *Sol Energy* 159, págs. 898-907.
- Colina-Irezabal, M. L. (2010). *Deshidratación de alimentos*. México: Trillas.
- Erell, E. (2005). “Predicting air temperatures in city streets on the basis of measured reference data”. Tesis doct. Australia: University of Adelaide.
- Garduño, Á. (2017b). “Construcción, evaluación y modelación matemática de un secador solar tipo invernadero”. Tesis doct. México: Universidad Autónoma Chapingo.
- Gidado-Lima, M., A. S. Abdullahi, A. A. L. Maigoro y K. J. Uma (2014). “Effects of three drying techniques on mineral composition of some leafy garden vegetables”. En: *IOSR J Appl Chem* 7.1, págs. 28-42.
- Janjai, S. y B. K. Bala (2012). “Solar drying technology”. En: *Food Energy Reviews* 4, págs. 16-54.
- Janjai, S., N. Lamler, P. Intawee, B. Mahayothee, B. K. Bala, M. Nagle y J. Müller (2009). “Experimental and simulated performance of a PV-ventilated solar greenhouse dryer for drying of peeled longan and banana”. En: *Solar Energy* 83, págs. 1550-1565.

- Kipping, D. R., H. Ortiz-Laurel, S. J. Méndez-Gallegos y A. Amante-Orozco (2012). *Fundamentos de secado solar de productos vegetales, teoría cumpraxi*. Inf. téc. Colegio de Posgraduados, 147 pp.
- Pangavhane, D. R. y R. L. Sawhney (2002). “Review of research and development work solar dryers for grape drying”. En: *Energy Convers Manag* 43, págs. 45-61.
- Prakash, O., V. Laguri, A. Pandey, A. Kumar y A. Kumar (2016). “Review on various modelling techniques for the solar dryers”. En: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 62, págs. 396-417.
- Sacilik, K., R. Keskin y A. K. Ellicic (2006). “Mathematical modelling of solar tunnel drying of thin layer organic tomato”. En: *J Food Eng* 73.3, págs. 231-238.
- Samsudin, A. e I. A. Aziz (2013). “Drying of Stevia leaves using laboratory and pilot scale dryers”. En: *J. Trop. Agric. Food Sci.* 41, págs. 137-147.
- Wallach, D., D. Makowski, J. W. Jones y F. Brun (2014). *Working with dynamic crop models*. Amsterdam, The Netherlands: Elsevier.
- Yaldiz, O., C. Ertekin y H. I. Uzun (2001). “Mathematical modeling of thin layer solar drying of sultana grapes”. En: *Energy* 26, págs. 457-465.

## Chapter 4

# Prediction of air temperature and relative humidity in a solar greenhouse dryer using neuro-fuzzy models

Guerrero-Santana A, López-Cruz I, Ruiz-García A, Fitz-Rodríguez E and Salazar-Moreno R.

*Written for presentation at the 2018 ASABE Annual International Meeting Sponsored by ASABE Detroit, Michigan July 29-August 1, 2018. Paper Number: 1801493.*

### **ABSTRACT.**

The development of mathematical models allows increasing the knowledge of physical processes associated with the solar drying of agricultural products. Until now, researches have focused mainly on the generation of theoretical models, nevertheless, the parameters of this type of models are numerous and compute them is a complicated task. An alternative are neuro-fuzzy models, which could be generated using experimental data of the drying process, moreover, they could be used for automatic controller design. The objective of this work was to generate Adaptive Neuro Fuzzy Inference Systems (ANFIS) to predict the relative humidity and

temperature inside the solar dryer during the stevia leaves drying process. Three experiments of drying stevia were carried out, with 75 kg each one. Air temperature and relative humidity were measured inside the dryer, additionally; air temperature, relative humidity, solar radiation and wind speed were measured outside the dryer. Sampling time of data acquisition for both locations was 1 minute. ANFIS models were developed for each output variable in MATLAB software (Neuro-Fuzzy Designer Toolbox) and it was experimentally evaluated. According to correlation coefficient ( $r$ ) between 0.96 and 0.99, root mean squared error (RMSE) between 1.63 and 4.49, mean absolute error (MAE) between 1.18 and 4.05, and modeling efficiency (EF) between 0.86 and 0.98. It was shown a good agreement between model forecasting and variables measurement, providing a good estimation.

**Keywords:** Black-box models, relative humidity, solar dryer, stevia.

## 4.1 Introduction

Drying is the most used method to increase the shelf-life and extend commercialization of agricultural products. Among the drying systems, solar greenhouse dryers stands out due to its capability of product processing. However, there are few studies on mathematical modelling of those systems (Garduño, 2017b). The approaches for modelling such system are physical and empirical models. The black-box models, as neuro-fuzzy models, are an alternative to mechanistic models when a big amount of data is available (López-Cruz and Hernández-Larrogaiti, 2010a).

A mathematical model is a representation of a system by means of equations and its purpose is, moreover helping to understand the system, to forecast its future behavior and it could be approached either from physical principles or measured data from the system. Such predictions help to controlling complex systems as the Solar Greenhouse Dryer System (SGDS) (Colina-Irezabal, 2010), and in this way reduce the energy consumption, improve productivity and reduce human workforce (Sriraman and Mayorga, 2004). Hernández-Larrogaiti, 2009 predicted the temperature

and relative humidity of air in a greenhouse using neuro-fuzzy models of ANFIS architecture and linear regression, obtaining better results with ANFIS. He concluded that ANFIS is a good base to improve the environment inside the greenhouse if a control strategy is applied.

Regarding the modelling of a solar drying system, Prakash and Kumar, 2014 compared the forecast quality of an Adaptive Neuro Fuzzy Inference System (ANFIS) against the one of a physical model and found out favorable results for the ANFIS model. Other authors as Lachouri et al., 2016 and (López-Cruz and Hernández-Larrogóiti, 2010a) predicted some variables of the microclimate of a venlo-type greenhouse by means of neuro-fuzzy models. ANFIS models have been applied by Naderloo et al., 2015, Olatomiwa et al., 2015 and Alasha'ary et al., 2009 to other type of physical phenomena and have obtained forecast qualities concluded as appropriated. Above mentioned studies have been accomplished using a methodology that consists in training and validating the models with specific input-output variables measured at a given sampling time for a period that goes from few months to some years, depending on the system.

Besides the classical approach of ANFIS modeling in the present work, ANFIS models were generated and evaluated in predicting air temperature and relative humidity inside a solar greenhouse dryer during the Stevia's leaves drying process, combining a forecast approach for time series as done by Correa-Henao and Montoya-Suárez, 2013, Melín et al., 2012, Río and Sanz-Molina, 2007 and Jang, 1993.

The hypothesis was that ANFIS models using time series approach is a methodology that improves the forecast quality, measured by the root mean squared error (RMSE), mean absolute error (MAE), modeling efficiency (EF) and correlation coefficient ( $r$ ). The objective was to develop neuro-fuzzy models, using Neuro-Fuzzy Designer Toolbox of Matlab, to forecast air temperature and relative humidity of a SGDS, and to evaluate those models.

## 4.2 Materials and Methods

### 4.2.1 Description of the SGDS

The experiments were performed in a SGDS (Figure 4.1) located in Chapingo University, Mexico ( $19^{\circ} 29' N$ ,  $98^{\circ} 53' O$  at 2,250 m). The system is oriented from south to north, the dimensions are  $9 \times 12$  m at the base and 3.4 m of height. The frame structure is made of galvanized steel; the cover is made of double-glass polycarbonate sheet of 6 mm of thickness. The floor is made of concrete with 0.15 m of thickness. The dryer has four air inlets of 1.23 m width and 0.53 m height, plus another one (door) of  $2 \times 2$  m, all of them covered with anti-aphid mesh of  $40 \times 26$  threads. On the south wall, there are installed two air extractors with a capacity of  $9,435 \text{ m}^3\text{h}^{-1}$  each one, driven by single-phase motors of 0.5 HP (373 W), that allow an air renewal inside the dryer in approximately 40 s. Inside the SGDS there are installed 24 tables with trays of  $1.8 \times 1.5$  m, obtaining a total useful drying surface of  $64.8 \text{ m}^2$  (Garduño, 2017b).



Figure 4.1: SGDS located in Chapingo Univeristy, Mexico.

### 4.2.2 Data acquisition

Three experiments were performed of drying with natural ventilation 75 kg of Stevia each one, in the SGDS located at Chapingo University, Mexico. The measuring points are shown in Figure 4.2. The air temperature at the product height ( $T_i$ , °C) was measured with 108-L sensors (Campbell Scientific Inc., USA), while the relative humidity ( $RH_i$ , %) with sensors HMP50 (Campbell Scientific Inc., USA), connected to a datalogger CR1000 (Campbell Scientific Inc., USA). Sensors were protected from solar radiation with horizontal tubes of 0.5 m length, covered with aluminum, which reduces the measurement error (Erell, 2005). Data were recorded every minute during the whole Stevia drying process. Data from the external environment: solar radiation ( $R_o$ ,  $Wm^{-2}$ ), outside air temperature ( $T_o$ , °C), relative humidity ( $RH_o$ , %) and wind speed ( $WSo$ ,  $ms^{-2}$ ) were taken from the meteorological station from the Biosystems Laboratory of the Agricultural Department of Mechanical Engineering of Chapingo University, located at 30 meters from the SGDS. Three different climatic scenarios were presented, one during each drying test; cloudy day with low radiation, partly sunny and totally sunny. This situation favors the ANFIS model training because it counts with a larger set of combinations, 2,194 data was used.

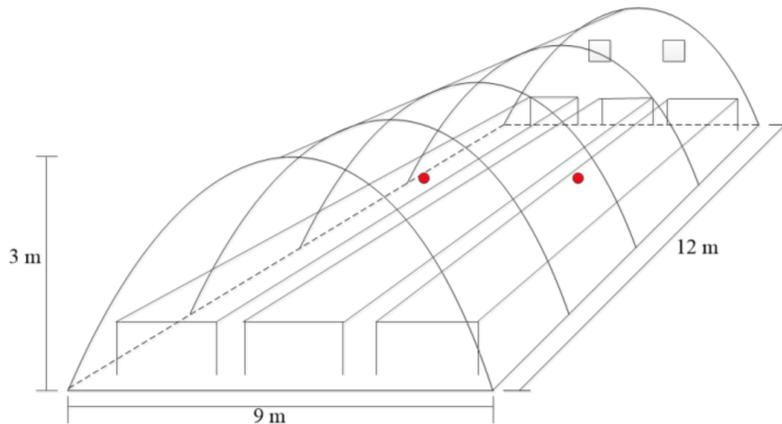


Figure 4.2: Dimensions of the SGDS and measurement points of air temperature and relative humidity at the product height.

### 4.2.3 Adaptive Neuro Fuzzy Inference System (ANFIS)

The ANFIS model consists of input-output variables, a set of IF-THEN rules type Sugeno, and a fuzzy inference system (Figure 4.3). In the layer 1, each square  $i$ -th has a membership function (MF)  $O_i^1 = \mu_{A_i}(x)$  that specifies the degree for which  $x$  belongs to  $A_i$ , the Gaussian MF is expressed as (*Fuzzy Logic Toolbox. For Use with Matlab*):

$$\mu_{A_i}(x) = e^{-\frac{(x-c_i)^2}{2\sigma^2}} \quad (4.1)$$

where  $c_i$  and  $\sigma$  are configuration parameters for each MF.

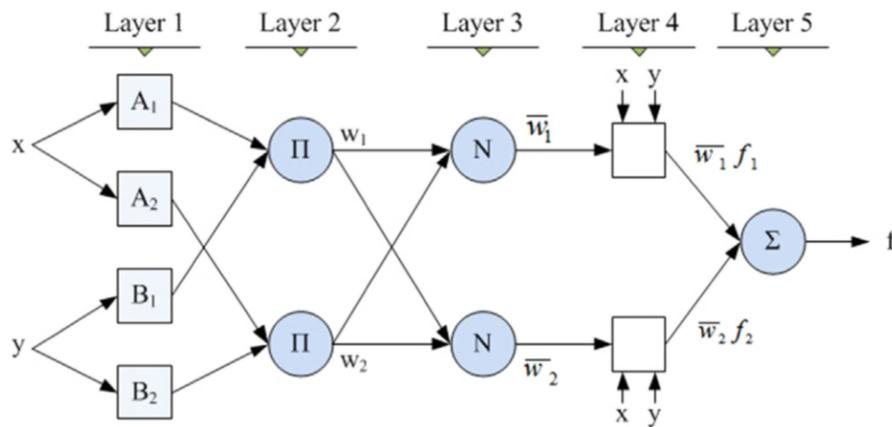


Figure 4.3: ANFIS architecture (Jang, 1993).

In layer 2, each node calculates the operation  $w_i = \mu_{A_i}(x) \times \mu_{B_i}(y)$ ,  $i = 1, 2$ . In the layer 3, the  $i$ -th node calculates the weighted media, using  $\bar{w}_i = \frac{w_i}{w_1 + w_2}$ ,  $i = 1, 2$ . In the layer 4, each  $i$ -th node has the function  $O_i^4 = \bar{w}_i(p_i x + q_i y + r_i)$ , where  $\bar{w}_i$  is the output of the previous layer, and  $\{p_i, q_i, r_i\}$  is the set of parameters known as consequent parameters. Finally, in the layer 5 it is calculated the total sum:  $O_1^5 = \sum \bar{w}_i f_i = \frac{\sum w_i f_i}{\sum w_i}$ . The inference system is shown in Figure 4.4.

The fuzzy rules in ANFIS have the following form:

Rule 1: IF  $x$  is  $A_1$  and  $y$  is  $B_1$  THEN  $f_1 = p_1x + q_1y + r_1$ .

Rule 2: IF  $x$  is  $A_2$  and  $y$  is  $B_2$  THEN  $f_2 = p_2x + q_2y + r_2$ .

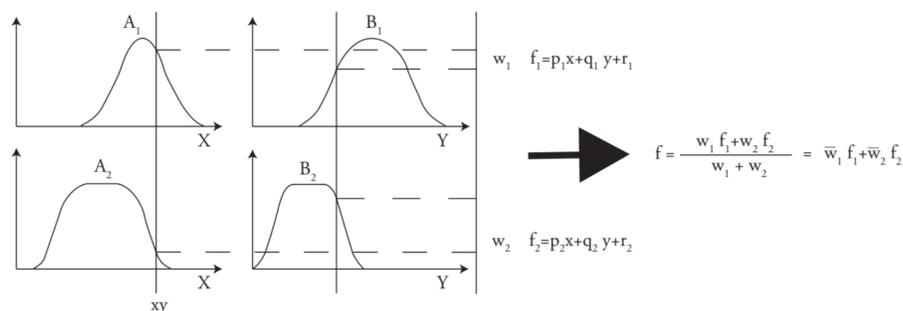


Figure 4.4: Fuzzy reasoning (Jang, 1993; López-Cruz and Hernández-Larrogóiti, 2010a).

ANFIS uses a hybrid learning algorithm with two steps, one forward and one backward. In the step forward, the consequence parameters are identified by the least squares estimator. In the step backward error rates propagate backward and the premise parameters are updated by the descent gradient method. This hybrid approach converges faster than the *backpropagation* method used in training neural networks (López-Cruz and Hernández-Larrogóiti, 2010a).

The Neuro-Fuzzy Designer Toolbox of Matlab lets us design, train and test adaptive neuro-fuzzy inference system (ANFIS) using input-output training data. Using this app, we can:

- Tune membership function parameters of Sugeno-type fuzzy inference system.
- Automatically generate an initial inference system structure based on your training data.
- Modify the inference system structure before tuning.

- Prevent overfitting to the training data using additional checking data.
- Test the generalization ability of your tuned system using testing data.
- Export your tuned fuzzy inference system to the MATLAB workspace.

In addition, the problem of forecasting future values of a time series is based on using known values of this series to forecast the value of a signal  $x(t)$  at the instant  $t+1$ . For this, it is used a  $k$  number of samples ( $x(t-k-1), x(t-2), x(t-1), \dots, x(t)$ ) (Figure 4.5) to forecast its value at the instant  $t+1$  (Melín et al., 2012; Wang and Zhang, 2005).

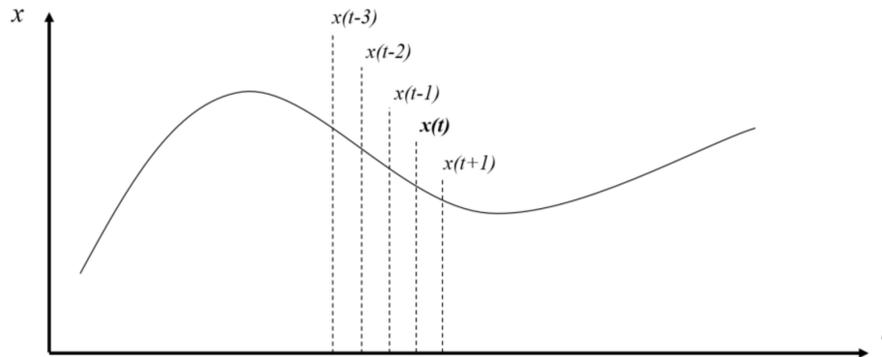


Figure 4.5: Time series (TS) (Río and Sanz-Molina, 2007).

From the above, it is obtained a new matrix of  $n - k \times k + 1$  elements, where  $n$  is the total number of data in the time series. For example, for a series of  $n = 5$  with  $k = 2$  it is obtained the matrix:

$$\begin{bmatrix} x(1) & x(2) & \rightarrow x(3) \\ x(2) & x(3) & \rightarrow x(4) \\ x(3) & x(4) & \rightarrow x(5) \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

In this case, the last value of the row is the desired output value and each column is considered as the set of data of a variable, in this case  $x(t-1)$  and  $x(t)$  to

forecast the output  $x(t + 1)$ . The results of these forecasts could be compared with other neural networks models and/or with other regressive statistical methodologies as ARMAX or ARX (López-Cruz et al., 2007; Velázquez-Henao, 2004).

### 4.2.4 Procedure

Matlab uses the subtractive clustering method that generates a fuzzy system type Sugeno with an input gauss MF for each fuzzy cluster and an output linear MF for each fuzzy cluster. The grid partition method generates the same system, but the number and type of input and output MF are specified by the user. For this reason, it was used the gauss MF for all inputs, where they were selected based on try and failure (Marin-Valencia and Muñoz-Ocampo, 2002), until it was obtained the combination of inputs with the best results.

The set of data is divided in two subsets, the first one is used to generate the model and the other one to validate it. The partitions tried on the models were from complete tests, that is to say, 33-67 (571 and 1022 data) and 67-33% (1022 and 571 data). It was used the function *genfis.m* to generate a fuzzy system Sugeno type from the input-output data. Then, it was used the function *anfis.m* to generate the architecture from the fuzzy system generated previously and he input-output data. Tests were performed with different input combinations and different cluster influence ranges.

### 4.2.5 Fitting measures

In order to evaluate the quality of the prediction, root mean squared error (RMSE), mean absolute error (MAE), modelling efficiency (EF) and correlation coefficient ( $r$ ), were used (Wallach et al., 2014):

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (D_i)^2} \quad (4.3)$$

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |D_i| \quad (4.4)$$

$$EF = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{\sum_{i=1}^N (Y_i - \bar{Y})^2} \quad (4.5)$$

$$r = \frac{\sum_{i=1}^N [(Y_i - \bar{Y})(\hat{Y}_i - \bar{\hat{Y}})]}{\sqrt{\sum_{i=1}^N [(Y_i - \bar{Y})^2] \sum_{i=1}^N [(\hat{Y}_i - \bar{\hat{Y}})^2]}} \quad (4.6)$$

where  $D_i = Y_i - \hat{Y}_i$ ,  $Y_i$  is the  $i$ -th measured value and  $\hat{Y}_i$  is the  $i$ -th forecasted value.

## 4.3 Results

### 4.3.1 Measured data

Each experiment lasted from 8 to 9 hours. In the Table 4.1 are summarized the max and min values for each variable.

Measured data are shown in Figure 4.6.

### 4.3.2 Models architectures

ANFIS architecture of the model 1 with output  $Ti(t+1)$  and inputs  $Ro(t)$ ,  $To(t)$  and  $RHo(t)$  is shown in Figure 4.7, where it was used the subtractive clustering method with a cluster inference range of  $[0.06 \ 0.9 \ 0.2 \ 0.9]$ . Its characteristics are: 14 gauss MF as inputs, 56 linear parameters, 84 nonlinear parameters, 118 nodes, 14 fuzzy

### 4.3. Results

Table 4.1: Max and min values for each variable.

Variable	E1		E2		E3	
	Min	Max	Min	Max	Min	Max
Ro ( $\text{Wm}^{-2}$ )	76	590	270	1092	241	1015
To ( $^{\circ}\text{C}$ )	14	19	15	25	13	26
RHo (%)	58	81	20	67	17	70
WSo ( $\text{ms}^{-1}$ )	0	4	0	5	0	7
Ti ( $^{\circ}\text{C}$ )	21	35	28	65	24	68
RHi (%)	33	70	4	47	3	54

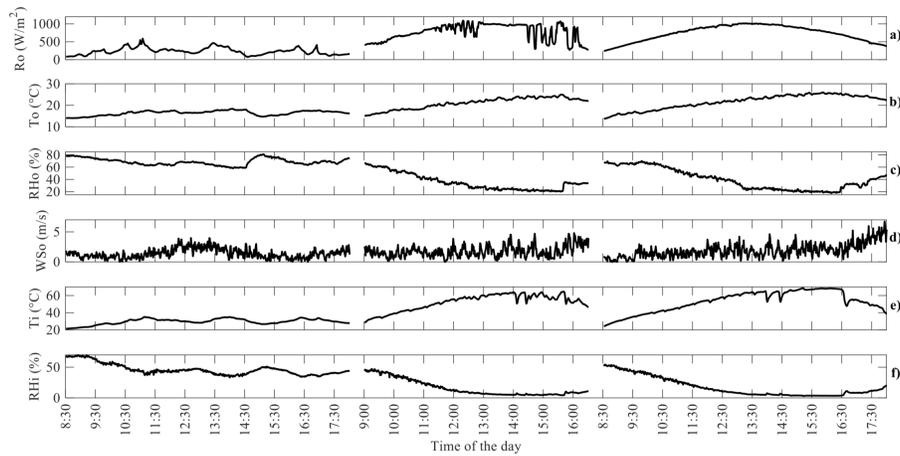


Figure 4.6: Measured data: a) Radiation; b) Outside air temperature; c) Outside relative humidity; d) Wind speed; e) Inside air temperature; f) Inside relative humidity.

rules and 14 linear MF as outputs.

Model 2 has ANFIS architecture shown in Figure 4.8, where inputs were  $Ro(t)$ ,  $To(t)$  and  $RHo(t)$  to obtain  $RHi(t + 1)$  as output, using subtractive clustering with cluster inference range of  $[0.1 \ 0.6 \ 0.2 \ 0.9]$ . Its characteristics are: 12 gauss MF as inputs, 48 linear parameters, 72 nonlinear parameters, 102 nodes, 12 fuzzy rules and 12 linear MF as outputs.

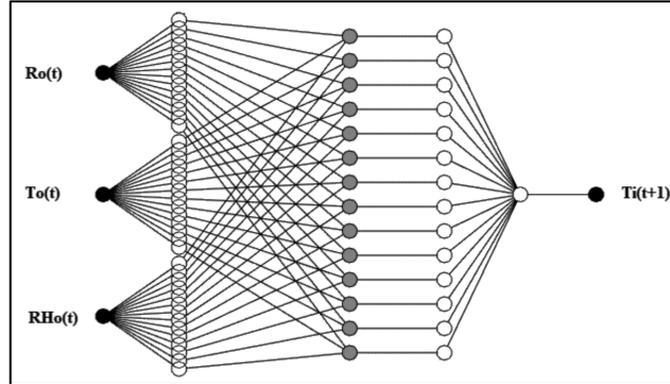


Figure 4.7: ANFIS architecture of model 1.

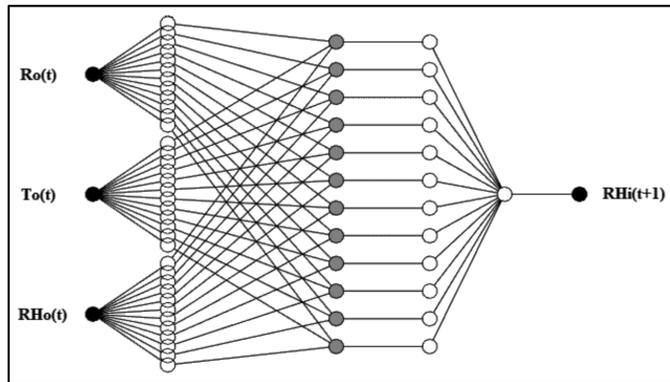


Figure 4.8: ANFIS architecture of model 2.

The ANFIS architecture of model 3 is shown in Figure 4.9, where the inputs are  $Ro(t)$ ,  $To(t)$ ,  $RHo(t)$   $WSo(t)$  and  $Ti(t)$  to predict  $Ti(t + 1)$  using the grid partition method. Its characteristics are: 2 gauss MF as inputs, 192 linear parameters, 20 nonlinear parameters, 92 nodes, 32 fuzzy rules and 32 constant MF as outputs.

Model 4 has the ANFIS architecture shown in Figure 4.10, when the inputs are  $Ro(t)$ ,  $To(t)$   $RHo(t)$  and  $RHi(t)$  to forecast  $RHi(t+1)$  using the grid partition method. Its characteristics are: 2 gauss MF as inputs, 16 linear parameters, 16 nonlinear parameters, 55 nodes, 16 fuzzy rules and 16 constant MF as outputs.

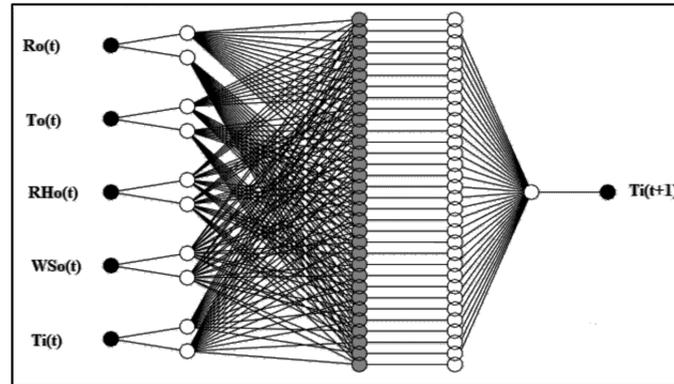


Figure 4.9: ANFIS architecture of model 3.

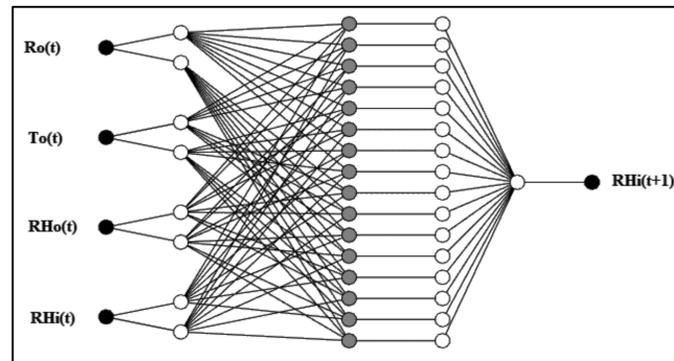


Figure 4.10: ANFIS architecture of model 4.

### 4.3.3 Evaluation and fitting quality

Measured data and forecasted data are shown in plots of Figure 4.11. In plot a), forecasting trend the tendency of measured data, but it is not sensitive to the peaks presented in temperature measurements. In graphic b), the humidity forecasting shows a good trend yet it shown values that, although they are part of the mathematical set, are not valid as physical interpretation, that is to say, they show negative values for relative humidity. On the other hand, in plots c) and d), where it was used the value in time  $t$  to forecast its value at  $t + 1$ , the tendency is followed even in the peaks and values kept within the physical domain.

### 4.3. Results

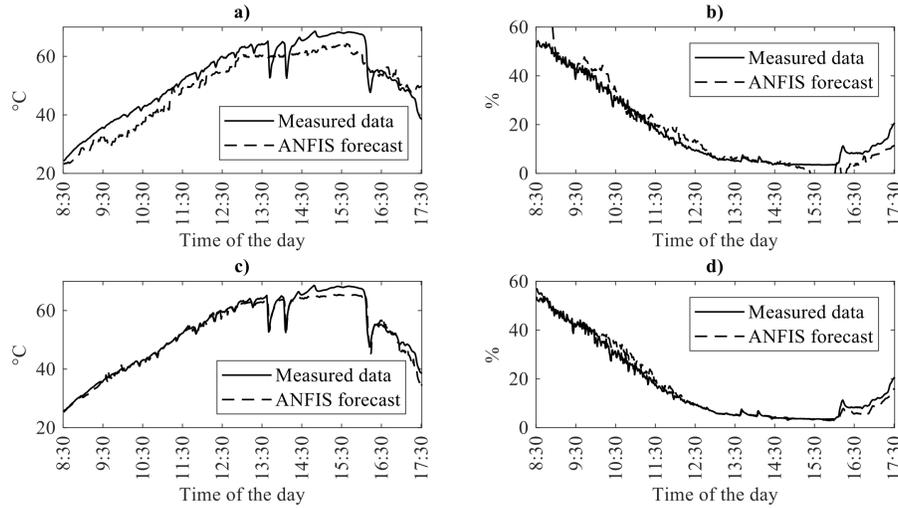


Figure 4.11: Measured data vs ANFIS model for: a) Temperature (model 1); b) Relative humidity (model 2); c) Temperature (model 3) and d) Relative humidity (model 4).

The results of the applied statistics are shown in Table 4.2, where SC means subtractive clustering, GP means grid partition and NE means number of epochs of training. Prediction results agree with Bagheri et al., 2015, who obtained correlation coefficients from 0.93 to 0.98 between the ANFIS models predicting and experimental data in a solar dryer without using time series approach. This approach has not been exploited in the area of solar drying (Wang and Zhang, 2005).

Table 4.2: Statistical values as measures of performance of the models of temperature obtained with grid partition and subtractive clustering.

Partition	Input MF	NE	Output MF	RMSE	MAE	EF	r
SC(67-33)	Gauss	200	Linear	4.49	4.05	0.86	0.96
SC(67-33)	Gauss	200	Linear	4.70	3.35	0.90	0.97
GP(67-33)	Gauss	100	Constant	1.63	1.18	0.98	0.99
GP(67-33)	Gauss	100	Constant	2.08	1.42	0.98	0.99

Scatter plots and regression equation corresponding to measurements models are

#### 4.4. Conclusion

---

shown in Figure 4.12. The neuro-fuzzy models of this work showed better results than those reported by Prakash and Kumar, 2012, whom obtained correlation coefficients between 0.90 and 0.98 among the ANFIS predicting and measured data. This is because Prakash and Kumar, 2012 did not use the time series approach and a smaller amount of input-output data.

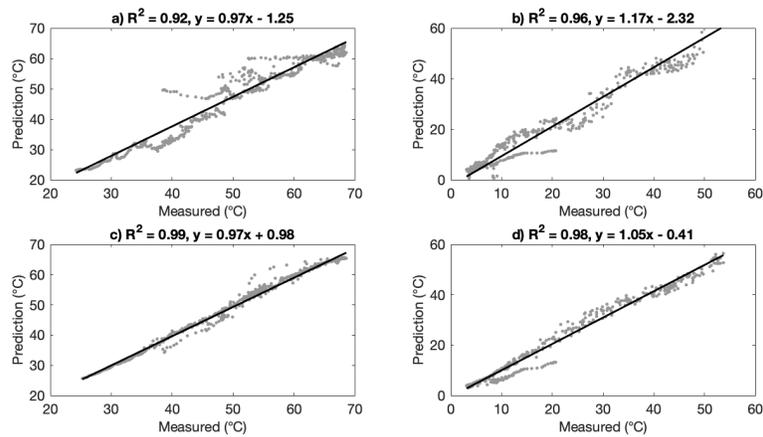


Figure 4.12: Scatter plot of measured data vs ANFIS predicted for: a) Temperature of model 1; b) Relative humidity of model 2; c) Temperature of model 3 and d) Relative humidity of model 4.

## 4.4 Conclusion

Neuro-fuzzy models, generated using past values of the output variable in the previous sampling time intended to, obtained better fitting than a classical Neuro-Fuzzy models when ANFIS was applied to predict the microclimate of a solar greenhouse-type drying system. That is a starting point to apply appropriated control techniques to the SDGS. On the other hand, models that did not used data of the predicted variable, obtained practical results, because they aid the Stevia grower to effectively know the behavior of the system under similar climatic conditions to those displayed in the present work, without the requirement of building a SDGS.

### **Acknowledgments**

To Science and Technology National Council (CONACyT) of México and to Chapingo University (UACH).

# Bibliography

- Alasha'ary, H., B. Moghtaderi, A. Page, and H. Sugo (2009). "A neuro-fuzzy model for prediction of the indoor temperature in typical Australian residential buildings". In: *Energy and Building* 41, pp. 703–710.
- Bagheri, N., T. Nazilla, and H. Javadikia (2015). "Development and evaluation of an adaptive neuro fuzzy interface models to predict performance of a solar dryer". In: *Agric Eng Int: CIGR J* 17.2, pp. 112–121.
- Colina-Irezabal, M. L. (2010). *Deshidratación de alimentos*. México: Trillas.
- Correa-Henao, G. J. and L. Montoya-Suárez (2013). "Aplicación del modelo ANFIS para predicción de series de tiempo". In: *Lampsakos* 9, pp. 12–25.
- Erell, E. (2005). "Predicting air temperatures in city streets on the basis of measured reference data". PhD thesis. Australia: University of Adelaide.
- Fuzzy Logic Toolbox. For Use with Matlab*. The Mathworks Inc.
- Garduño, Á. (2017b). "Construcción, evaluación y modelación matemática de un secador solar tipo invernadero". PhD thesis. México: Universidad Autónoma Chapingo.
- Hernández-Larragoiti, L. (2009). "Modelos neuro-difusos para temperatura y humedad del aire en invernaderos". MA thesis. México: Universidad Autónoma Chapingo.
- Jang, J. S. R. (1993). "ANFIS: adaptive-network-based fuzzy inference system". In: *IEEE Trans Syst Man Cybern* 23, pp. 665–685.
- Lachouri, C., K. Mansouri, M. Lafifi, and A. Belmegeuai (2016). "Adaptive Neuro-Fuzzy Inference Systems For Modeling Greenhouse Climate". In: *International Journal Of Advanced Computer Science And Applications* 7.1, pp. 96–100.

- López-Cruz, I. L. and L. Hernández-Larrogóiti (2010a). “Neuro-fuzzy models for air temperature and humidity of arched and venlo type greenhouse in central Mexico”. In: *Agrociencia* 44.7, pp. 791–805.
- López-Cruz, I. L., A. Rojano-Aguilar, W. Ojeda-Bustamante, and R. Salazar-Moreno (2007). “ARX models for predicting greenhouse air temperature: a methodology”. In: *Agrociencia* 41.2, pp. 192–181.
- Marin-Valencia, J. F. and K. A. Muños-Ocampo (2002). “Comparacion entre los modelos de Box and Jenkis y el modelo ANFIS en el pronostico de precios de acciones en el corto plazo”. PhD thesis. Medellin: Universidad Nacional de Colombia.
- Melín, P., J. Soto, O. Castillo, and J. Soria (2012). “A new approach for time series prediction using ensembles of ANFIS models”. In: *Expert Systems with Applications* 29, pp. 3494–3506.
- Naderloo, L., H. Javadikia, and M. Mostafaei (2015). “Modeling the energy ratio and productivity of biodiesel with different reactor dimensions and ultrasonic power using ANFIS”. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 70, pp. 56–64.
- Olatomiwa, L., S. Mekhief, S. Shamshirband, and D. Petkovic (2015). “Adaptive neuro-fuzzy approach for solar radiation prediction in Nigeria”. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 51, pp. 1784–1791.
- Prakash, O. and A. Kumar (2012). “ANFIS Modeling of a natural convection greenhouse drying system for jaggery: an experimental validation”. In: *International Journal of Sustainable Energy* 33.2, pp. 316–335.
- (2014). “ANFIS modelling of a natural convection greenhouse drying system ofor jaggery: an experimental validation”. In: *International Journal of Sustainable Energy* 32.2, pp. 316–335.
- Río, B. M. del and A. Sanz-Molina (2007). *Redes neuronales y sistemas borrosos*. México: Alfaomega.
- Sriraman, A. and R. V. Mayorga (2004). “A Fuzzy Inference System Approach for Greenhouse Climate Control”. In: *Environ, Informatics Archive* 2, pp. 699–710.
- Velázquez-Henao, J. D. (2004). “ronóstico de la serie Mackey-Glass usando modelos de regresión no lineal”. In: *Dyna* 71, pp. 85–95.

- Wallach, D., D. Makowski, J. W. Jones, and F. Brun (2014). *Working with dynamic crop models*. Amsterdam, The Netherlands: Elsevier.
- Wang, C. and J. P. Zhang (2005). “Time series prediction base on ensemble AN-FIS”. In: *Fourth international conference on machine learning and cybernetics*. Guangzhou, pp. 18–21.