

Eficiencia en el uso de la energía en invernaderos mexicanos

Raquel Salazar Moreno^{1§}, Pedro Cruz Meza¹ y Abraham Rojano Aguilar¹

¹Universidad Autónoma Chapingo. Carretera México-Texcoco, km 38.5. Chapingo, Estado de México, C.P. 56230. México. pcruzmeza@yahoo.com.mx. [§]Autora para correspondencia: raquels85@yahoo.com.mx, abrojano@correo.chapingo.mx.

Resumen

La producción bajo invernaderos es una de las ramas de la agricultura que más energía consume, el costo por concepto de consumo de energía en invernaderos varía entre 20-40% del costo total dependiendo del tipo de producción. En México existen diferentes niveles de tecnología distribuidos a lo largo del país, que van desde producción a campo abierto hasta invernaderos de alta tecnología con diversos sistemas de control climático. La producción de alta tecnología presenta rendimientos elevados con alta calidad con un uso óptimo de la tecnología en un esquema amigable con el ambiente. En este trabajo se presenta el análisis energético a detalle en la producción de jitomate para dos invernaderos, uno localizado en Baja California y el otro en Puebla, que se utiliza para dos ciclos de producción durante el año. El primer invernadero no requiere de un sistema de calefacción, debido a que se utiliza para un ciclo de producción. En el segundo invernadero, cuenta con un sistema de calefacción, dado que se utiliza durante todo el año. La productividad energética fue de 2.43 kg MJ⁻¹ y 0.4 kg MJ⁻¹ y el uso de energía por m² se estimó en 5.14 MJ m⁻² y 1085 MJ m⁻² para el invernadero sin y con calefacción (Valle de Mexicali y Puebla) respectivamente. Los resultados muestran que es indispensable incrementar la eficiencia en el uso de la energía en los sistemas de calefacción, utilizando otras opciones existentes en el mercado, así como el evitar pérdidas de calor durante la noche.

Palabras clave: calefacción, enfriamiento, enriquecimiento de CO₂, jitomate.

Introducción

La energía tiene un papel fundamental en el desarrollo social y económico, representa un sector estratégico en todos los países; sin embargo, hay una falta de políticas de desarrollo en energía rural enfocadas a la agricultura. Este sector tiene un rol dual como usuario y como proveedor de energía. El uso de energía para la producción agrícola puede ser aplicada en diferentes formas, tales como mecánica (maquinas agrícolas, fuerza humana y animal), fertilizantes y químicos (pesticidas y herbicidas). La cantidad de energía utilizada en la producción agrícola, distribución y procesamiento debe de ser adecuada para alimentar la creciente población y alcanzar otros objetivos sociales y económicos.

Uno de los sectores dentro de la agricultura que más energía consumen son los invernaderos. La agricultura protegida en México se ha incrementado de 3 214 ha en 2005 a 15 000 ha en 2010, de las cuales existen 8 682 invernaderos, 2 243 casas sombra y 2 929 túneles (micro y macro) (SIAP, 2010). Los estados de Baja California, Sonora, Sinaloa y Jalisco constituye 71% del total de agricultura controlada en México (Nieves *et al.*, 2011). 79% de los invernaderos en México se encuentra bajo un sistema de producción entre media y alta tecnología (AMHPAC, 2009). El rendimiento del jitomate en invernaderos mexicanos va desde 160.55 t ha⁻¹ para baja tecnología hasta 600.21 t ha⁻¹ para invernaderos de alta tecnología(AMHPAC, 2009). Dado que no se puede expandir el área cultivable, generalmente los productores utilizan más energía para incrementar la producción total, debido a la falta de conocimiento de tecnologías eficientes y a la dificultad en su uso.

De acuerdo a Djelic y Dimitrijevic (2009) el consumo específico de energía muestra diversos valores para diferentes construcciones de invernaderos. Los valores más bajos fueron obtenidos para los invernaderos interconectados y los más altos para el tipo túnel solitario. Los invernaderos interconectados muestran la menor cantidad de energía utilizada por kilogramo de producto comparada con otras estructuras. Los productores agrícolas no están conscientes de la cantidad de energía, utilizada en el proceso de producción, para tener una idea al respecto en el Cuadro 1 se listan las entradas y salidas de la producción agrícola y su energía asociada. La energía indirecta incluye la energía en semillas, fertilizantes, herbicidas (Treflan and Metribuzin), pesticidas (Diazinon y Metasystox), fungicidas (Mancozeb y Metalaxyl), estiércol y maquinaria, mientras que la energía directa incluye mano de obra, diesel, gasolina, electricidad y agua para riego.

La energía no renovable incluye, diesel, gasolina, electricidad, fertilizantes, herbicidas, pesticidas, fungicidas y maquinaria y la energía renovable incluye mano de obra,

estiércol, semillas y agua de riego. El uso eficiente de insumos ayuda a incrementar la producción y productividad, y contribuye a la economía, redditibilidad y competencia para la sostenibilidad agrícola de las comunidades rurales (Rezvani *et al.*, 2011).

El consumo de energía en invernaderos depende del punto en el que se fija la temperatura interna. Una desviación de 1 K puede causar un incremento en el consumo de la energía de alrededor de 10% (Hans, 1998).

El análisis de entradas y salidas de energía, así como la estimación de algunos índices relacionados con el uso eficiente de la energía, provee a los investigadores y tomadores de decisiones con las oportunidades para evaluar las iteraciones del uso de la energía sobre la economía de la empresa agrícola. Dado que el jitomate es la hortaliza principal en México, en el presente estudio se realiza el análisis del consumo de energía en su producción bajo dos tipos de invernadero.

Cuadro 1. Equivalentes de energía de insumos y productos en la producción agrícola.

Insumo (unidad)	Equivalentes de energía (MJ por unidad de área) (Pahlavan <i>et al.</i> , 2011; Ozkan <i>et al.</i> 2011 (a y b))	Equivalentes de energía (MJ por unidad de área (Rezvani <i>et al.</i> , 2011))
Químicos (kg)	101.2	-
Pesticidas (kg)	-	101.2
Herbicidas(kg o L)	-	238.3
Fungicidas (kg)	-	181.9
Macroelementos (kg) (Mandal <i>et al.</i> , 2002)	120	-
Mano de obra (h)	2.3	1,95
Maquinaria (h)	64.8	62.7
Estiércol (kg) (Mandal <i>et al.</i> , 2002)	0.3	-
Fertilizante, Nitrógeno (kg)	66.14	75.46
Fosfato P ₂ O ₅ (kg)	12.44	13.07
Oxido de Potasio (kg) K ₂ O	11.15	11.15
Sulfuro (S) (kg)	-	1.12
Zinc (Zn) (kg)	-	8.40
Micronutrientes (kg)	120	120
Estiercol (t)	303.1	300
Semillas(kg)	1.0	1.0
Diesel (L)	56.31	50.23
Electricidad (kWh)	3.6	3.6
Agua para riego (m ³)	0.63	1.02
Jitomate, pepino, Chile morrón (kg)	0.8	0.8
Paja (kg)	-	7.5

Metodología

Existen diferentes medidas del desempeño de la energía en el proceso de producción dados por Shrestha (1998): 1) eficiencia en el uso de la energía; 2) productividad energética; 3) energía específica; y 4). La productividad energética es un índice que mide el uso eficiente de la energía; sin embargo, alta productividad energética no significa que sea económicamente viable.

$$\text{Eficiencia en el uso de la energía} = \frac{\text{salida de energía (MJ por unidad de área)}}{\text{entradas de energía (MJ por unidad de área)}} \quad 1)$$

$$\text{Productividad energética} = \frac{\text{Producción de jitomate(toneladas por unidad de área)}}{\text{entradas de energía (MJ por unidad de área)}} \quad 2)$$

$$\text{Energía específica} = \frac{\text{entradas de energía (MJ por unidad de área)}}{\text{Producción de jitomate(toneladas por unidad de área)}} \quad 3)$$

Un parámetro que puede ser utilizado para comparar el consumo de energía para diferentes tipos de construcción en invernaderos es la energía específica MJ m⁻². De acuerdo

con Djelic y Dimitrijevic (2009), este parámetro muestra diversos valores para diferentes tipos de construcciones de invernadero. Comparado con las estructuras de túnel solitario las estructuras de invernaderos interconectados tienen los más bajos valores de energía específica.

Se tiene poca información sobre la cantidad exacta de agua, fertilizantes y otros insumos utilizados por los agricultores. Se realizó una encuesta a un grupo de productores y el promedio obtenido es el que se presenta en este estudio en dos tipos de invernadero el primer tipo localizado en el estado de Baja California y el otro localizado en el estado de Puebla. Debido a la falta de datos, se utilizó la cantidad de agua reportada por Nuño (2007) para diferentes sistemas de goteo (Cuadro 2); así como, la mano de obra utilizada en la producción bajo invernaderos obtenida por Pérez *et al.* (2003) (Cuadro 3). El Cuadro 4 presenta los rendimientos promedio de jitomate en invernaderos para el Valle de Mexicali.

Cuadro 2. Volumen de agua utilizado en diferentes sistemas de riego.

Sistemas de riego	Día	Agua total aplicada m ³ ha ⁻¹
Riego por goteo invernadero tipo Venlo	214	2 658
Riego por goteo casa sombra en la zona costera	180	5 000
Riego por goteo invernadero tipo Parral España	210	3 193

Fuente: Nuño (2007).

Cuadro 3. Mano de obra promedio por hectárea en la producción de jitomate bajo invernadero.

Concepto	Promedio
Riego	202
Tratamiento	73
Plantación	47
Recolección	1 232
Cultivo en Lab	1 805
Mantenimiento y limpieza	542
TOTAL	3 866

Fuente: (Pérez *et al.*, 2003).

Cuadro 4. Rendimiento de jitomate en invernados en el Valle de Mexicali.

Método de siembra	kg planta ⁻¹	kg m ⁻²	kg ha ⁻¹
Sustrato en bolsas de polietileno	4.17	12.53	125 300
Suelo directo en camas	3.6	14.4	144 000
Plantas cubiertas con arena	3.29	9.87	98 700
Plantación en arena	8.35	15.62	156 200
Tubería con peat most y polímeros	2.4	7.32	73 200

Fuente: Nuño (2007).

El Cuadro 5 presenta la mano de obra utilizada en diferentes operaciones en un invernadero en el estado de Puebla.

Resultados

Basados en los equivalentes de energía de los insumos y productos del Cuadro 1. Se calcularon los índices de energía en la producción de jitomate en Baja California para 1 ha (Cuadro 6) y para el caso del invernadero de Puebla (1 000 m²) (Cuadro 7).

La cantidad total de energía utilizada en la producción de jitomate bajo invernadero de polietileno fue de 51 497.2 MJ ha⁻¹ (5.14 MJ m²) en el Valle de Mexicali y 1 085 177.6 MJ por 1 000 m², en Puebla (1 085 MJ m² en dos ciclos). Debido que el invernadero en el Valle de Mexicali se utiliza para un ciclo de producción, no es necesario el sistema de calefacción. Sin embargo, el invernadero ubicado en Puebla si requiere de calefacción, ya que se utiliza para dos ciclos de producción. El sistema de calefacción consta de tres calentadores cada uno con un rendimiento térmico de 250 000 BTU h⁻¹, en total 750 000. BTU h⁻¹. Éstos calentadores se utilizan sólo durante tres meses, durante 10 h por día, lo cual da un total de 900 h.

Cuadro 5. Mano de obra utilizada en un invernadero de 1 000 m² para la producción de jitomate.

Producción de jitomate	MO (h)	Equivalente (MJ por unidad de área)	Energía total utilizada (MJ)
Siembra	6 jornales año ⁻¹	-	-
Llenado bolsas	5 jornales año ⁻¹	-	-
Transplante	20 jornales año ⁻¹	-	-
Guía del cultivo	350 jornales año ⁻¹	-	-
Cosecha	40 jornales año ⁻¹	-	-
Total en un año	421 jornales año ⁻¹	-	-
Jornal= 8 h	3 368 h	2.3	7 746.4

Cuadro 6. Insumos utilizados en la producción de jitomate bajo invernadero y sus equivalentes de energía en el Valle de Mexicali (1 ha).

Insumos	Cantidad por unidad de área	Energía equivalente (MJ por unidad de área)	Energía total equivalente (MJ ha ⁻¹)	Porcentaje de energía total agregada (%)
Semillas (kg)	3	1	3	0.01
Fosforo (kg)	50	12.44	622	1.21
Nitrato de calcio (kg)	249.49	66.14	1 6501.27	32.04
Sulfato de magnesio (kg)	97.74	120	11 728.8	22.78
Sulfato de potasio (kg)	118.44	11.15	1 320.61	2.56
Nitrato de magnesio (kg)	50	66.14	3 307	6.42
Triple 15 (kg)	55.25	101.2	5 591.3	10.86
Micronutrientes (kg)	13.58	120	1 629.6	3.16
Fosforo de aluminio (kg)	2	12.44	24.88	0.05
PrevicurN (L)	1	101.2	101.2	0.2
Leverage (L)	1	101.2	101.2	0.2
Agua para riego m ³	2 658	0.63	1 674.54	3.25
Fuerza humana (h)	3 866	2.3	8 891.8	17.27
Total de insumos de energía	-	-	51 497.2	100
Producción de energía (kg)	125 300	0.8	100 240	-
Energía específica (MJ t ⁻¹)	-	-	410.96	-
Entradas de energía (MJ kg ⁻¹)	-	-	0.41	-
Productividad energética (t MJ ⁻¹) (kgMJ ⁻¹)	-	-	0.00243	-
Uso eficiente de la energía	-	-	2.43	-
			1.946	-

Cuadro 7. Insumos utilizados en la producción de jitomate en Puebla (1 000 m²).

Insumos (%)	Cantidad por unidad de área (1 000 m ²)	Energía equivalente (MJ unidad de área)	Total de energía equivalente (MJ 1000 m ⁻³)	Porcentaje del total de energía suministrada (%)
Semillas (kg)	0.3	1	0.3	0
Sustrato de germinación (bulto)	4	1	4	0
Potasio (kg)	600	11.15	6 690	0.62
Fosforo (kg)	150	12.44	1 866	0.17
Nitrato de calcio (kg)	980	66.14	64 817	5.97
Total micronutrientes	840	120	100 800	9.29
Total químicos (kg)	14	101.2	1 416.8	0.13
Fuerza humana (h)	3 368	2.3	7 746.4	0.71
Riego por goteo (m ³)	265.8	0.63	167.45	0.02
Sistema de calefacción (calentador)	3	300 556.55	901 669.65	83.09
Total de energía proveniente de insumos	-	-	1 085 177.6	100
Energía de salida (kg)	44 000	0.8	35 200	-
Energía específica (MJ t ⁻¹)	-	-	24 663.12	-
Energía de entrada (MJ kg ⁻¹)	-	-	24.6	-
Productividad energética (t MJ ⁻¹) o (kg MJ ⁻¹)	-	-	0.00004 0.0406	-
Eficiencia en el uso de la energía	-	-	0.032	-

Equivalente a 675 mil BTU ó 712 162 MJ, y el total de insumos de energía con el sistema de calefacción es 901 669.65 MJ. (901.6 MJ m⁻²). Por lo tanto, el sistema de calefacción constituye 83.09% del total de energía utilizada de los insumos. De ahí que la eficiencia en el uso de la energía es de sólo 0.039 (sin el sistema de calefacción sería de 0.1857). El uso de energía por kg para el invernadero en Baja California y Puebla es de 0.41 MJ kg⁻¹ y 24.6 MJ kg⁻¹ respectivamente.

Los valores presentados en el Cuadro 7 son elevados comparados con los valores reportados por Djeric y Dimitrijevic (2009), 9.76 MJ m⁻² para el invernadero interconectado o multitunel y de 13.93 MJ m⁻² para el túnel. De acuerdo a los Cuadros 6 y 7 el nitrato de calcio y algunos nutrientes en general son los segundos mayores consumidores de energía en la producción de jitomate bajo invernadero. La cantidad de energía proveniente de las semillas y agua para riego son bajas comparadas con otros insumos de la producción. El Cuadro 8 hace una comparación del uso eficiente de la energía para diferentes tipos de invernadero. El invernadero ubicado en Valle de Mexicali tiene la mayor eficiencia en el uso de la energía, comparado con algunos invernaderos en Irán y Turquía.

Cuadro 8. Eficiencia en el uso de la energía para varios tipos de invernadero.

Lugares	Tamaño del invernadero (ha)	Eficiencia en el uso de la energía
Iran (Rezvani <i>et al.</i> , 2011)	1	0.18
Turquía (Ozkan <i>et al.</i> , 2004 b)	4.5	1.26
Antalya Turquía (Ozkan, 2011a)	0.36	0.2
Puebla, México con calefacción	0.1	0.039
Valle de Mexicali, México	1	1.94

Un invernadero típico en Europa tiene rendimientos tres veces arriba de un invernadero del mismo tamaño en Turquía. Esto se debe principalmente al uso más eficiente de los insumos variedades productivas y mejor control ambiental.

Conclusiones

El propósito principal de este estudio, fue la estimación del uso de energía en la producción de jitomate bajo invernadero en México para dos casos particulares, con y sin sistema de calefacción. El sistema de calefacción consume 83% del total de energía que se introduce en el invernadero (invernadero en Puebla). Por otro lado, el nitrato de calcio, sulfato de magnesio y fuerza humana son los segundos consumidores de energía.

La eficiencia en el uso de la energía fue de 1.94 y 0.32 para los invernaderos de Mexicali y Puebla. Un coeficiente menor de 1 indica un uso ineficiente de la energía durante el proceso de producción. El efecto del sistema de calefacción por metro cuadrado es sorprendente si comparamos los dos tipos de invernadero 5.14 MJ m^{-2} y 1085 MJ m^{-2} y la productividad en el uso de la energía de 2.43 kg MJ^{-1} y 0.4 kg MJ^{-1} (Valle de Mexicali y Puebla).

El uso inconsciente de fertilizantes y herbicidas no sólo incrementa el uso de energía sino además daña el ambiente, la salud y genera problemas, que van más allá del área de influencia de la producción agrícola. Estos resultados muestran la necesidad de aplicar insumos más eficientes en el uso de la energía en invernaderos mexicanos.

Sabemos que entre 70 y 80% de la energía consumida en invernaderos corresponde a la calefacción. De ahí que es importante poner atención en este sistema y en todas las cosas asociadas a él, incluyendo el mantenimiento. De acuerdo con Colby (2011) remplazando un calentador que opera de 75-90% de eficiencia puede ahorrar una cantidad considerable de energía. Asimismo, se deben de evitar las pérdidas de energía en el invernadero especialmente durante las noches.

Literatura citada

Asociación Mexicana de Horticultura Protegida (AMPHAC). 2009. Estudio de oportunidades externas para el desarrollo de la inteligencia comercial del mercado de exportación de la horticultura protegida. 208 p.

- Colby, S. 2011. Saving energy in greenhouses. GrowerMidwest URL: <http://countryfolks.com/ME2/Audiences/dirmod.asp?sid=&nm=Features&type=Publishing&mod=Publications%3A%3AArticle&mid=8F3A7027421841978F18BE895F87F791&id=EBD9E27B9DAF47B08337FB9A67AF5DDD&tier=4>.
- Djeric, M. y Dimitrijevic, A. 2009. Energy consumption for different greenhouse constructions. Elsevier. Energy. 34:1325–1331.
- Hans, J. T. 1998. Energy saving potential of greenhouse climate control. Mathematics and Computers in Simulation. Elsevier. 48:93-101 pp.
- Mandal, K. G.; Saha, K. P.; Ghosh, P. K. and Hati, K. M. 2002. Bioenergy and economic analysis of soybean-based crop production systems in central India. Bandyopadhyay KK. Biom. Bioenergy. 23(5):337-45.
- Nieves, G. V.; Van der Valk, V. and Elings, A. 2011. Mexican protected horticulture. Production and market of Mexican protected horticulture described and analysed Wageningen UR Greenhouse Horticulture. Landbouw Economisch Instituut. The Hague. Ministre of Economic Affairs. Rapport GTB.1126p.
- Nuño, M. R. 2007. Manual de producción de tomate rojo bajo condiciones de invernadero para el Valle de Mexicali, Baja California. Fundación Produce. Usuarios del modulo 21:34 p
- Ozkan, B.; Akcaoz, H. and Fert, C. 2004a. Energy input-output analysis in Turkish agriculture. Renewable Energy. 29:39-51.
- Ozkan, B.; Kurklu, A. and Akcaoz, H. 2004b. An input-output energy analysis in greenhouse vegetable production: a case study for Antalya region of Turkey. Science Direct, Elsevier. Biom. Bioenergy. 26(1):189-195.
- Ozkan, B.; Ceylan, R. F. and Kizilay, H. 2011a. Comparison of energy inputs in glasshouse double crop (fall and summer crops) tomato production. Science Direct. Elsevier. Renewable Energy. 36:1639-1644.
- Ozkan, B.; Ceylan, R. F. and Kizilay, H. 2011 b. Energy inputs and crop yield relationships in greenhouse winter crop tomato production. Science Direct. Elsevier. Renewable Energy. 36:3217-3221.
- Pérez, M. J. C.; Valenciano, J. P. y Escudero, M. M. C. 2003. Costos de producción y utilización de la mano de obra en tomate: un estudio empírico para el cultivo bajo plástico en Almería. URL:<http://www.asepelt.org/ficheros/File/Anales/2003%20-%20Almeria/asepeltPDF/227>.

- Pahlavan, R.; Omid, M. and Akram, A. 2011. Energy use efficiency in greenhouse tomato production in Iran. Elsevier. Sci. Direct. Energy. 36:6714-6719.
- Rezvani, M. P; Feizi, H. and Mondani, F. 2011. Evaluation of tomato production systems in terms of energy use efficiency and economical analysis in Iran. ISSN: 2067-3205. Not Sci. Biol. 3(4):58-65.

Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA). Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP). 2011. Shrestha, D. S. 1998. Energy use efficiency indicator for agriculture. URL: <http://www.usask.ca/agriculture/caedac/PDF/mcrae.Pdf>.