

Deshidratación del chile guajillo (*Capsicum annuum*) utilizando el secado solar tradicional en planta, a cielo abierto, microtúnel y convencional.

García González J M^{a,*}, Hernández Acevedo Y^a, Conejo Flores R.^a, Pilatowski Figueroa I^b, García Saldivar V M^a

- a. Universidad Autónoma de Zacatecas, Unidad Académica de Ciencias Químicas, Programa Académico de Ingeniería Química. Campus UAZ Siglo XXI. Carretera Zacatecas- Guadalajara Km. 6. Ejido la Escondida. C.P. 98160. Zacatecas, México.
- b. Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Energías Renovables, Priv. Xochicalco S/N, C.P. 62580. Temixco, Morelos, México. * jmgarcia@uaz.edu.mx

RESUMEN

El objetivo de este trabajo es evaluar y caracterizar tres diferentes tecnologías de secado solar para deshidratar el chile guajillo (*Capsicum annuum*) que se produce en el Estado de Zacatecas. Para el estudio comparativo se utilizaron las especificaciones físicas, sensoriales y fisicoquímicas de la norma NMX-FF-107/1-SCFI-2006 con ayuda del método de prueba de "Longitud y Ancho". En este trabajo, se proponen los modelos que relacionan la humedad, peso y el grado de madurez del chile guajillo. La mejor cinética de secado se obtuvo en el secador solar tipo gabinete con convección natural con una temperatura promedio de 24.48 °C, tiempo promedio de secado de 40.5 h y una velocidad de secado de 1.09 gramos de agua/gramos de materia seca. Los resultados obtenidos muestran la factibilidad del secado solar del chile guajillo cumpliendo con los estándares de calidad establecidos..

PALABRAS CLAVE. Secado, secado solar de chile guajillo. Secador solar tipo gabinete, secado solar en planta y en patio.

ABSTRACT

The objective of this work is to evaluate and characterize three different solar drying technologies to dehydrate the the red chili "guajillo" (*Capsicum annuum*) that is produced in the State of Zacatecas, MEXICO. Comparative study, of the physical, sensory and physicochemical specifications of the NMX-FF-107/1-SCFI-2006 standard were performed using the "Length and Width" test method. In this work, the models that relate the humidity, weight and degree of maturity of chili guajillo were proposed. The best kinetics of drying was obtained in the cabinet type solar dryer with natural convection at a 24.48 °C of average temperature, average drying time of 40.5 h and a drying rate of 1.09 grams of water / grams of dry matter. The results obtained show the feasibility of solar drying of the guajillo chili, complying according to with the established quality standards..

KEYWORDS. Drying, solar drying of guajillo chili. Cabinet type solar dryer, solar drying in the plant and in the yard.

Área: Frutas y hortalizas

INTRODUCCIÓN

El chile, *capsicum annuum* es originario de las regiones cálidas, templadas y frías de México. El cultivo de chile fue primero que el jitomate y maíz, junto con el aguacate, existiendo registros desde hace ocho mil años. Su consumo puede ser en fresco o seco y como verdura o condimento, es un ingrediente indispensable en la cocina mexicana. Se le denomina chile verde a los chiles frescos que no han sido térmicamente procesados, generalmente inmaduros, por lo que se puede tratar de chile serrano, jalapeño, poblano, entre otros. Se utiliza el término "chile seco" para designar una gran variedad de chiles que se dejan secar o deshidratar; y que son muy utilizados en la gastronomía mexicana.

En México son cinco las entidades que concentran más del 50 % de la superficie de chile CULTIVADA ~~plantada~~, así como 60 % de la producción, éstas son: Sinaloa, Chihuahua, Guanajuato, Sonora y Zacatecas. El estado de Zacatecas produce 34.8 mil toneladas al año. La producción de chile seco en México corresponde aproximadamente al 40 % del total de los chiles que se cultivan, predominando los siguientes: Ancho, Mulato, Mirasol, Pasilla, Puya, de Árbol y otros de menor importancia (A. y P., 2006). Esta condición de chiles

deshidratados permite almacenar el producto por varios meses y así buscar mejores oportunidades de mercadeo. El chile seco es un producto de gran importancia en el Estado de Zacatecas ya que el 60 % del chile seco que se comercializa en el país es de origen zacatecano (Bravo, 2010). La comercialización de chile seco es mayor que la de chile fresco gracias a que el precio por kilogramo del primero es mucho mayor que el del producto fresco. Además, el estado genera cerca del 35% del PIB agropecuario (Bravo, 2010). El chile es un cultivo sostenible, tiene alta trascendencia socioeconómica y competitiva en comparación con el cultivo de árboles frutales (Zegbe, 2012).

En general, los chiles secos enteros deben de presentar forma y color característicos; tener un fuerte olor; estar bien desarrollados, enteros, sanos, limpios, de consistencia firme y textura brillante; provenir de frutos cosechados en el grado de madurez óptimo y con pedúnculo; estar sin humedad exterior anormal; estar libres de pudrición o descomposición; estar libres de defectos de origen mecánico, entomológico, microbiológico, meteorológico y genético-fisiológico; estar libres de insectos, hongos, así como de contaminantes de roedores; estar libres de materia extraña (NMX-FF-107/1-SCFI-2006).

Actualmente la manera convencional en la que se deshidratan los chiles es mediante túneles de secado, en los cuáles la fuente de energía son los combustibles fósiles, y si bien, se obtiene un producto de calidad en poco tiempo, contribuye en gran forma a la contaminación. Una alternativa para disminuir este impacto ambiental es por medio del incremento de la rentabilidad de un producto, reduciendo los consumos de energía y con ello mejorar la eficiencia del proceso de secado utilizando las energías renovables.

Debido al elevado consumo energético requerido para la remoción del agua en los alimentos, se propone el secado térmico solar como una alternativa renovable, no contaminante y económica.

El secado tradicional al aire libre es un método que se realiza dispersando los productos agrícolas en una capa delgada sobre el suelo de un campo abierto y exponiéndolos directamente al sol. En este tipo de secado al aire libre se pierde entre el 30% y el 40% de la producción. Estas pérdidas se deben a las variables condiciones del secado y a las dificultades para su control (Bayona, 2011).

Para superar los problemas que presenta el secado al aire libre, el proceso se puede realizar al interior de un secador solar. Los secadores solares pueden ser directos, indirectos o mixtos (Esper, 1998). En los secadores directos, el producto se encuentra en exposición directa a la radiación solar, no se puede controlar las condiciones de radiación y se puede incurrir en una sobreexposición o insuficiencia en el secado. La capacidad de secado de los secadores solares directos se puede aumentar mediante la conexión de un colector solar a la sección de secado, este colector solar calienta el aire de secado de una forma más eficiente. Los secadores solares en los cuales el producto se encuentra expuesto a la radiación y también conectado a un colector solar se denominan secadores de tipo mixto. En contraste, los secadores indirectos protegen la sección de secado de la radiación solar directa, pero poseen un colector solar que aumenta la temperatura del aire de secado. Los secadores solares también pueden ser pasivos o activos. Los pasivos se caracterizan por realizar el proceso de secado mediante la convección natural del aire. Esta configuración puede presentar problemas durante la noche y el tiempo nublado, ya que, al detenerse por completo la circulación del aire, se puede provocar el deterioro del producto. Los secadores activos impulsan el aire de secado a través del colector y del secador mediante un ventilador que permite realizar el proceso de secado por medio de la convección forzada del aire sobre el producto, esto posibilita una reducción del tiempo de secado de hasta un 50 % y mejora significativamente la calidad del producto al suministrar el flujo de aire adecuado con una temperatura mayor. Megha (2015), en su trabajo presenta las diferentes tecnologías solares aplicables el deshidratado de alimentos, sus principales ventajas y desventajas.

El proceso de secado involucra simultáneamente transferencia de calor desde los alrededores a la superficie del producto que se seca en combinación con la transferencia de calor en el material, y la transferencia de masa desde el interior del producto a su superficie, seguido por el transporte externo de la humedad a los alrededores. Los parámetros del producto tales como las propiedades físicas (tamaño, densidad, etc.), contenido de humedad y el coeficiente de transferencia de masa entre el aire y los productos alimenticios, todos varían durante el proceso de secado. Esto es influenciado por las condiciones externas al producto, tales como temperatura, humedad y

velocidad del aire de secado y también por los cambios en la composición química y física de los productos alimenticios (López, 2011).

El objetivo de este trabajo es evaluar y caracterizar tres diferentes tecnologías de secado solar para deshidratar el chile guajillo rojo (*Capsicum annuum*) que se produce en el Estado de Zacatecas.

MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio experimental se llevó a cabo en el Laboratorio de Secado Solar del Instituto de Energías Renovables de la Universidad Nacional Autónoma de México, en Temixco, Morelos. Como materia prima se utilizó chile guajillo cultivado en el Rancho “La Piraña” del municipio de Pánfilo Natera en el Estado de Zacatecas. Las muestras de chile se lavaron y desinfectaron. Posteriormente se ordenaron por grado de madurez considerando sus características organolépticas de color y textura lo cual se muestra en la Fig. 1, la escala de maduración que va desde un chile verde brillante con tonos amarillos y una textura firme al tacto (M16) evolucionado hacia tonalidades rojizas perdiendo consistencia, terminando en un chile rojo oscuro con tonos cafés y con textura delgada y blanda (M1).



Figura 1. Escala de madurez para el chile guajillo

De igual forma se determinó el contenido de humedad inicial para cada grado de maduración, las dimensiones (largo y ancho), el peso, el volumen y la densidad. La caracterización efectuada al del chile guajillo se muestra en la Tabla I.

Tabla I. Caracterización de los lotes de chile guajillo a diferentes grados de maduración

Grado de Madurez	Longitud (mm)	Ancho (mm)	Peso (g)	Densidad (gr/ml)	Humedad (%)
M1	160.00	39.04	15.667	0.295	29.06
M2	165.29	38.05	17.129	0.297	27.79
M3	174.80	35.84	23.940	0.349	39.72
M4	162.40	34.53	24.307	0.416	63.85
M5	176.80	34.63	34.600	0.390	63.29
M6	166.60	34.30	39.100	0.470	76.86
M7	158.25	30.55	32.833	0.533	79.76
M8	141.50	35.39	34.836	0.518	82.05
M9	148.25	34.41	39.875	0.558	80.62
M10	155.33	31.63	39.333	0.567	81.48
M11	142.40	32.88	40.240	0.592	81.72
M12	134.00	31.84	33.500	0.556	82.88
M13	157.67	32.49	47.833	0.568	84.45
M14	187.33	34.12	44.167	0.635	85.07
M15	153.40	31.96	38.500	0.638	85.68
M16	157.00	34.39	44.320	0.657	87.30

Las tres diferentes tecnologías de secado solar empleadas para la deshidratación se muestran en las Figs. (2a)-(2c), secado en patio, secado en un secador transparente tipo gabinete bajo dos regímenes de operación; convección natural y convección forzada.

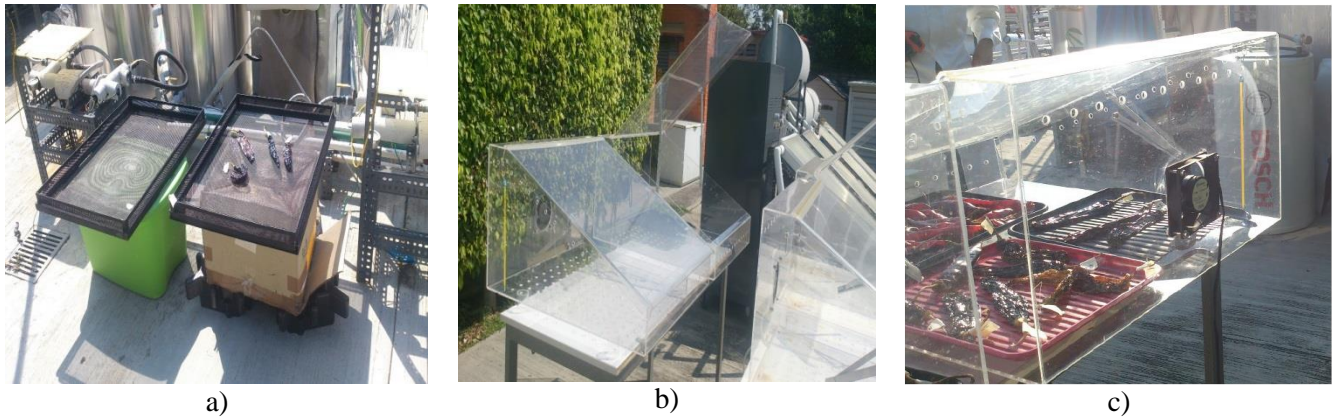


Figura 2. Secadores de: a) Patio. b) Tipo gabinete por convección natural. c) Tipo gabinete por convección forzada

En la Fig. 3 se muestra la metodología empleada para el deshidratado del chile guajillo en las tres tecnologías de secado solar.

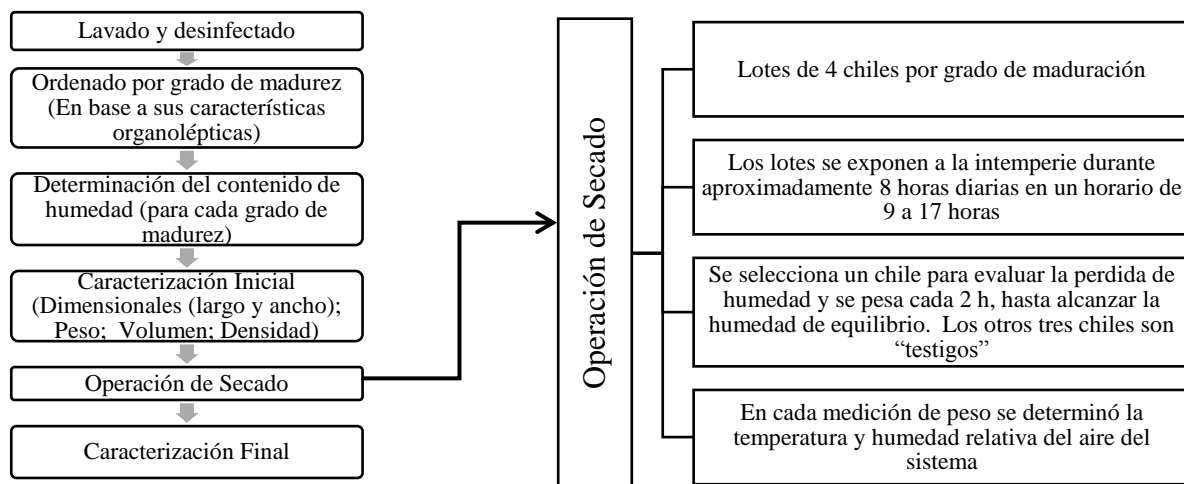


Figura 3. Metodología utilizada para el secado de chile guajillo en los diferentes tipos de secadores solares

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El Instituto de Energías Renovables de la UNAM en el Municipio de Temixco, Morelos se LOCALIZA a una altitud de 1280 m snm, Y a una Latitud de 18° 51' N y una Longitud de 99° 14' W. La experimentación se realizó del 17 al 28 de octubre de 2014. La Irradiancia global promedio de los días de prueba fue de 590.20 W/m², temperatura ambiental promedio fue de 24.48 °C y la humedad relativa de 55.27%, estos datos se obtuvieron en la estación meteorológica del Instituto de Energías Renovables.

Con los resultados que se obtuvieron en la caracterización inicial efectuada al chile guajillo (Tabla I), se determinaron los modelos matemáticos que relacionan el Grado de Madurez en función del % de Humedad y del Peso y por último % de Humedad en función del peso.

El modelo matemático que se obtiene al relacionar el % de Humedad (H) y el Grado de Madurez (M) se presenta en la Ec. 1. El error para esta correlación es del 7 %.

$$H = 0.0409 M^3 - 1.5245 M^2 + 19.123 M + 3.3792 \quad \text{Ec 1}$$

La correlación para el Peso (P) en función del Grado de Madurez se presenta en la Ec. 2, con un error del 8.46 %

$$P = -0.1636 M^2 + 4.4936 M + 11.488 \quad \text{Ec 2}$$

Por último, para correlacionar el % de Humedad y el Peso se obtuvo la Ec. 3, la cual presenta un 8.6 % de error.

$$H = -0.065 P^2 + 5.9862 P - 52.695 \quad \text{Ec 3}$$

A partir de los datos experimentales DE la deshidratación del chile guajillo en cada una de las tres tecnologías, se obtuvieron las cinéticas de secado representadas en las Figs (4a)-(4c), en donde se observan los diferentes tiempos de secado: El segmento A-B es el periodo de calentamiento o inestabilidad, en el cuál el producto se calienta, aumentando la temperatura de la interface y adaptándose el material a las condiciones de operación; el segmento B-C es teóricamente el periodo de velocidad de secado constante, el segmento C-D es denominado el primer periodo de velocidad decreciente; y el segmento D-E es el segundo periodo de velocidad decreciente.

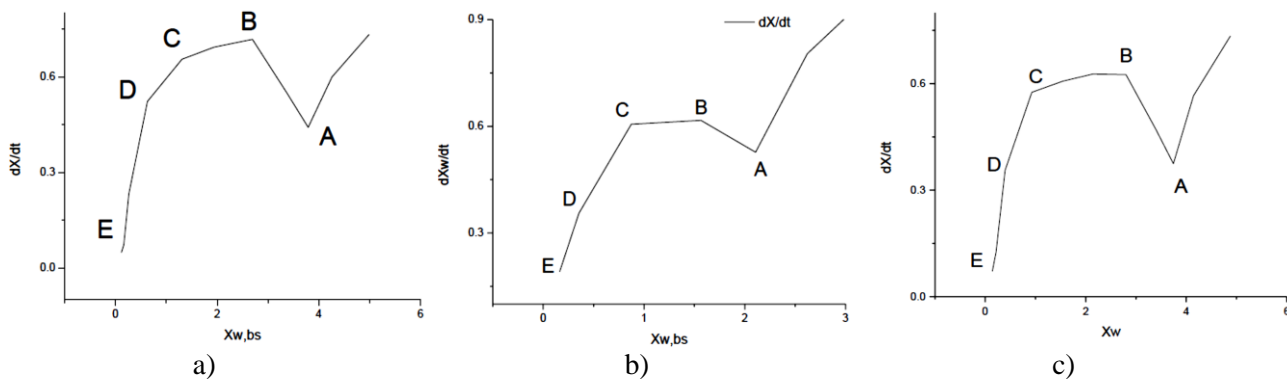


Figura 4. Cinética de secado para la operación de los secadores de: a) Patio. b) Tipo gabinete por convección natural. c) Tipo gabinete por convección forzada

El tiempo de secado, la temperatura de operación y la velocidad máxima de secado, que se obtienen empleando las diferentes tecnologías solares en la deshidratación del chile guajillo, se presentan en la Tabla II.

Tabla II. Tabla comparativa de las tecnologías solares para el secado de chile guajillo

Tecnología Solar	Velocidad máxima de secado ($\frac{g_{agua}}{g_{materia\ seca} \cdot h}$)	Temperatura promedio (°C)	Tiempo de secado (h sol)
Patio	0.73	27.55	67.5
Tipo gabinete por convección natural	1.09	38.91	40.5
Tipo gabinete por convección forzada	0.73	36.87	54

En la Tabla III se presentan la caracterización efectuada al chile guajillo seco, De acuerdo a los resultados obtenidos la humedad final del producto deshidratado mediante las diferentes tecnologías solares, está por debajo del límite superior establecido en la NMX-FF-107/1-SCFI-2006 (Vega de Kuyper, 2014) que es de 13.5 %.

Tabla III Resultados de la Caracterización de chile guajillo deshidratado

Tecnología	Longitud (mm)	Ancho (mm)	Peso (g)	Volumen (ml)	Densidad (g/ml)	Humedad final (%)	Tiempo de secado (h solar)
Patio	176.60	34.124	8.839	68.00	0.133	11.47	76
Tipo gabinete por convección natural	167.80	38.420	9.456	68.90	0.139	12.72	45
Tipo gabinete por convección forzada	178.80	32.374	7.922	55.00	0.142	12.50	61

De acuerdo a los resultados que se muestran en la Tablas (II)–(III) y considerando el tiempo de secado como variable para el diseño del proceso, la tecnología de patio es la que emplea mayor tiempo en la operación de secado, le sigue la tecnología que utiliza convección forzada y por último la tecnología que emplea convección natural. En cambio, si se toma en cuenta la humedad del producto final la mejor tecnología es la de patio. Sin embargo, la relación costo-beneficio sugiere que la operación en el secador tipo gabinete que emplea convección natural sea la recomendada. Lo anterior ocurre debido a que en la operación en la tecnología de patio no se tiene ningún control sobre las variables del proceso, y en la a tecnología que utiliza convección forzada la remoción del aire dentro de la caseta no permite que se alcance el contacto necesario y suficiente para retirar la humedad del chile guajillo.

Tomando en cuenta el Grado de Maduración del chile guajillo, los productos que se obtuvieron de los lotes M1 a la M13, son adecuados para comercializar. De acuerdo a la Norma NMX-FF-107/1-SCFI-2006 el chile guajillo (Fig.5) deshidratado en el secador solar tipo caseta utilizando convección natural es de calidad Extra.



Figura 5. Chile guajillo deshidratado en un secador solar tipo caseta operando en convección natural

Parte de este trabajo consistió en analizar las propiedades del chile guajillo que se obtienen al realizar la deshidratación en las diferentes tecnologías de secado convencional en el estado de Zacatecas. Lo anterior es para ver la factibilidad que las tecnologías solares evaluadas en este trabajo puedan ser una alternativa para un proceso limpio y de calidad en el deshidratado del chile guajillo. En la Tabla IV se presentan las propiedades que se obtienen al deshidratar el chile en referencia mediante las tecnologías convencionales de secado en el estado de Zacatecas.

Tabla IV Caracterización del chile guajillo deshidratado por método convencional -en Zacatecas

Tipo de secado	Longitud (mm)	Ancho (mm)	Peso (g)	Volumen (ml)	Densidad (g/ml)	Humedad final (%)
Planta	172.30	37.138	11.040	57.10	0.198	25.92
Secadora	167.13	37.666	8.586	52.20	0.164	17.82
Patio (A)	159.80	32.872	6.396	42.00	0.150	14.66

Patio (B)	144.00	34.322	8.405	50.60	0.173	19.08
Microtúnel	157.60	36.205	9.224	57.90	0.163	14.99

De acuerdo a los resultados presentados en la Tabla IV, ninguna de los tipos de secado satisface el contenido de humedad establecido en la NMX-FF-107/1-SCFI-2006.

Con lo que respecta a los tiempos de secado en la Tabla V se muestra una comparación de los resultados obtenidos en las tres tecnologías evaluadas con respecto al tiempo de secado en una deshidratadora convencional que utiliza gas LP. Cabe mencionar que el tiempo de secado con gas LP fue continuo a condiciones controladas. El tiempo de secado solar más corto fue de 40.5 h y considerando días de 8 h de sol, fueron 5 días de secado solar, comparado con 1.25 días del secado con gas LP.

Tabla V Comparación del tiempo de secado que se obtuvo las diferentes tecnologías solares comparados con el tiempo de secado en deshidratadora.		
Tipo de secado	Tiempo de secado	Tiempo de secado (hora sol)
Deshidratadora (Gas LP)	30.0	
Patio		67.5
Tipo gabinete por convección natural		40.5
Tipo gabinete por convección forzada		54.0

El uso de una operación acoplando la tecnología de la deshidratadora con gas LP y la tecnología solar empleando convección natural de acuerdo a los resultados presentados, deben de ser la mejor alternativa para disminuir el consumo de gas LP utilizado en la operación y el % de Humedad del producto final, incrementando ganancias en la operación y un producto de mayor calidad.

CONCLUSIONES

La evaluación de las tres tecnologías de secado solar para deshidratar el chile guajillo confirma que si pueden ser una alternativa al proceso convencional de secado. Que el producto que se obtiene de acuerdo a Norma de calidad Extra, por lo tanto, puede ser comercializable.

Sería conveniente evaluar una operación híbrida utilizando gas LP y la tecnología solar con convección natural, ya que se puede esperar una menor cantidad de humedad en el producto final, además de un incremento en el beneficio económico al comercializar el producto, si solo se usa el deshidratado con gas LP.

REFERENCIAS

- Aguayo Muñoz M. M. (2015), "Análisis del proceso convencional de secado de chile y propuesta general del Proyecto de secado solar de chile en el Estado de Zacatecas", Tesis Licenciatura, Universidad Autónoma de Zacatecas, Zacatecas.
- Bayona Roa C. A. (2011), "Modelamiento matemático de un secador solar de plantas aromáticas", Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.
- Bravo Lozano Á. (2010), "Importancia del cultivo de chile en Zacatecas", *Memorias Promert Foro para Productores de Chile 2010*, Zacatecas.
- Colina Irezabal M. L (2010), "Deshidratación de alimentos", 1ra ed., México, D. F.: Trillas.
- Esper Muhlbauer W. (1998), "Solar drying an effective means of food preservation", *Renovable Energy*, N 15, pp. 95-100.

- Espinosa Santana A. L. (2014), "Análisis teórico sobre la factibilidad técnica para la instalación de un secador de chile con tecnología de calentamiento solar de aire mediante captadores planos en el Estado de Zacatecas", Tesis Licenciatura, Universidad Autónoma de Zacatecas.
- Galindo González G. (2002), "Caracterización de productores de chile en el altiplano de Zacatecas" *Folleto Técnico*, vol. 5, p. 102.
- Hernández R, J.; Martínez V., O.; Quinto D, P.; Cuevas D, J.; Acosta O., R.; Aguilar, J. O. (2010), "Secado de chile habanero con energía solar", *Revista Iberoamericana de Tecnología Postcosecha*, vol. 10, núm. 2, pp. 120-127
- Jangam S. V., Law C. L. y Mujumdar A. S. (2010), "Drying of Foods, Vegetables and Fruits", 1ra ed., Singapur: E-book.
- López Vidaña E. (2011), "Caracterización y evaluación de la eficiencia térmica y de secado en un deshidratador híbrido (solar-gas)", Tesis M. en C. Centro Interdisciplinario para el Desarrollo Integral Regional Unidad Oaxaca, Santa Cruz Xoxocotlán, Oaxaca.
- Megha S. Sontakke, Prof. Sanjay P. Salve, Solar drying technologies: A review, *International Refereed Journal of Engineering and Science*, 4, 4 29-35, 2015
- Mujumdar S. (2006), "Handbook of Industrial Drying", 3ra ed., Boca Raton: CRC Press.
- Serna Reyes C. J. (2016), "Determinación de color de chiles secos por espectrofotometría". Seminario de Titulación II, Universidad Autónoma de Zacatecas.
- Vega de Kuyper J. C. y Ramírez Morales S. (2014), Fuentes de energía, renovables y no renovables. Aplicaciones, 1ra ed., México, D. F.: Alfaomega Grupo Editor.