

Ángulo de inclinación óptimo de un colector solar y el impacto en su rendimiento

Imer López¹, Guillermo Ibáñez¹,
Aracely López¹, Ignacio de Jesús Gómez¹

¹ Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico de Energía Renovable, Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas, Avenida Central Sur Poniente núm. 1460, colonia Centro, Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, C.P. 29000, México, E-mail: logi7912@hotmail.com, guibdu@hotmail.com

RESUMEN

Un colector solar capta la máxima radiación solar cuando esta superficie está en un ángulo vertical de incidencia. Esto brinda el concepto de ángulo óptimo. En este trabajo se calculó mediante un método sencillo el ángulo óptimo de un colector solar. El modelo incluye un ángulo óptimo mensual, estacional y anual. Únicamente son requeridos la latitud, longitud y datos de radiación promedio. El ángulo óptimo es presentado para la ciudad de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas. El modelo compara el impacto del ángulo óptimo en la colección de radiación solar con los ángulos comúnmente usados. Se encontró que el ángulo óptimo igual anual es aceptable en la práctica ya que comparado con el mensual y estacional los errores relativos de la ganancia de energía solar son 4.7% y 3.9% respectivamente, y siendo la opción más económica.

Palabras clave: ángulo óptimo, colector solar.

INTRODUCCIÓN

El diseño y desarrollo de sistemas energéticos solares requiere el conocimiento de la variación y utilización máxima de la radiación solar incidente en un lugar determinado. Los colectores solares (CS), que son una especie de intercambiadores de calor, son fundamentales en la utilización eficiente de un importante recurso energético renovable, como lo es la energía solar. Estos generalmente son posicionados con ángulo fijo y orientados hacia el sur (hemisferio Norte) u orientados hacia el Norte (hemisferio Sur). En la bibliografía actual se considera que el ángulo óptimo de un CS es igual a la latitud (δ) local 15° (seleccionando + en los meses de invierno y - en los meses de verano), Tiris y Tiris, 1998. El ángulo óptimo de un sistema fotovoltaico es muy diferente al de un CS, esto se determina mediante la continuidad, la homogeneidad y los picos de energía de la radiación solar (Yang, 1993). Existen gran cantidad de publicaciones las cuales difieren en cuanto a las recomendaciones para el ángulo óptimo basado únicamente en la latitud (Yadav y Chandel, 2013), mucha de esta información usualmente requiere de datos de radiación medidos por estaciones meteorológicas por varios años. Estos datos meteorológicos son medidos en los diferentes tipos de climas incluyendo claros, nublados, lluviosos, etcétera. Esto datos, y en especial de radiación solar muchas veces no están disponibles en algunos

lugares de tal manera que es necesario estimarla. En la práctica un CS es usualmente orientado al sur y fijado con una inclinación la cual maximiza el promedio de radiación captada durante todo un año.

Muchos parámetros afectan la energía, la exergía, las eficiencias de conversión y condiciones de trabajo de un colector. Uno de los parámetros más importantes es la intensidad de radiación solar, el cual afecta directamente la eficiencia térmica y exergética. De aquí la importancia de maximizar su aprovechamiento.

En este trabajo se analizan los aspectos teóricos para seleccionar un ángulo de inclinación para un CS utilizado en Tuxtla Gutiérrez, Chiapas.

DESCRIPCIÓN DEL MODELO

La radiación incidente instantánea, I_T , en una superficie de un CS con inclinación β es viene dado por (Nijegorodov *et al.*, 1994).

$$I_T = I_{bT} + I_{dT} + I_{rT} \quad (1)$$

donde I_{bT} , I_{dT} e I_{rT} son los componentes instantáneos de la radiación directa, difusa y reflejada en una superficie inclinada. Las componentes difusa, reflejada y directa están dadas por las siguientes expresiones matemáticas:

$$I_{dT} = I_d (1 + \cos\beta) / 2 \quad (2)$$

$$I_{rT} = \rho I (1 - \cos\beta) / 2 \quad (3)$$

y

$$I_{bT} = (I_b \cos \theta) / \cos \theta_z \quad (4)$$

donde I_d , I_b e I son los valores instantáneos de la radiación global difusa, directa y global en una superficie horizontal y ρ es la reflectividad solar de una localidad. La expresión de radiación global puede también escribirse como

$$I = I_b + I_d \quad (5)$$

por tanto,

$$I_{rT} = \rho(I_b + I_d)(1 - \cos\beta) / 2 \quad (6)$$

El ángulo θ es el formado entre el flujo de radiación solar incidente y la normal a una superficie plana y está dada por,

$$\cos \theta = \cos(\Phi - \beta) \cos \delta \cos \omega + \sin(\Phi - \beta) \sin \delta \quad (7)$$

donde Φ es la latitud, δ es el ángulo de declinación y ω es el ángulo del medio día solar. El ángulo de declinación está dado por la siguiente expresión:

$$\delta = 23.45 \sin [360 / 365 (284 + n)] \quad (8)$$

n es el número del día del año (1-365).

El ángulo θ_z en la Ecu. (4) es el ángulo para una superficie horizontal ($\beta = 0$) y utilizando la Ecu. (7):

$$\cos \theta_z = \cos \Phi \cos \delta \cos \omega + \sin \Phi \sin \delta \quad (9)$$

El cálculo de la radiación total I_T en una superficie inclinada se puede obtener usando los valores medidos de I y de los valores estimados tanto de I_d y ρ .

El flujo de exergía asociada con la radiación solar incidente en un colector solar está dado por (Petela, 1964):

$$Ex_{solar} = (1 - T_a / T_s) I \quad (10)$$

La Ecu. (10) muestra el aprovechamiento más simplificado para la evaluación de la exergía de la radiación solar y en donde T_a es la temperatura ambiente y T_s es la temperatura aparente del sol como recurso exérgico el cual se asume en este análisis como 4,500 K.

Mediciones de I

El uso de datos de radiación solar obtenidos por estaciones meteorológicas es importante para obtener cálculos lo más exactos posibles, aunque en la ciudad de Tuxtla existen varias estaciones de medición para este trabajo se utilizaron los datos que proporcionados por <https://eosweb.larc.nasa.gov> en donde se brindan información técnica recabada por 23 años, que son útiles para el diseños de sistemas solares.

Estimación de I_d y I_b

La radiación difusa y directa en una superficie horizontal puede ser estimada a partir del promedio mensual de la radiación diaria global extraterrestre. La radiación global instantánea extraterrestre, h_0 está dado por,

$$h_0 = I_0 (\cos \Phi \cos \delta \cos \omega + \sin \Phi \sin \delta) \quad (11)$$

donde

$$I_0 = I_{sc} (1 + (0.033 \cos 360 n) / 365) \quad (12)$$

I_{sc} es la constante solar, la cual tiene un valor de 1373 W/m². El valor de la radiación global extraterrestre puede ser calculado integrando el término contenido en Ecu. (12) durante la duración del día es decir, desde la salida del sol hasta la puesta. Por tanto,

$$H_0 = I_0 \int (\cos \Phi \cos \delta \cos \omega + \sin \Phi \sin \delta) dt \quad (13)$$

tenemos también,

$$t = 180 \omega / 15\pi \quad \text{o,} \quad dt = 180 d\omega / 15\pi \quad (14)$$

sustituyendo en Ecu. (13)

$$H_0 = \frac{12I_0}{\pi} \times \int_{-\omega_s}^{\omega_s} (\cos \Phi \cos \delta \cos \omega + \sin \Phi \sin \delta) d\omega \quad (15)$$

donde ω_s es la salida o puesta del sol ($-\omega_s$) que está determinado por la siguiente ecuación:

$$\omega_s = \cos^{-1} (-\tan \Phi \tan \delta) \quad (16)$$

Integrando la ecuación (15),

$$H_0 = \frac{12I_0}{\pi} (\cos \Phi \cos \delta \sin \omega_s + \omega_s \sin \Phi \sin \delta) \quad (17)$$

Como se puede apreciar la ecuación (17) brinda el promedio diario de radiación extraterrestre en la cual el número de días está incluido en la declinación (δ). El

promedio mensual de radiación extraterrestre, se puede determinar mediante la ecuación (17) para cada mes (Klein, 1977) sugiere que el promedio mensual puede ser tomado de los promedios diarios de los siguientes días: 17 de enero, 16 de febrero, 16 de marzo, 15 abril, 15 mayo, 11 de junio, 17 de julio, 16 de agosto, 15 de septiembre, 15 de octubre, 14 de noviembre y 10 de diciembre. La ecuación (17) puede utilizar los datos anteriores para el cálculo de los promedios mensuales.

El promedio mensual de la radiación solar difusa en una superficie horizontal (H_d) puede calcularse primeramente mediante el cálculo de valores promedios mensuales del índice de claridad,

$$\bar{K}_T = \frac{\bar{H}}{\bar{H}_0} \tag{18}$$

La correlación entre la radiación global y la difusa utilizada en este trabajo es la dada por J.K. Page (1961), la cual es una expresión lineal que ha sido utilizada por otros autores con buenos resultados [10,11]

$$\frac{\bar{H}_d}{\bar{H}} = 1 - 1.12\bar{K}_T \tag{19}$$

o

$$\bar{H}_d = \bar{H}(1 - 1.112\bar{K}_T) \tag{20}$$

El promedio mensual diario de la componente directa (H_b) de la radiación global H se puede calcular simplemente como:

$$\bar{H}_b = \bar{H} - \bar{H}_d \tag{20}$$

RESULTADOS

En la figura 1 se muestra el promedio mensual diario de la radiación solar (\bar{H}) y el promedio mensual diario de la radiación solar extraterrestre (\bar{H}_0) en una superficie horizontal en la ciudad de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas. El promedio en invierno de H es de 15.89 MJ/m² día y el valor promedio en verano es de 19.15MJ/m² día. Los valores de la radiación directa y difusa componentes del promedio mensual diario de la radiación global en una superficie horizontal se muestra en la figura 2. En dos meses de otoño y dos de invierno, las componentes difusa y directa son aproximadamente iguales y ambas componentes tienen la misma contribución a la radiación solar. En primavera, la componente directa es dos veces más que la difusa y es la principal de radiación.

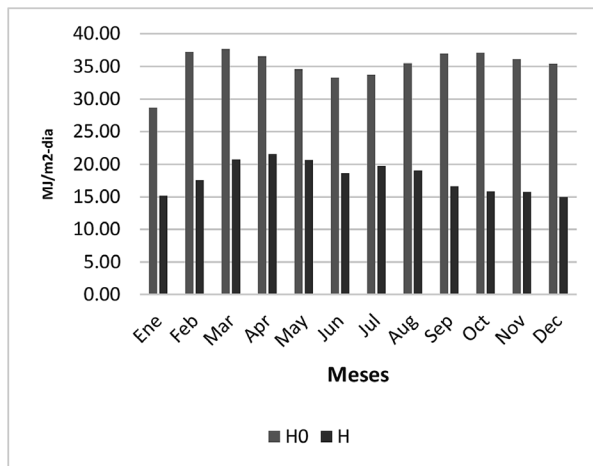


FIGURA 1 Promedio mensual de radiación diario (H) y promedio mensual diario extraterrestre (H0) en una superficie horizontal en Tuxtla Gutiérrez.

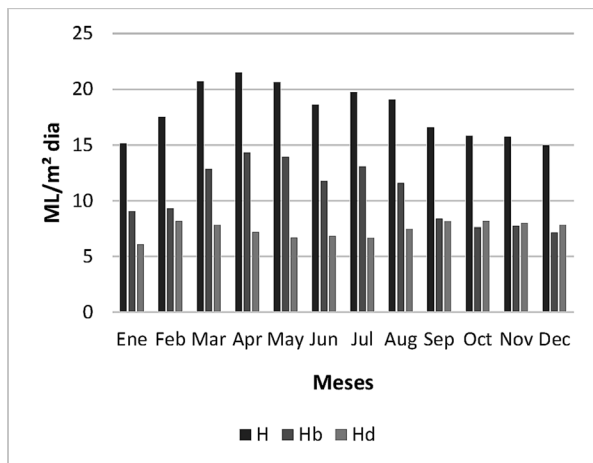


FIGURA 2 Promedio mensual diario de radiaciones global (H), difusa (Hd) y directa (Hb) en una superficie horizontal en Tuxtla Gutiérrez.

En la tabla 1 se muestra el promedio mensual diario de la radiación global medida para Tuxtla Gutiérrez, así como también los cálculos de los valores de la radiación solar difusa y extraterrestre, índice de claridad, ángulo óptimo y promedio mensual diario de radiación global en una superficie inclinada. En las figuras 3 y 4 muestra el promedio diario total de la radiación solar para una superficie orientada hacia el sur así como el ángulo de inclinación que se varía de 0° a 90° en pasos de 10°. Es claro ver en las gráficas que existe un único ángulo óptimo (β_{opt}) para cada mes del año por los cuales la radiación

solar es la mayor para el mes dado. De la tabla 1 podemos observar que el ángulo óptimo de inclinación de un CS en Enero es de 42° y que la radiación total mensual incidente para ese ángulo es de $19.36 \text{ MJ}/(\text{m}^2 \text{ día})$. El

ángulo de inclinación óptimo en el mes de Junio es de 0° y el total de radiación total incidente en este ángulo es de $18.62 \text{ MJ}/\text{m}^2 \text{ día}$. El ángulo óptimo se incrementa durante los meses de invierno.

Tabla 1								
Promedios mensuales diarios de radiación global (medida), difusa (calculada) y extraterrestre en una superficie horizontal, índice de claridad, ángulo de inclinación óptimo y promedio de radiación global diaria con ángulo de inclinación óptimo.								
Locali.	Mes	Hg	Hd	H _o	KT	$\beta_{\text{opt}}(^{\circ})$	Hb	HT
Tuxtla Gutiérrez, CH. Lat.[N] 16.75, Longitud [O] 93.1	Ene	15.155	6.10	28.65	0.53	42	9.06	19.36
	Feb	17.535	8.20	37.22	0.47	36	9.33	19.27
	Mar	20.72	7.84	37.65	0.55	18	12.88	21.48
	Abr	21.525	7.20	36.56	0.59	2	14.32	21.53
	May	20.65	6.71	34.56	0.60	0	13.94	20.65
	Jun	18.62	6.85	33.29	0.56	0	11.77	18.62
	Jul	19.74	6.68	33.71	0.59	0	13.06	19.74
	Ago.	19.075	7.48	35.47	0.54	0	11.59	19.08
	Sep	16.59	8.18	36.99	0.45	11	8.41	16.77
	Oct	15.82	8.20	37.12	0.43	29	7.62	16.79
	Nov	15.75	7.99	36.13	0.44	36	7.76	17.99
	Dic	14.98	7.82	35.42	0.42	40	7.16	17.72

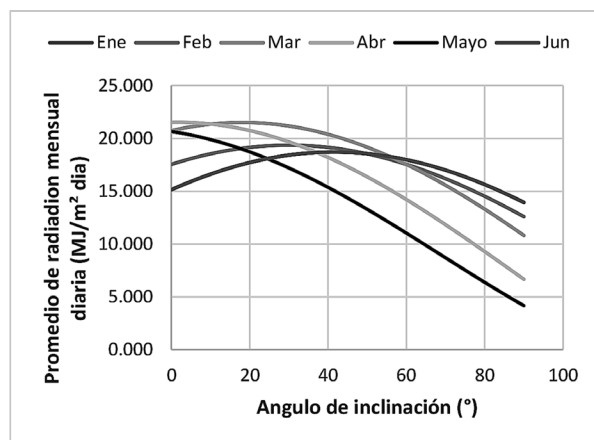


FIGURA 3

Promedio mensual diario de radiación solar en un panel orientado hacia el sur en Tuxtla Gutiérrez para los meses de enero-junio.

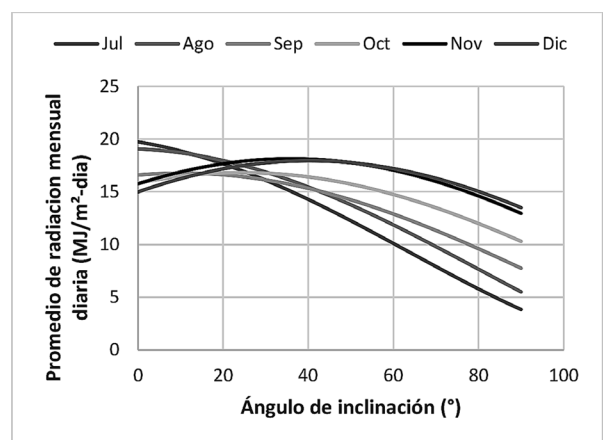


FIGURA 4

Promedio mensual diario de radiación solar en un panel orientado hacia el sur en Tuxtla Gutiérrez para los meses de enero-junio.

La figura 5 muestra los ángulos para cada uno de los meses del año cuando el colector es inclinado con el ángulo óptimo, en promedio estacional y en el promedio anual. El promedio estacional fue calculado mediante la determinación del valor promedio del ángulo de inclinación para cada temporada y para la implementación de este se necesita que el ángulo del CS sea cambiado cuatro veces al año. En primavera el ángulo de inclinación toma un valor de 7°, verano 0°, en otoño 25° y en invierno 39°. El ángulo promedio anual fue calculado encontrando el valor promedio del ángulo de inclinación para todos los meses del año. El promedio anual fue establecido en 18°. En las figuras 6 y 7 se muestra la energía solar mensual y la exergía de la radiación obtenida cuando el ángulo de inclinación es óptimo, cuando se usa el ángulo de inclinación estacional promedio y cuando se usa el ángulo promedio anual. La energía captada es tabulada y detallada en la tabla 2. Cuando el ángulo de inclinación mensual óptimo es utilizado la captación de energía anual obtenida fue de 238.88 MJ/m² día. Con el ángulo estacional la colección estacional de energía fue de 236.93 MJ/m² día y finalmente con el ángulo de inclinación promedio anual fue la captación fue de 227.46 MJ/m² día.

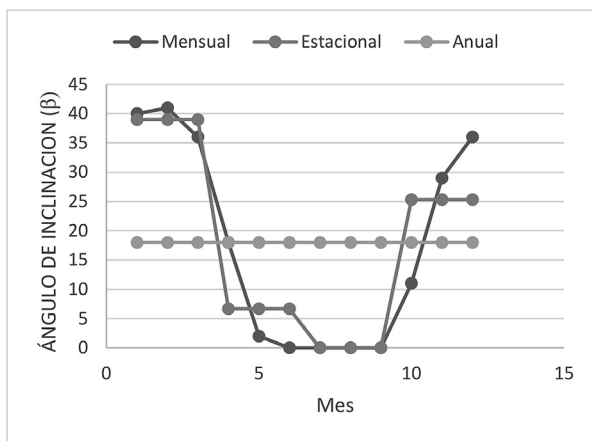


FIGURA 5

Promedios de exergía de la radiación estimada en todo el año para Tuxtla Gutiérrez para varios ángulos típicos

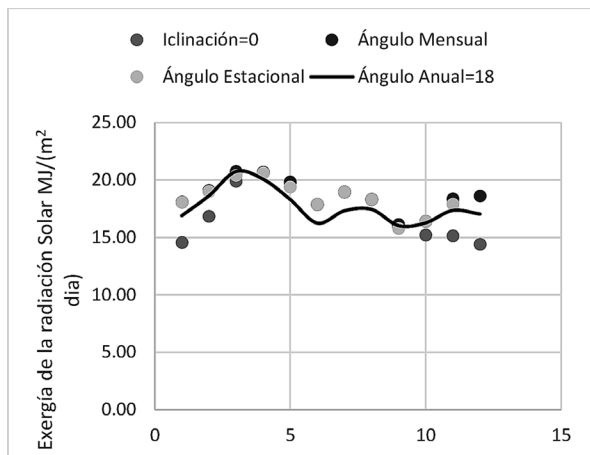


FIGURA 6

Promedios de exergía de la radiación estimada en todo el año para Tuxtla Gutiérrez para varios ángulos típicos.

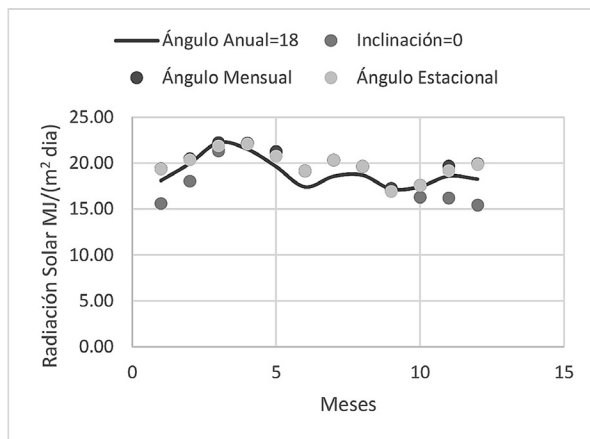


FIGURA 7

Promedios energía estimada en todo el año para Tuxtla Gutiérrez para varios ángulos típicos.

CONCLUSIONES

Los resultados muestran que el ángulo de inclinación promedio óptimo para los meses de invierno es 39° y para los meses de verano de 0°. Esto en general es aceptable comparándolo con el modelo que determina el ángulo óptimo a partir de la igualdad de este con la latitud. Está claro en la tabla 2 que la cantidad de pérdida de la colección de energía energética como exergética utilizando un ángulo de 0° comparado con el ángulo óptimo mensual es de 6.67% y 6.92% respectivamente, valores muy similares ya que la exergía de

acuerdo con la Ecu. (11) es directamente proporcional a la radiación solar. Comparando el ángulo óptimo mensual con el estacional, la pérdida de la colección de energía es de 0.8 %, lo cual nos brinda la posibilidad de ajustar el colector solar únicamente cuatro veces al año con resultados similares a si se ajusta doce veces al año, lo cual es aceptable pero incrementa el costo del colector ya que se necesita un sistema para fijarlo a diferentes ángulos.

La ganancia de energía cuando usamos el ángulo promedio anual comparado con el estacional es de 9.63 %, cual es una buena opción debido a que el ajuste de un colector solar para aplicaciones de calentamiento nos garantiza el máximo de captación de radiación solar con un solo ajuste. El criterio de ajuste mensual, estacional y anual depende en gran manera del criterio del usuario.

Angulo	Dic	Ene	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	I Anual
β_{opt}	40	42	33	19	2	0	0	0	0	11	27	40	
Prom. Radiación	19.92	19.36	20.44	22.22	22.15	21.24	19.15	20.30	19.62	17.27	17.56	19.65	238.88
Prom. Exergía	18.59	18.08	19.08	20.74	20.67	19.82	17.88	18.95	18.31	16.11	16.39	17.88	222.96
B =0													
Prom. Radiación	15.41	15.59	18.04	21.31	22.14	21.24	19.15	20.30	19.62	17.06	16.27	16.20	222.34
Prom. Exergía	14.38	14.55	16.83	19.89	20.66	19.82	17.88	18.95	18.31	15.93	15.19	15.12	207.52
β Estacional Ajustado	39	39	39	7	7	7	0	0	0	25	25	25	
Prom. Radiación	19.84	19.35	20.35	21.86	22.08	20.76	19.15	20.30	19.62	16.91	17.156	19.65	236.93
Prom. Exergía	18.52	18.06	19.00	20.04	20.60	19.38	17.88	18.95	18.31	15.78	16.39	17.88	221.14
β Anual Ajustado	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	
Prom. Radiación	18.25	18.10	19.96	22.22	21.50	19.61	17.40	18.55	18.69	17.17	17.43	18.59	227.46
Prom. Exergía	17.03	16.89	18.62	20.73	20.07	18.30	16.24	17.32	17.44	16.03	16.27	17.35	212.30

LITERATURA CITADA

- TIRIS, M., & C. TIRIS, 1998.** Optimum Collector Slope and Model Evaluation: Case study for Gebze, Turkey. *Energy Conversion and Management* 39:167-172.
- JINHUAN Y., 1993.** Further study of optimum tilted angle for fixed photovoltaic arrays. *Acta Energiæ Solaris Sinica*. 14:4-7.
- KUMAR, A. & S.S. CHANDEL, 2013.** Tilt angle optimization to maximize incident solar radiation: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 23:503-513.
- NIJEGORODOV, N., K.R.S. DEVAN, P.K. JAIN & S. CARLSSON, 1994.** Atmospheric transmittance models and analytical method to predict the optimum slope of an absorber plate, variously oriented at any latitude. *Renewable Energy*. 4, 529.
- PETELA, R., 1964.** Exergy of heat radiation. *ASME Journal of Heat Transfer* 86:187-192.
- KLEIN, S.A., 1961.** Calculation of monthly average insolation on tilted surfaces. *Solar Energy* 19:325.

Incorporación de chaya *Cnidoscolus aconitifolius* (Mill.) I.M. Johnst. (Euphorbiaceae) y pacaya *Chamaedorea tepejilote* Liebm. (Arecaceae), en alimentos de consumo frecuente con medición de parámetros de calidad sanitaria, sensorial y nutricional*

Gabriela Palacios Pola¹, Tlayuhua Rodríguez García¹,
Paulina Ayvar Ramos¹, Joel Pantoja Enríquez¹,
Yadira Ivett Bartolón Roblero², Miguel Abud Archila²

¹Facultad de Ciencias de la Nutrición y Alimentos y Centro de Energías Renovables, Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas, Libramiento Norte Poniente núm.1150, col. Lajas Maciel, Tuxtla Gutiérrez, Chiapas. Email: gabriela.palacios@unicach.mx | ²Departamento de Ingeniería Bioquímica y Posgrado e Investigación Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez, Carretera Panamericana km 1080, Tuxtla Gutiérrez, Chiapas.

Ingredientes	Infusión
37 g de harina de chaya	15 g de harina de chaya
250 g de harina de maíz	250 ml de agua
2 g de sal	

Fuente: *Propia*

TABLA 1

Ingredientes para la elaboración de tostadas.

Ingredientes	Condimentos en polvo
Carne de cerdo 200 gr	Pimienta negra molida 0.4 gr
Harina de pacaya 100 gr	Canela molida 0.4 gr
Vinagre 20 ml	Comino 0.4 gr
Sal común 2 gr	Ajo 0.30 gr
Sal de cura 0.05 gr	Clavo 0.2 gr

Fuente: *Propia*

TABLA 2

Ingredientes para la elaboración de chorizo.

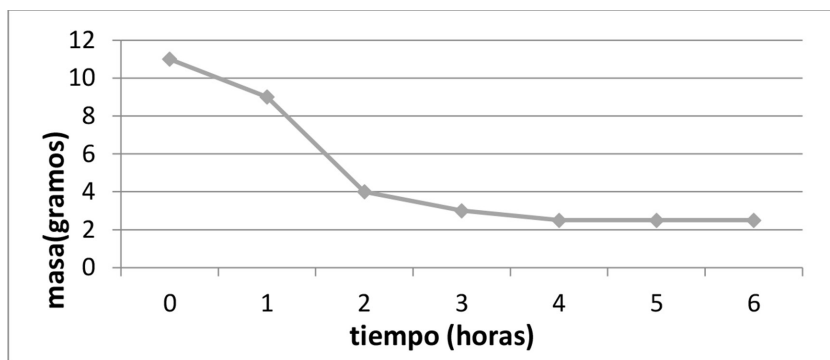


FIGURA 1

Curva de secado de inflorescencia de pacaya en deshidratado solar. Temperatura en interior de la cámara 30°C a 35,6°C, con radiación 310-430 watts/m²

* El anexo que aparece en la parte superior de la hoja como fe de errata se omitió en la edición formal de la revista anterior. Se agrega para ser considerado y así tener la visión de unidad del artículo.

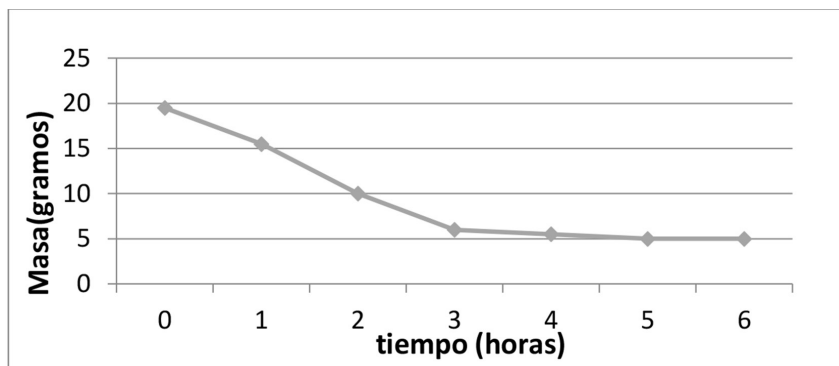


FIGURA 2

Curva de secado de hojas de Chaya en deshidratado solar. Temperatura en interior de la cámara 30 °C a 35.6 °C con radiación 310-430 watts/m²

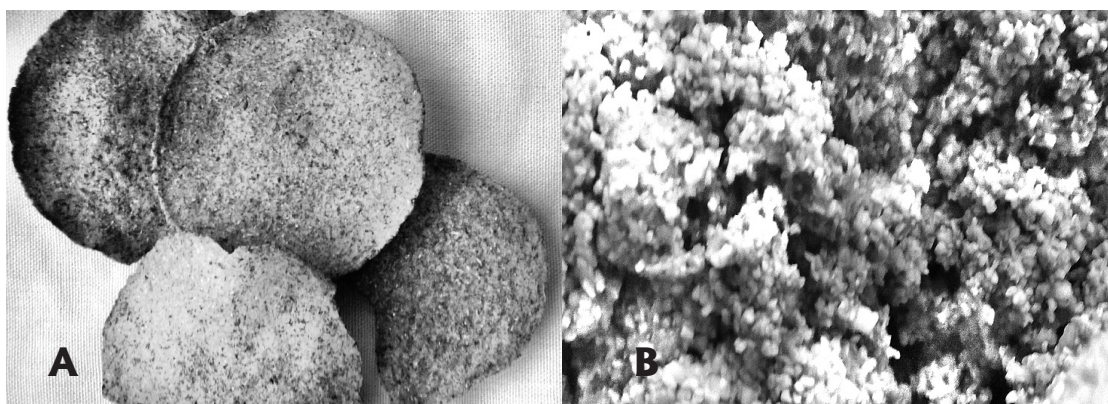


FIGURA 3

A) Tostadas enriquecidas con harina de chaya, B) chorizo enriquecido con Pacaya.

Productos	Humedad	Cenizas	Grasas	Fibra	Proteínas	Carbohidratos	Total
Harina de Pacaya (<i>Chamadorea Tepejilote</i>)	2.94	13.75	4.19	6.14	13.06	59.92	100
Harina de Chaya (<i>Cnidocolus Chayamansa</i>)	10.33	8.76	16.2	13.9	8.7	42.11	100
Tostadas enriquecidas con harina de Chaya	6.5	3.5	9.1	3.2	4.8	72.9	100
Chorizo enriquecido con harina de Pacaya	23.7	3.9	36.6	6.1	9.6	20.1	100

TABLA 3

Resultados del análisis bromatológicos correspondiente a la materia prima y los productos obtenidos (g/100)

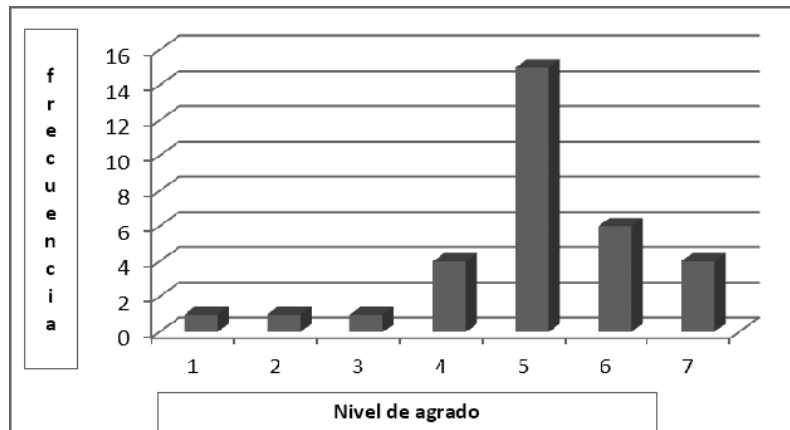


FIGURA 4 Histograma de frecuencia del nivel de agrado de tostada enriquecida.

	Chorizo con harina de pacaya	Chorizo sin harina de pacaya
Recuento	19	19
Promedio	6.05263	7.52632
Desviación Estándar	1.54466	1.02026
Coefficiente de Variación	25.5204%	13.5559%
Mínimo	3.0	5.0
Máximo	9.0	9.0
Rango	6.0	4.0
Sesgo Estandarizado	-0.353287	-1.07728
Curtosis Estandarizada	-0.161859	0.720873

Resumen Estadístico de las calificaciones generadas por los jueces sensoriales realizadas a las muestras de chorizo con y sin adición de harina de pacaya.

Alimento (10 gr)	Mesofilicos	Mohos y levaduras	Coliformes totales
Chorizo	5 x10 ¹ valor estimado	<100 valor estimado	<30 NMP
Tostadas	<100 valor estimado	<100 valor estimado	<30 NMP/g

Resultados obtenidos de análisis microbiológicos realizados a chorizo enriquecido con harina de pacaya y tostadas enriquecidas con harina de chaya

