



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

**CENTRO INTERDISCIPLINARIO DE INVESTIGACIÓN
PARA EL DESARROLLO INTEGRAL REGIONAL
UNIDAD MICHOACÁN**



**ENERGÍA SOLAR PARA CALEFACCIÓN DE UN
INVERNADERO EN LA PRODUCCIÓN DE PEPINO**

**TESIS PARA OBTENER EL GRADO ACADÉMICO DE:
MAESTRO EN CIENCIAS EN PRODUCCIÓN AGRÍCOLA
SUSTENTABLE**

PRESENTA:

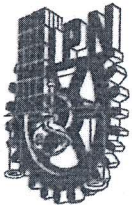
CINTYA CRISTINA GARCÍA TORO

DIRECTORES:

**M. en C. SALVADOR OCHOA ESTRADA
DR. GONZALO ALONZO RAMOS LÓPEZ**

JIQUILPAN, MICH.

DICIEMBRE 2014



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

ACTA DE REVISIÓN DE TESIS

En la Ciudad de Jiquilpan, Michoacán siendo las 12:00 horas del día 18 del mes de Noviembre del 2014 se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de la Tesis, designada por el Colegio de Profesores de Estudios de Posgrado e Investigación de CIIDIR Unidad Michoacán para examinar la tesis titulada:

"Energía solar para calefacción de un invernadero en la producción de pepino".

Presentada por el alumno:

García

Toro

Cintya Cristina

Apellido paterno

Apellido materno

Nombre

Con registro:

B	1	2	0	9	6	1
---	---	---	---	---	---	---

aspirante de:

Maestría en Ciencias en Producción Agrícola Sustentable

Después de intercambiar opiniones los miembros de la Comisión manifestaron **APROBAR LA TESIS**, en virtud de que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes.

LA COMISIÓN REVISORA Directores de tesis

M.C. Salvador Ochoa Estrada

Dr. Gonzalo Alonso Ramos López

Dr. Gustavo Cruz Cárdenas

Dr. José Teodoro Silva García .

Dr. Luis Fernando Ceja Torres.

**Dra. Hortencia Gabriela Mena Violante.
PRESIDENTE DEL COLEGIO DE PROFESORES.**



SECRETARÍA DE
EDUCACIÓN PÚBLICA
Instituto Politécnico Nacional
CENTRO INTERDISCIPLINARIO DE
INVESTIGACIÓN PARA EL
DESARROLLO INTEGRAL REGIONAL
CIIDIR - IPN - U. MICH.



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

CARTA CESIÓN DE DERECHOS

En la Ciudad de Jiquilpan de Juárez Michoacán el día 18 del mes de noviembre del año 2014, el (la) que suscribe Cintya Cristina García Toro alumno (a) del Programa de **Maestría en Ciencias en Producción Agrícola Sustentable** con número de registro B120961, adscrito a **C.I.I.D.I.R. I.P.N. Unidad Michoacán**, manifiesta que es autor (a) intelectual del presente trabajo de Tesis bajo la dirección de Salvador Ochoa Estrada y Gonzalo Alonso Ramos López y cede los derechos del trabajo intitulado Energía solar para calefacción de un invernadero en la producción de pepino, al Instituto Politécnico Nacional para su difusión, con fines académicos y de investigación.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, gráficas o datos del trabajo sin el permiso expreso del autor y/o director del trabajo. Este puede ser obtenido escribiendo a la siguiente dirección: cintya_gt_09@hotmail.com; gramos@ipn.mx; sochoae@ipn.mx. Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.

Cintya Cristina García Toro
Cintya Cristina García Toro

Nombre y firma

Agradecimientos

Agradezco en primer lugar al **Instituto Politécnico Nacional**, por haberme otorgado en su momento la beca institucional, beca BEIFI y beca tesis. Y en especial al **Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional Unidad Michoacán**, conocido como CIIDIR IPN Unidad Michoacán por haberme permitido formar parte de sus alumnos de la maestría y desarrollarme profesionalmente dentro de sus instalaciones, así como al personal que en él labora por el apoyo brindado durante el periodo de formación.

Del mismo modo agradezco al **Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, Conacyt**, por la beca otorgada durante el periodo de enero del 2013 hasta junio del 2014 con la cual pude realizar mis estudios de posgrado hasta su término.

Al **M. en C. Salvador Ochoa Estrada**, por haber puesto su confianza en mí, al permitirme elegir el tema de investigación. Por el tiempo que dedico al trabajo y por sus aportaciones en la elaboración del documento final.

Al **Dr. Gonzalo Alonso Ramos López**, profesor investigador del Centro de Investigación en Ciencia Aplicada y Tecnología Avanzada, Unidad Querétaro, por las observaciones puntuales en cuanto al contenido del trabajo y sus cuestionamientos respecto al tema de investigación.

Al **Dr. Gustavo Cruz Cárdenas**, por su apoyo incondicional, el tiempo dedicado, sus consejos y sus aportaciones para que este trabajo tuviera una mejor calidad.

Al **Dr. Luis Fernando Ceja Torres**, al **Dr. José Venegas González**, y al **Dr. José Teodoro Silva García** por las observaciones puntuales en cuanto al contenido del trabajo, por haber compartidos sus conocimientos y por el apoyo recibido de su parte como profesores y revisores de este trabajo.

Al **Dr. Luis Arturo Ávila Meléndez**, por su apoyo y consejos recibidos durante mi estancia en este centro de investigación.

A la **Dra. Yolanda Nava Cruz**, investigadora de la UAER-UNAM Jiquilpan, y al **Dr. Francisco Estrada Godoy**, profesor investigador de la ESIA Unidad Ticomán, por sus consejos y alientos de ánimo en la realización de este trabajo.

Al **M. en C. David Alejandro Pérez Marques**, estudiante de doctorado en el Centro de Investigación en Ciencia Aplicada y Tecnología Avanzada, Unidad Querétaro, por sus observaciones y aportaciones en la realización de este proyecto al construir el sistema de monitoreo utilizado en esta investigación.

A los trabajadores de este centro **Héctor Mesinas Estrada, Antonio Gómez Aviña, y Eduardo Guisar**, por su apoyo y disposición en la realización de este trabajo, a **Jaime Santillán**, por su apoyo y paciencia en la elaboración de los análisis de laboratorio, a **José García y Antonio Mejía**, por su apoyo entusiasta en la construcción del invernadero y del sistema de calefacción, además de su colaboración en el cuidado del cultivo.

A mis compañeros de generación, especialmente a mi novio **Carlos Trejo Sánchez** por todos los momentos compartidos durante la maestría.

A la **familia Herrera Trejo**, por su apoyo al darme posada mientras estuve trabajando en el invernadero.

A **mis padres** por el apoyo que me han brindado a lo largo de mi desarrollo como persona y como estudiante; por la confianza y las capacidades otorgadas para enfrentar la vida. Porque siempre estuvieron presentes con su compromiso y entrega permanente para fortalecer mis acciones de superación y dedicar el mejor de mis esfuerzos para cumplir mis metas. A ellos dedico esta tesis.

Contenido	
Índice de cuadros	3
Índice de Figuras.....	4
Resumen	i
Abstract	ii
1. Introducción.....	13
2. Revisión de Literatura	16
2.1 Energía renovable.....	16
2.2 Aplicación de las energías renovables en la agricultura	16
2.3 Factores ambientales que influyen en la producción de cultivos	18
2.4 Influencia de la temperatura en las plantas	19
2.5 Efecto de la temperatura en el rendimiento del cultivo de pepino.....	21
2.6 Producción de cultivos bajo invernadero	22
2.7 Producción de pepino en invernadero, México	23
2.8 Parámetros de diseño para invernaderos	24
2.9 Calefacción de invernaderos con energía solar.....	26
2.10 Relación costo-beneficio de la producción de cultivos en invernadero con calefacción.....	29
3. Objetivos e hipótesis	30
4. Materiales y métodos	31
4.1 Área de estudio.....	31
4.3 Construcción del invernadero.....	34
4.4 Construcción del sistema de calefacción	35
4.5 Establecimiento del experimento	36
4.6 Diseño experimental	37
4.7 Análisis físico-químicos del sustrato	38
4.8 Monitores de variables, temperatura y humedad del invernadero y ambiente .	38
4.9 Monitoreo de la temperatura del agua del sistema de calefacción.....	40
5. Resultados	41
5.1 Análisis de información meteorológica.....	41
5.1.1 Obtención de variables climatológicas.....	41
5.1.2 Temperatura	42
5.1.3 Radiación solar	43

5.1.4 Velocidad de viento.....	45
5.1.5 Precipitación	45
5.2 Balance de energía del invernadero	46
5.2.1 Pérdidas de calor por conducción y convección en el invernadero	48
5.2.2 Pérdidas de calor por la tubería.....	49
5.2.3 Determinación de la temperatura dentro del invernadero con respecto al tiempo.....	53
5.3 Temperatura del agua del sistema de calefacción.....	53
5.4 Pérdidas de calor en el sistema	54
5.5 Registro de temperatura doble techado.....	56
5.6 Registro de temperatura y humedad relativa durante la calefacción.....	57
5.7 Características físicas y químicas del sustrato.....	60
5.8 Análisis de rendimiento del cultivo	63
6. Discusión.....	66
6.1 Variables meteorológicas.....	66
6.1.1 Temperatura	66
6.1.2 Horas de radicación solar	66
6.1.3 Radiación solar	67
6.1.4 Precipitación	68
6.1.5 Velocidad del viento.....	68
6.2 Aumento de temperatura con sistema de calefacción.....	69
6.3 Rendimiento del cultivo	69
6.3.1 Área foliar	69
6.3.2 Altura de planta.....	70
6.3.3 Fruto	71
6.3.4 Humedad y rendimiento de pepino	71
6.3.5 Efecto de altas temperaturas	72
7. Conclusiones.....	74
8. Recomendaciones.....	76
9. Bibliografía	77

Índice de cuadros

Cuadro 1. Valores de temperatura y humedad para desarrollo óptimos del pepino.....	23
Cuadro 2. Radiación solar mensual en Jiquilpan de Juárez (NASA, 2013).....	32
Cuadro 3. Datos insertados en el programa Meteonorm	33
Cuadro 4. Parámetros determinados del sustrato.....	38
Cuadro 5. Datos meteorológicos de Jiquilpan de Juárez (Meteonorm, 2012).....	42
Cuadro 6. Características físico-químicas del sustrato.	60

Índice de Figuras

Figura 1. Jiquilpan de Juárez, Michoacán.	31
Figura 2. Radiación solar en México.	32
Figura 3. Diseño del invernadero	34
Figura 4. Sistema de calefacción, parte externa.	35
Figura 5. Sistema de calefacción, parte interna.	36
Figura 6. Vista panorámica del cultivo con calefacción. Las macetas muestran un desarrollo de IV semanas.	37
Figura 7. Distribución de los tratamientos en el invernadero.....	37
Figura 8. Sensores integrados.	39
Figura 9. Vista superior del Microcontrolador Arduino y circuitos periféricos para la medición de temperatura y control de la bomba de agua.....	40
Figura 10. Ubicación de las estaciones meteorológicas utilizadas por meteonorm	41
Figura 11. Gráfica de la temperatura mínima y máxima diaria (Meteonorm, 2012)	43
Figura 12. Gráfica de las horas sol pico por mes (Meteonorm, 2012).....	44
Figura 13. Gráfica de radiación solar por mes (Meteonorm 2012)	44
Figura 14. Gráfica de velocidad de viento (Meteonorm 2012).....	45
Figura 15. Gráfica de precipitación (Meteonorm, 2012)	46
Figura 16. Vista esquemática del Invernadero utilizado, mostrando del lado izquierdo el serpentín de la calefacción solar.....	47
Figura 17. Diagrama del sistema de calefacción.....	50
Figura 18. Temperatura del agua registrada antes y después de la calefacción.	53
Figura 19. Gráfica de calor cedido por el agua durante transcurso de la calefacción	54

Figura 20. Pérdidas de calor en los tanques de almacenamiento de agua	55
Figura 21. Gráfica de temperatura donde se registran pérdidas de calor en las tuberías externas durante la calefacción	56
Figura 22. Temperatura máxima y mínima utilizando doble techo	57
Figura 23. Registro de temperatura, con y sin calefacción.....	57
Figura 24. Humedad registrada con y sin calefacción.....	58
Figura 25. Temperatura registrada durante la calefacción (del 26/04 al 04/03)	59
Figura 26. Producción de pepino por planta de invernadero con y sin calefacción, marzo.....	63
Figura 27. Producción de pepino por planta de invernadero con y sin calefacción, abril.....	64
Figura 28. Altura de las plantas en invernadero con calefacción y sin calefacción	64
Figura 29. Área foliar de las plantas en invernadero con calefacción y sin calefacción	65
Figura 30. Diámetro de tallo de las plantas en invernadero con calefacción y sin calefacción.....	65

Resumen

La producción en invernadero es sin duda una forma de aprovechar la radiación solar para aumentar la temperatura ambiente para el cultivo en desarrollo, sin embargo las condiciones climáticas de algunas regiones no son las adecuadas para los cultivos, es por eso que deben ser calentados en las noches y días fríos para establecer condiciones óptimas de crecimiento. El uso de calentadores solares en la producción de cultivos ha sido documentado en diversas partes del mundo mostrando ser una alternativa. En este trabajo se llevó a cabo la construcción y la evaluación de un sistema de calefacción que utiliza energía solar como fuente de calor, aplicado en un invernadero de polietileno donde se cultivó pepino con dos dosis de fertilización, utilizando la solución de Steiner al 100% y 50%, situado en Jiquilpan de Juárez, Michoacán. El sistema de calefacción consistió en tubos de cobre colocados sobre el suelo unidos a dos calentadores solares (calentador de tubos evacuados, heat pipe y calentador solar de placa plana) los cuales están acoplados a una bomba. Para hacer un análisis comparativo se construyeron dos invernaderos de las mismas dimensiones, en uno de ellos se colocó el sistema de calefacción. La temperatura y la humedad se registraron simultáneamente mediante sensores de temperatura (LM135 y LM35) y sensores de humedad (DHT11), colocados a una altura de 1 m sobre el nivel del suelo. Los sensores están conectados a una placa electrónica. Los datos registrados muestran que el invernadero con sistema de calefacción tiene una diferencia de 3°C de temperatura con respecto al testigo sin calefacción con lo cual aumenta el rendimiento de la producción de pepino en una relación de 1.6, sin embargo no se observaron diferencias significativas con la aplicación de dosis de fertilización.

Palabras Claves: Calentadores solares, Control de temperatura, Agricultura protegida, rendimiento del cultivo, *Cucumis sativus L.*

Abstract

Greenhouse production is certainly a way to harness solar radiation to enhance the environment for the growing crop temperature, however climatic conditions in some regions are not suitable for crops, which is why they must be heated in the nights and cold days to establish optimal growth conditions. The use of solar heaters in crop production has been documented in various parts of the world showing an alternative. This work was carried out the construction and evaluation of a heating system that uses solar energy as a heat source, applied in a polyethylene greenhouse grown cucumber where two fertilization, using the solution of Steiner 100% and 50%, located in Jiquilpan, Michoacán. The heating system consisted of copper tubes placed on the ground connected to two solar heaters (heater evacuated tubes, heat pipe and flat plate solar heater) which are coupled to a pump. To make a comparative analysis of these two dimensions greenhouses were built in one heating system was installed. The temperature and humidity were recorded simultaneously by temperature sensors (LM135 and LM35) and humidity sensors (DHT11), placed at a height of 1 m above ground level. The sensors are connected to an electronic board. The recorded data show that the greenhouse heating system has a difference of 3 ° C temperature compared with the control unheated thereby increasing the production yield of cucumber in a ratio of 1.6, however no significant differences were observed with the application of fertilization.

Key words: Solar heaters, temperature control, protected agriculture, crop yield, *Cucumis sativus L.*

1. Introducción

El desarrollo de los cultivos, así como su actividad metabólica están determinados no solo por sus caracteres genéticos, que constituyen un potencial embrionario reservado, sino también por la acción de factores ambientales, que definirán finalmente las posibilidades de realizar dicho potencial. Entre estos factores ambientales se encuentra la temperatura, la cual tiene un papel determinante en la actividad metabólica, el crecimiento y el desarrollo de las plantas. Todas estas tienen límites bien definidos de temperaturas máximas y mínimas, los cuales varían según la especie (Iriarte *et al.*, 2002).

Las temperaturas inferiores al rango óptimo originan estrés térmico sobre la planta teniendo consecuencias en la productividad de los cultivos. De acuerdo con López *et al.* (2000), las especies termófilas, entre las que podemos considerar la mayoría de las hortalizas que se cultivan bajo protección, comienzan a tener alteraciones cuando la temperatura desciende por debajo de 10–12°C.

Por tal motivo se han implementado técnicas de producción bajo cubiertas desde malla sombra hasta invernaderos de alta tecnología. Una de las justificaciones importantes de la producción bajo invernadero es el aumento en el rendimiento de los cultivos, debido al control de factores que podrían ser perjudiciales para el desarrollo de los productos. Tener el conocimiento de las consecuencias que provocan estos factores puede ayudar a tomar las medidas necesarias para mejorar las condiciones ambientales del cultivo y con ello los ingresos económicos (SAGARPA, CONACYT y COFUPRO, 2010).

Una de las desventajas que tiene la producción de cultivos únicamente protegidos por una cubierta de plástico, que se ha demostrado es que en la ausencia de control climático de los cultivos, se llegan a desarrollar a merced de la climatología local, provocando amplias variaciones en la cantidad y calidad de las cosechas; al mismo tiempo los cambios en la actividad metabólica, a veces bruscos, propiciados por la

evolución ambiental inducen un envejecimiento precoz de las plantas y reducen su potencial productivo (López *et al.*, 2000).

Para poder evitar este tipo de problemáticas existe la opción de la aplicación de sistemas de calefacción que utilizan combustibles fósiles para controlar esta variable (García *et al.*, 1997; López *et al.*, 2000; Gázquez *et al.*, 2005; Valera *et al.*, 2008; PROEXPORT, 2009) y como alternativa a la utilización de éstos, se puede considerar la energía solar, que además de ser una fuente de energía limpia, es una fuente renovable (Ozgener y Hepbasli, 2005; Ozgener y Hepbasli, 2007; Sethi y Sharma, 2008; Attar *et al.*, 2013).

Los invernaderos que emplean energía solar como fuente de calefacción pueden almacenar la energía como calor sensible, calor latente, calor de reacción, o combinación de éstos. En la mayoría de estos sistemas, el calor se almacena como calor sensible en materiales como agua y rocas. Un ejemplo de calefacción por medio de calor sensible es el sistema de radiación para generar vapor o agua caliente que hace uso de uno de ellos para suministrarlo a través de las redes de tuberías que funcionan a través del invernadero, y de unidades de calentadores de aire. Estos sistemas son generalmente capaces de resolver los requisitos de calefacción del invernadero (Ozgener y Hepbasli, 2007).

Los primeros estudios registrados donde se utilizó agua para transferir calor se realizaron entre los años de 1985 y 1987 en países como España, Grecia, Dinamarca, Israel, Portugal, Francia, Argentina, E.U., entre otros. En los que se menciona un aumento de temperatura en el invernadero con respecto al ambiente de 2-4°C en la mayoría de los casos (Sethi y Sharma, 2008).

Los estudios realizados por Raffenel *et al.* (2009) muestran que en la mayoría de los sistemas que utilizan energía solar como calefacción emplean tubos enterrados, debido a que la temperatura alcanzada por estos sistemas es de aproximadamente 40°C, debido a que el calor es alimentado directamente al suelo donde se cultiva, por lo que la temperatura no debe exceder las 25°C para evitar el riesgo de dañar el sistema radicular de las plantas.

Una de las desventajas que se mencionan sobre este tipo de tecnologías es la demanda energética para el control del ambiente de invernaderos, ya que sigue siendo costosa debido al hecho de que las tecnologías que se utilizan para construir los invernaderos tienden a maximizar la entrada de iluminación, lo que no garantizan un aislamiento térmico tan bueno como el que está en edificios urbanos (Fabrizio, 2012).

Sin embargo ésta no deja de ser una buena opción para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero a la atmósfera y ahorro económico para el productor. Además Sethi y Sharma (2008) argumentaron que la continua investigación en esta área y varias demostraciones acertadas han dado lugar a adelantos rápidos y a la comercialización de estos sistemas con resultados satisfactorios.

El presente trabajo tiene como objetivo construir un sistema de calefacción solar para invernadero y su evaluación en el cultivo de pepino (*Cucumis sativus L.*).

2. Revisión de Literatura

2.1 Energía renovable

Una de las preocupaciones en el mundo en los últimos años es la energía, sobre todo al aumentar la población y las industrias, dando como consecuencia un aumento acelerado de las demandas energéticas. La contaminación ambiental, así como el calentamiento global y el cambio climático causado por el uso de energías convencionales, es otro asunto de importancia en todo el mundo, razón suficiente para encontrar y utilizar fuentes de energía alternativa (Mekhilef *et al.*, 2012).

En la actualidad los combustibles fósiles son la elección preferida para cubrir la demanda de energía para las necesidades de consumo; pero los pronósticos muestran que en el futuro no serán suficientes, y los impactos que tienen sobre el ambiente serán más evidentes. Es por esto que, la creciente dependencia energética del humano, la necesidad de preservar el medio ambiente y asegurar un desarrollo sostenible, obligan al fomento de métodos eficaces para un uso eficiente de la energía y la utilización de fuentes limpias (Comunidad de Madrid, 2006).

Las energías renovables ofrecen energía útil para diversas aplicaciones. Su aprovechamiento tiene un impacto ambiental menor que el de las fuentes convencionales. Además, su uso contribuye a conservar los recursos energéticos no renovables y propicia el desarrollo regional. Dentro de estos tipos de energía se encuentran: la solar, la eólica, la hidráulica, la biomasa, la geotérmica y la oceánica, principalmente (ANES, 2012).

2.2 Aplicación de las energías renovables en la agricultura

El uso de energías alternativas en la agricultura existe desde la antigüedad en procesos simples como el secado de productos. De acuerdo al método industrial habitual, se requiere calentar aire con combustibles sólidos y/o gas, para retirar la

humedad de los productos, que se encuentran en una cámara de secado (Ávila *et al.*, 2012). Muchos estudios muestran el desarrollo de secadores solares que cuentan con un almacenamiento térmico de la energía solar en agua o roca, para posteriormente utilizar ese calor durante las horas en que no hay radiación solar. Otros utilizan secadores solares asistidos con una celda fotovoltaica que energiza un soplador que remueve el aire húmedo dentro del secador. Otros más muestran el uso de secadores híbridos, donde el propósito es utilizar una fuente de energía convencional (energía eléctrica, gas LP) que complementa a la energía solar con la intención de mejorar el proceso de secado (Gudiño, 2012).

Otros estudios aplican biodigestores, es decir, dispositivos donde se lleva a cabo un proceso de descomposición anaeróbica de desechos orgánicos, que proporciona un gas que puede ser utilizado como combustible. Los desechos del biodigestor pueden ser utilizados como biofertilizante, que de otra manera se convertirían en un problema ambiental, ya que liberan gases a la atmósfera (metano, dióxido de carbono, entre otros) contribuyendo al cambio climático (Nakasima *et al.*, 2012).

Una de las aplicaciones que se ha considerado controversial son los cultivos energéticos, que más que una aplicación directa al desarrollo de la agricultura para la alimentación, se ve como una alternativa de cultivo para generar combustibles renovables, los cuales tiene como única finalidad producir biomasa transformable en combustible como puede ser biogás, bioetanol y biodiesel, que pueden ser utilizados para la automoción o para producir calor y/o energía eléctrica (Badía y Osorio, 2007).

En otros países se han desarrollado trabajos con energías renovables, como la solar térmica, solar fotovoltaica y la geotérmica en la calefacción de invernaderos (Rafferty, 1986; Bakos *et al.*, 1999; Ghosal y Tiwari, 2004). Una de las aplicaciones más importante para este trabajo, es la calefacción de invernaderos con energía solar térmica.

2.3 Factores ambientales que influyen en la producción de cultivos

Para que las plantas realicen sus funciones necesitan, en sus diferentes fases de crecimiento, un conjunto de factores ambientales entre los que destacan, temperatura, humedad relativa, CO₂ y luz. Estos factores deben estar dentro de límites mínimos y máximos, fuera de los cuales las plantas cesan su metabolismo, pudiendo llegar a la muerte (Infoagro, 2013).

El efecto de la temperatura es muy obvio si comparamos la vegetación tropical con el ártico, o la actividad del crecimiento y reproducción en el verano, contra la inactividad en invierno. La temperatura en las plantas tiende a estar estrechamente relacionada con el ambiente (Daubenmire, 1974).

La temperatura es el parámetro más importante en el manejo del ambiente dentro de un invernadero, ya que es uno de los que más influye en el crecimiento y desarrollo de las plantas. Habitualmente la temperatura óptima para las plantas se encuentra entre los 10 y 20° C. Para el manejo de la temperatura es importante conocer las necesidades y limitaciones del cultivo específico (Infoagro, 2013).

La humedad relativa, como uno de los determinantes de la tasa de pérdidas de agua por evapotranspiración, es una condición ambiental también importante para las plantas terrestres. El estrés por deficiencia de agua es una amenaza persistente para la sobrevivencia de las plantas, obligándolas a desarrollar modificaciones morfológicas y fisiológicas que le permiten sobrevivir en regiones con lluvias inadecuadas y suelos con bajo contenido de humedad. Los efectos de la humedad relativa, resultan a menudo difíciles de separar de los de la temperatura. Esto se debe a que están relacionados, a que un aumento de la temperatura conduce a un incremento de la tasa de evaporación y a una disminución de la humedad en la planta (Hopkins, 1999).

El anhídrido carbónico (CO₂) de la atmósfera es la materia prima imprescindible de la función fotosintética de las plantas. El enriquecimiento de la atmósfera del invernadero con CO₂, es muy importante para muchos cultivos, tanto en hortalizas

como en flores. La concentración normal de CO₂ en la atmósfera es del 0,03%. Este índice puede aumentarse a límites entre 0,1-0,2%, cuando los demás factores de la producción vegetal sean óptimos, si se desea el aprovechamiento máximo de la actividad fotosintética de las plantas. Concentraciones superiores al 0,3% resultan tóxicas para los cultivos (Lorenzo *et al.*, 1997).

Los efectos que tiene la luz sobre las funciones de una planta son numerosos. Al igual que la temperatura la necesidad de luz varía según el tipo de planta, ciclo de vida y la variación de otros factores (Daubenmire, 1974). En invernaderos a mayor intensidad de iluminación se requiere aumentar la temperatura, la HR y el CO₂, para optimizar la fotosíntesis; por el contrario, si hay poca luz, la necesidad de los otros factores ambientales puede descender (Infoagro, 2013).

La radiación solar es la única fuente natural de luz disponible para la actividad metabólica de las plantas. La cantidad relativa de radiación que llega a una hoja cultivada en campo depende de la cantidad de polvo existente en el aire y el grosor de la capa de aire dispersante que se encuentra entre el sol y la planta, lo cual depende de la latitud y la hora (Long *et al.*, 1994). La cantidad de radiación que llega a un invernadero depende de la transmitividad del material de cubierta y sus propiedades ópticas. Recientemente se están introduciendo nuevos materiales con un alto grado de transmitividad que permiten incrementar considerablemente las producciones sin necesidad de modificar otros parámetros del invernadero (Muñoz *et al.*, 2013).

2.4 Influencia de la temperatura en las plantas

Cuando las condiciones de fotoperiodo y nutrición para las plantas son favorables, la velocidad de desarrollo depende principalmente de la temperatura, siendo su respuesta lineal desde el umbral térmico inferior hasta un límite superior. A temperaturas mayores decae su velocidad de desarrollo (Castilla, 2007).

Las reacciones biológicas de importancia en las plantas no pueden darse si la temperatura está por debajo de 0°C, o por encima de 50°C. El límite inferior corresponde al punto de congelación del agua y el superior, a la desnaturalización de las proteínas. La temperatura óptima varía según la especie, pero casi siempre está comprendida entre 10° y 25°C. Las plantas pueden tolerar temperaturas más bajas durante períodos cortos de tiempo, pero debe evitarse el acercarse a este valor letal (FAO, 2002a).

De acuerdo con López *et al.* (2000), las especies termófilas, entre las que podemos considerar la mayoría de las hortalizas que se cultivan bajo protección, presentan las siguientes alteraciones cuando la temperatura desciende por debajo de 10–12°C:

- Reducción del crecimiento, especialmente de la elongación, de la expansión foliar y en consecuencia de la radiación absorbida por el cultivo.
- Disminución de la tasa de asimilación neta.
- Depresión de la respiración.
- Reducción del transporte y distribución de asimilados.
- Disminución de la absorción de agua y sales minerales debido a: aumento de la viscosidad del agua, aumento de la resistencia del tejido de la planta por la disminución de permeabilidad de la membrana celular, reducción de la absorción y acumulación activa de iones y disminución del crecimiento de la raíz.
- Cambios anatómicos y morfológicos: tendencia a desarrollar hojas más anchas y cortas, reducción de la longitud del peciolo, aumento del grosor de la hoja y disminución del área foliar específica.
- Pérdida de fertilidad.
Envejecimiento precoz del tejido fotosintético por necrosis celular.

2.5 Efecto de la temperatura en el rendimiento del cultivo de pepino

Un régimen de temperatura alta conduce a un crecimiento vegetativo más vigoroso de plantas, en contraste con un régimen de temperatura baja (Amuyunzu *et al.*, 1997).

Marcelis y Baan (1993) mencionan que el desarrollo del fruto de pepino está estrechamente relacionado con la temperatura. Explican que cuando se cuenta con el suministro necesario de nutrientes y se aumenta la temperatura, se acelera la tasa de crecimiento, lo que resulta en un aumento en el peso final del fruto. Sin embargo, cuando el crecimiento del fruto está limitado por el suministro de nutrientes, el aumento de la tasa de crecimiento con el aumento de temperatura, es mínimo disminuyendo el peso final del fruto. El estudio de número y tamaño de las células muestra que el efecto de la temperatura sobre el crecimiento del fruto es debido a efectos sobre la expansión de células en lugar de en la división celular, cuando el crecimiento no se ve limitado por el suministro de asimilados. Sin embargo, cuando se limita el suministro de asimilados, el número de células por fruto disminuye al aumentar la temperatura, mientras que el efecto sobre el tamaño de la célula es insignificante.

En este sentido Papadopoulos y Hao (2000) encontraron que en dos variedades de pepino (Corona y Aramon) la temperatura tuvo un efecto diferente sobre la producción (tamaño y cantidad de fruto). Las producciones temprana y final de Corona fueron afectadas principalmente por la temperatura media diaria, mientras que las producciones temprana y final de Aramon fueron aumentadas principalmente incrementando la diferencia de temperatura entre el día y la noche. Para encontrar la mejor producción del fruto de Corona se requiere una temperatura de 24°C en el día y de 19°C por la noche, mientras que el régimen óptimo de temperatura para la producción de Aramon se encontró a 21°C en el día y 16°C por la noche.

2.6 Producción de cultivos bajo invernadero

Un invernadero es un edificio con paredes de vidrio o plástico translúcido, empleado para la producción de cultivos y conservación de plantas delicadas. También es usado para forzar el crecimiento de plantas fuera de temporada. A la producción de cultivos bajo invernadero se le conoce también como agricultura protegida. Entre sus ventajas se encuentra el desarrollo de cultivos agrícolas fuera de su ciclo natural y en menor tiempo, además de que se enfrenta con éxito a plagas y enfermedades, con mejores rendimientos en menor espacio, sanos y con un mejor precio en los mercados (Moreno *et al.*, 2011).

El objetivo principal del invernadero es el de acumular calor durante las épocas invernales el cual está en función de la radiación solar. El calentamiento del invernadero se produce cuando la radiación que pasa a través de la cubierta se convierte en calor. Esta radiación es absorbida por las plantas, los materiales de la estructura y el suelo y como consecuencia calentando el invernadero (Infoagro, 2013).

En México existen muchas regiones con condiciones naturales idóneas para el establecimiento de invernaderos, donde la agricultura protegida se ha desarrollado en forma acelerada, ya que permite obtener productos de calidad tanto para mercado nacional como de exportación. De esta forma, el empleo de invernaderos y la agricultura protegida están contribuyendo ampliamente en la producción de alimentos y en el desarrollo de varias zonas agrícolas de México. Los Estados que concentran el mayor número de hectáreas de cultivo en invernadero son: Sinaloa (22%), Baja California (14%), Baja California Sur (12%) y Jalisco (10%); en estas cuatro entidades se encuentra más del 50% de la producción total de cultivos protegidos (Juárez *et al.*, 2011).

Se estima que en el año 2010 en México existían más de 15,000 hectáreas de horticultura protegida, distribuidas en diversas condiciones agroclimatológicas, lo que

da la posibilidad de producir durante los doce meses del año, pudiendo satisfacer en los volúmenes y con la calidad que demandan los consumidores finales. Una de las justificaciones importantes de la producción bajo invernadero es el aumento en el rendimiento de los cultivos, debido al control de factores que podrían ser perjudiciales para el desarrollo de los productos. (SAGARPA, CONACYT, COFUPRO, 2010).

2.7 Producción de pepino en invernadero, México

Con respecto a la economía agrícola del país, el sector de las hortalizas tiene una particular importancia por su contribución en la generación de empleo en el campo. El pepino (*Cucumis sativus L.*) es de las hortalizas importantes, ya que a pesar de ser poco nutritivo y contener casi 100% de agua, es ideal para utilizarse en ensaladas, es rico en vitamina A y C, y además contiene azufre, por lo que se utiliza bastante en la industria cosmética (Green *et al.*, 2012).

Entre sus características más importantes, el pepino es un cultivo propio del verano cuya planta cuenta con un sistema radical muy potente. En la axila de cada hoja, emite un tallo secundario. Las flores aparecen en las axilas de las hojas. En la actualidad, en las variedades cultivadas sólo florecen flores femeninas y los frutos son partenocárpicos. Se trata de un cultivo exigente en temperatura y humedad ambiental, que deben ser altas. En cuanto a horas de luz es poco exigente pero, como cultivo de verano, sí es exigente en intensidad de luz. Con referencia al suelo o sustrato, este requiere un pH que oscile entre 6 y 7.2, además es exigente en drenaje y aireación (Del Castillo *et al.*, 2004).

Este cultivo tiene un ciclo corto que puede variar de una localidad a otra dependiendo de las condiciones edafoclimáticas, variedad y manejo. Además, por ser una especie de origen tropical, exige temperaturas elevadas y una humedad relativa, también alta (Cuadro 1). Sin embargo, el pepino se adapta a climas cálidos y templados.

Cuadro 1. Valores de temperatura y humedad para desarrollo óptimo del pepino

Desarrollo Óptimo	Día	Noche
Temperatura	20-25°C	18-20°C
Humedad Relativa	60-70%	70-90%

En México, la producción de hortalizas bajo invernadero se ha incrementado significativamente durante los últimos años, siendo importante la producción de pepino, ocupando el segundo lugar después del jitomate, equivalente al 10% de la superficie invernada (López *et al.*, 2011).

Respecto a las exportaciones hortícolas, el pepino tuvo en promedio el 11%, porcentaje que se tradujo en un volumen de ventas de 374,289 toneladas durante el año 2001 y cuyo valor ascendió a 192 millones de dólares, convirtiendo a México en el exportador número uno de pepino a nivel mundial (Piguillem, 2004).

Históricamente, México ha ocupado el primer lugar como proveedor de Estados Unidos de América de pepino (más del 80% del total). El grueso de las exportaciones mexicanas (85%) se destina al mercado norteamericano, lo que implica una alta dependencia de éste (Green, 2012). Respecto al mercado mundial de pepino, en el 2010, de los principales diez países importadores del mundo, Estados Unidos de América se colocó en la primera posición con 585,575 toneladas, mientras que en las exportaciones de pepino el principal proveedor fue México, exportando 498,822 toneladas (Trade Map, 2010).

2.8 Parámetros de diseño para invernaderos

La producción en invernadero se lleva a cabo con el objetivo de incrementar los rendimientos del cultivo, y por consecuencia, el retorno económico. Para ello, se invierte en infraestructura, con el propósito de mantener las condiciones adecuadas;

la efectividad de cada estructura dependerá de su diseño, del material de cubierta y de los equipos periféricos con que cuente (Benavides, 2011).

Un buen control climático empieza por un diseño apropiado de la estructura que permita aprovechar al máximo las condiciones climáticas naturales. A partir de este diseño pueden añadirse diferentes equipos de climatización que proporcionen un mejor manejo de las condiciones ambientales. En este sentido, son dos los elementos de diseño fundamentales que condicionan la producción y calidad de los cultivos y deben considerarse antes de incorporar los diferentes equipos de control: la estructura del invernadero y el material de la cubierta (Muñoz *et al.*, 2013).

Después de considerar estos dos elementos hay otros parámetros de diseño de invernaderos que puede llegar a ser un factor importante en el control climático de los mismos como son la orientación, forma del invernadero, aislamiento de la pared norte, satinado doble de la pared y pantallas térmicas. La relevancia de estos parámetros puede variar de acuerdo a las características climatológicas. La combinación adecuada de estos parámetros de diseño puede lograr ahorros en calefacción de hasta un 80% (Gupta y Chandra, 2002).

Con respecto a la orientación Muñoz *et al.* (2013) recomiendan la Este-Oeste frente a la Norte-Sur ya que el porcentaje de transmisión de luz del invernadero es superior. Sin embargo, Brun (1974) concluyó que para condiciones mediterráneas la orientación Norte-Sur contribuyó a homogenizar el clima del invernadero, y que la orientación este-oeste, por una parte, no era favorable para el crecimiento temprano, por lo que la producción era mayor en invernaderos orientados Norte-Sur.

Chandra (1976) observó que un invernadero orientado Este-Oeste requirió cerca del 20% menos calefacción con respecto a un invernadero de los mismos tamaños orientado de norte-sur en las latitudes de 49.25°N. Harnett *et al.* (1979) compararon varios tipos y orientaciones del invernadero y concluyeron que había una ventaja constante en términos de transmisión de luz y cosecha al orientar una estructura multi-palmo Este-Oeste en vez de Norte-Sur.

Kurata *et al.* (1991) encontraron que en las latitudes bajas, los efectos de la orientación y la forma del invernadero son menos significativos que en las latitudes altas. Sin embargo, las irregularidades espaciales de la irradiación con los invernaderos orientados este-oeste podían ser un problema en todas las latitudes.

2.9 Calefacción de invernaderos con energía solar

Uno de los sectores importantes donde se aplica la energía solar es la agricultura. La producción de cultivos en invernaderos es sin duda una forma de aprovechar la radiación solar para aumentar la temperatura ambiente del cultivo en desarrollo, sin embargo las condiciones climáticas de algunas regiones no son las adecuadas para los cultivos y por consecuencia hay una disminución en la economía de la producción del invernadero. En muchos casos además del uso de la energía solar, los invernaderos deben de ser calentados en las noches y días fríos, para establecer condiciones óptimas de crecimiento en los mismos. Con este fin las fuentes de energía renovable deben ser utilizadas tanto cuanto sea posible (Ozgener y Hepbasli, 2005)

Existen reportes del uso de la energía solar en invernaderos donde se explica que estos están diseñados para reducir pérdidas de calor y aumentar los rendimientos de la energía solar útil sobre una base diaria y estacional. En éstos, la energía solar térmica se puede almacenar como calor sensible, calor latente, calor de reacción, o combinación de éstos. En la mayoría de estos sistemas, el calor se almacena como calor sensible en materiales tales como agua y rocas. En sistemas latentes el almacenamiento del calor es acompañado por un cambio de fase de un material que se utiliza para el almacenamiento de energía térmica. La mayor parte de la demanda de calefacción del invernadero se puede suministrar por los sistemas del almacenamiento de calor latente, sin embargo son muy costosos (Ozgener y Hepbasli, 2007).

Un ejemplo de calefacción por medio de calor sensible es un sistema para generar vapor o agua caliente que se circula a través de una red de tuberías distribuidas en el invernadero, y en unidades de calentadores de aire. Estos sistemas son generalmente capaces de cubrir los requisitos de calefacción del invernadero, pero los patrones de distribución de la temperatura dentro del invernadero, asociado a estos sistemas, son influenciados fácilmente por las condiciones atmosféricas fuera del invernadero. Por lo general tampoco pueden controlar y mantener los niveles requeridos de humedad dentro del invernadero; otra condición térmica importante que afecta al crecimiento de cosechas (Ozgener y Hepbasli, 2007).

Sethi y Sharma (2008) afirman que se pueden reunir sistemas apropiados de calefacción (o enfriamiento) en el invernadero con fin de mantener una temperatura adecuada. Esto tiene un impacto significativo en la época, la calidad y la cantidad de los productos cultivados.

Kiyan *et al.* (2013) mencionan que los sistemas de calefacción solar de uso general son los colectores de placa plana convencionales, sin embargo, el período de amortización de estos sistemas es considerablemente largo; por otra parte el almacenamiento estacional de la energía solar es algo inadecuado comparado al almacenamiento diario. Desde hace varias décadas, debido a la alta eficiencia y al uso de anticongelantes, el colector solar de tubos evacuados se ha convertido en el diseño más popular para el calentamiento solar de agua, y tiene actualmente más del 80% en el mercado. Se ha dicho que, los colectores solares de tubos evacuados tienen mayor eficiencia térmica y alcanzan temperaturas más altas en comparación con los colectores solares de placa plana y son convenientes para usos sobre 80°C.

Attar *et al.* (2013) hicieron un estudio utilizando un colector solar de tubos evacuados con un área total de colección de 4 m² y 200 L de agua para una área de invernadero de 3.75 m², obteniendo un aumento de temperatura de 5 °C.

Sethi y Sharma (2008) hacen una revisión del uso de diferentes tecnologías para coleccionar y transferir calor, en el cual se estudia la implementación de la energía solar pasiva en la calefacción de invernaderos. Para el caso en el que se usa agua se obtienen aumentos de temperatura entre 2 °C y 10 °C respecto de la temperatura

exterior. Estos estudios fueron realizados principalmente entre 1985 y 1987 en diversos países como Grecia, España, Dinamarca, Israel, Portugal, Francia, Argentina, E.U., India, Italia y Turquía.

Los sistemas utilizan tubos, generalmente de polietileno de 12 a 25 mm de diámetro, enterrados a una profundidad tal que no puedan causar daños al cultivo. Si se desea aumentar la transferencia de calor se pueden colocar los tubos sobre la superficie o enterrados a pocos centímetros de profundidad, de manera que sea fácil retirarlos al hacer las labores. Se hace circular agua en circuito cerrado desde la fuente de energía a los tubos, de donde, una vez cedido el calor, retorna a la fuente energética. Una desventaja de este sistema es el costo de bombeo de agua, debido a que la caída de temperatura del agua de calefacción en el invernadero es menor, se precisa bombear mayor cantidad de agua para ceder la misma cantidad de calor (FAO, 2002b).

En contraste, se han desarrollado una gran variedad de sistemas de calefacción para invernadero que utilizan combustibles fósiles, ya sean gaseosos como el gas propano y el gas natural, siendo los más utilizados, y los combustibles líquidos, gasoil y fueloil, aunque este último, por su alta contaminación no se recomienda. Estos sistemas utilizan en su mayoría agua, por su eficiencia, y aire en algunos casos. Los equipos que utilizan agua consisten en sistemas compuestos por tuberías que pueden colocarse en el techo del invernadero o a nivel del suelo, que pueden ser móviles o fijos, por las cuales circula agua caliente de un foco calorífico (caldera) a una temperatura de 80 a 90 °C. Los sistemas donde se colocan las tuberías a nivel del suelo son más eficientes ahorrando entre 10 y 20% con respecto a los demás (PROEXPORT, 2009).

En México la empresa CEICKOR S.A., situada en Querétaro, cuenta con 2,500 m² divididos en cuatro invernaderos con tecnología procedente de Holanda. Los cuales cuentan con sistemas de calefacción con gas propano. En el año 2011 se implementó en uno de los invernaderos la calefacción solar por medio de calentadores solares, además del sistema de gas propano, con el fin de minimizar costos de calefacción ya que los mismos “representan el 60% del total de los costos

de producción en CEICKOR S.A.”. El estudio realizado para estimar el ahorro de combustible menciona que el sistema combinado ahorra un 41.30% de gas con respecto al sistema que calienta solo con gas propano (Boche, 2012).

2.10 Relación costo-beneficio de la producción de cultivos en invernadero con calefacción

Respecto a los beneficios económicos que se mencionan en algunos artículos, y al rendimiento del cultivo cuando se utilizan sistemas de calefacción, se observa que hay diferencias en el porcentaje que representa el costo por consumo de combustible en función del lugar donde se hace el estudio y con ello diferencias en el beneficio obtenido.

De acuerdo con Heidari y Omid (2011) en localidades en Irán, se encuentra un porcentaje del costo de producción que va desde el 54.17 % a 49.02%, dato obtenido de 43 productores encuestados que realizan actividades en invernadero con calefacción. El rendimiento neto se encontró positivo, para la producción de pepino y tomate. Las relaciones de costo-beneficio de producción de pepino y tomate se calcularon en 1.68 y 3.28 respectivamente. Entre los invernaderos encuestados, el resultado indicó que el cultivo de tomate era más rentable.

Otro estudio realizado en Teherán, Irán menciona que los costos de calefacción representan el 41.94% del total de producción. Donde los resultados indicaron una relación costo-beneficio de 2.58 para la producción de pepino (Mohammadi y Omid, 2010).

3. Objetivos e hipótesis

Objetivo general

- Construir y evaluar un sistema de calefacción solar para la producción de pepino en invernadero.

Objetivos específicos

- Evaluar la radiación solar para la localidad de Jiquilpan, Michoacán, así como las variables indirectas que resultan de ésta, velocidad de viento y temperatura ambiente, utilizando estaciones meteorológicas y programas de interpolación de datos.
- Diseñar y construir un sistema de calefacción para invernadero que utiliza energía solar como fuente de calor.
- Evaluar el sistema de calefacción considerando el análisis de variables de rendimiento del cultivo de pepino en comparación con un testigo.
- Monitorear parámetros como temperatura y humedad en el invernadero con el sistema y comparándolo con un testigo.

Hipótesis

El uso de un sistema de calefacción en invernadero con energía solar en Jiquilpan aumenta la producción del cultivo de pepino.

4. Materiales y métodos

4.1 Área de estudio

El presente trabajo se realizó en uno de los invernaderos del CIIDIR Unidad Michoacán, localizado en Jiquilpan de Juárez, el cual se encuentra a una latitud norte de 19°59', longitud oeste de 102°43', y altitud de 1550 m s.n.m. (Figura 1).



Figura 1. Jiquilpan de Juárez, Michoacán

De acuerdo con la clasificación Koppen modificado por García (1988), Jiquilpan de Juárez tiene un clima C (W_1 , W) templado subhúmedo con lluvias en verano y con una precipitación invernal de menos del 5%. Su temperatura media oscila entre los 18 a 20 °C y una precipitación anual de 800 mm (INEGI, 1988). Y de acuerdo a las normales climatológicas se tiene una temperatura mínima de 5°C y máxima de 33°C con una media de 19°C (SMN, 2010).

En cuanto a radiación solar México se encuentra en una zona privilegiada en el globo terráqueo, la cual permite que el territorio nacional destaque en el mapa mundial de territorios con mayor promedio de radiación solar anual, con índices que van de los 4.4 kWhm⁻² por día en la zona centro y 6.3 kWhm⁻² por día en el norte del país (PESCO, 2013). La distribución de la radiación se muestra en la Figura 2.

Como lo destacó Enrique Caldera, México se encuentra entre los cinco países con mayor potencial para explotar esta fuente de energía sustentable. En primer lugar se encuentra China, luego Singapur, México, Australia e India (Crónica, 2013).

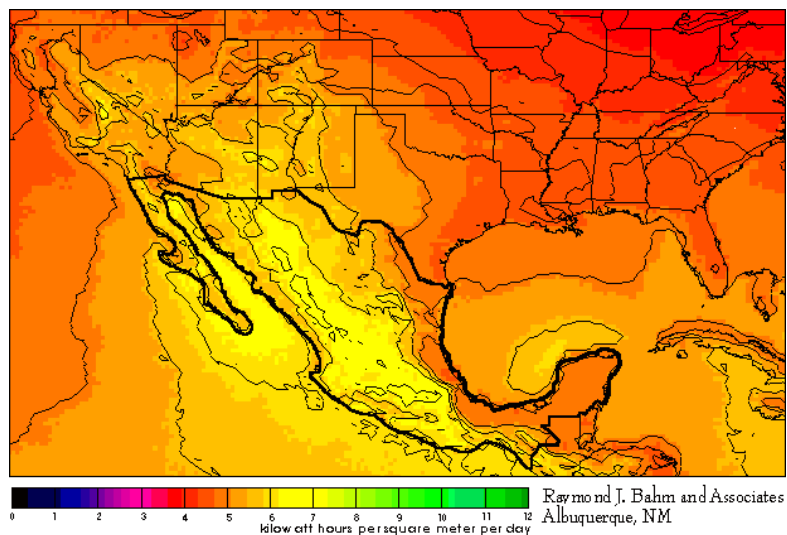


Figura 2. Radiación solar en México

Cuadro 2. Radiación solar mensual en Jiquilpan de Juárez (NASA, 2013)

Mes	Radiación solar en kWhm ⁻² por día
Enero	4.92
Febrero	5.90
Marzo	6.98
Abril	7.24
Mayo	6.89
Junio	5.84
Julio	5.40
Agosto	5.30
Septiembre	4.95
Octubre	5.07
Noviembre	5.14
Diciembre	4.68

De acuerdo con datos de la NASA (2013) los valores promedio de radiación solar correspondiente a la localidad de Jiquilpan por mes se presentan en el Cuadro 2.

4.2 Análisis de información meteorológica

Se realizó un análisis de información meteorológica de parámetros como radiación solar ($W m^{-2}$), temperatura ambiente ($^{\circ}C$) y velocidad del viento ($m s^{-1}$) de la región, utilizando el programa Meteonorm® versión 7 desarrollado por Jan Remund y Stefan Kunz a principios de los años 80 para la interpolación de los parámetros meteorológicos antes mencionados.

Meteonorm® es una base de datos climatológica integral que contiene información meteorológica de todo el mundo y se sustenta en un gran número de modelos computacionales desarrollado en programas de investigación internacionales. El programa cuenta con un error de interpolación mensual para la radiación de 7% y para la temperatura de 1 a $2^{\circ}C$. Meteonorm® se basa en períodos de más de 20 años, que pueden ser en 1961-1990 y 2000-2009 (Meteonorm, 2012).

El programa solicita los siguientes datos presentados en el Cuadro 3.

Cuadro 3. Datos insertados en el programa Meteonorm®

Nombre del sitio	Jiquilpan de Juárez
Coordenadas	19.983 °N, 102.717 °E
Altitud	1550 m
UTC	-6
Referencia de tiempo	-30
Situación	Situación abierta
Angulo de inclinación	20°
Azimut	0°
Albedo	0.15%
Horizonte	Ninguno
Periodo de temperatura	2000-2009
Periodo de radiación	1986-2005
Formato de salida	Science

4.3 Construcción del invernadero

Para la realización del experimento se construyó un invernadero con una cubierta única de polietileno, con dimensiones de 6 m x 3.5 m de superficie cultivable con alturas de 2.5 m y 4 m. Éste se dividió en dos por medio de paredes de polietileno entre las cuales se tiene un espacio de aire de 7 cm. Inmediatamente después de éste se colocaron estructuras de madera construidas con 2 láminas de triplay separadas por madera de 6 cm x 6 cm de espesor, utilizadas como aislamiento entre ambos invernaderos. Las dimensiones y la forma del invernadero se muestran en la figura 3.

Como sistema de ventilación natural se construyó una cortina que cubre toda la pared sur del invernadero, la cual está compuesta por una malla antiáfida y una hoja de polietileno.

Antes de implementar el sistema de calefacción se colocó un techo adicional en ambos secciones del invernadero con el objetivo de reducir el área de calefacción. Ya que además el doble techo se puede considerar como una alternativa para el control de temperatura porque ayuda a mantener un ambiente más estable al reducir pérdidas de calor con o sin calefacción (Francescangeli, 2010).

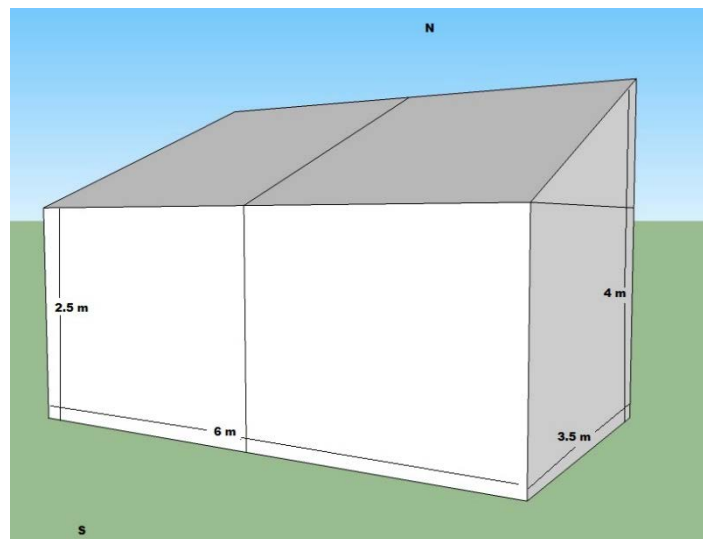


Figura 3. Diseño del invernadero

4.4 Construcción del sistema de calefacción

El volumen de agua utilizado es de 33.3 L m^{-2} , de acuerdo a lo recomendado por Sethi y Sharma (2008). La calefacción del invernadero se realizó con dos calentadores solares uno de marca Sergelo modelo HP - 480 - 58 de tubos evacuados con un volumen total de agua de 150 L, con una área de colección de 2.82 m^2 y otro de placa plana construido con materiales económicos en el centro de investigación CICATA Querétaro con un volumen total de agua de 200 L y un área de colección de 1.35 m^2 ; éstos unidos entre sí con tubos de CPVC a una bomba de 3/4 HP (Figura 4).



Figura 4. Sistema de calefacción, parte externa

El serpentín que transfiere el calor de los tanques hacia el invernadero fue construido con tubo de cobre de una pulgada, y con una longitud de 12.8 m (Figura 5). Se colocó a nivel del suelo debido a que el ahorro de energía es mayor que los sistemas de tuberías colgantes, ya que al estar el calor aplicado en la base la temperatura es más uniforme (FAO, 2002b; PROEXPORT, 2009).



Figura 5. Sistema de calefacción, parte interna

4.5 Establecimiento del experimento

El experimento se realizó entre los meses de diciembre de 2013 y abril del 2014. Se cultivó pepino variedad Urano; la fecha de siembra fue el día 23 de diciembre del 2013; se emplearon 48 macetas en total, de las cuales se colocaron 24 en la sección con calefacción (Figura 6) y un número similar en la sección sin calefacción. El sustrato que se utilizó fue una mezcla de suelo con una textura migajón arcilloso y compost de gallinaza con un porcentaje de 90% y 10% respectivamente. Se consideraron dos concentraciones de fertirriego, de acuerdo con la solución Steiner (1961) al 100% y 50%, a partir del 20 de febrero del 2014.



Figura 6. Vista panorámica del cultivo con calefacción. Las macetas muestran un desarrollo de IV semanas.

4.6 Diseño experimental

El experimento se diseñó empleando un factorial 2^2 , totalmente aleatorizado (Figura 7) con los factores: calefacción (sin y con) y dosis de fertilización (100% y 50%). Se realizó un análisis de varianza para las variables de área foliar, diámetro de tallo y altura de planta así como de volumen y peso del fruto, empleando el software R (R Core Team, 2014).

CC1	SCC1
CC2	SCC2

Figura 7. Distribución de los tratamientos en el invernadero. CC2=Con calefacción y solución nutritiva al 50%; SCC1=Sin calefacción y solución nutritiva al 100%; SCC2=Sin calefacción solución nutritiva al 50%; CC1=Con calefacción y solución nutritiva al 100%.

4.7 Análisis físico-químicos del sustrato

Se realizó un análisis físico-químico al sustrato de acuerdo a la norma NOM-021-SEMARNAT-2000, las determinaciones se presentan en el Cuadro 4.

Para los análisis se tomó un kilogramo de muestra con dos réplicas de forma aleatoria de sustrato no utilizado. Para llevar a cabo el secado de las muestras se extendieron sobre charolas de plástico y se colocaron a la sombra. Para realizar la molienda se utilizó un crisol de cerámica, y la muestra ya molida se hizo pasar por un tamiz de malla número 20 de acero inoxidable. Posteriormente se pesaron las cantidades necesarias de muestra sugeridas por la norma para cada determinación.

Cuadro 4. Parámetros determinados del sustrato NOM-021-SEMARNAT-2000

Parámetro	Técnica
Textura	Bouyoucos
pH	Método potenciométrico
Conductividad eléctrica	Método potenciométrico
% Materia orgánica	Método Walkley y Black
% Nitrógeno	Semi micro-Kjeldahl
Fósforo	Olsen <i>et al.</i> 1954
CIC	Método con acetato de amonio
Ca, Mg, K, Na	Espectrofotómetro absorción atómica

4.8 Monitores de variables, temperatura y humedad del invernadero y ambiente

Para controlar y monitorear las variables más importantes en un invernadero se emplean habitualmente sensores y software especializado para interpretar y almacenar las señales. En México adoptar esta tecnología representa un alto costo de inversión (Lugo *et al.*, 2014), sin embargo, actualmente se pueden desarrollar por

medio de hardware y software libre con ayuda de sensores económicos. Para las mediciones y almacenamiento de datos de este trabajo se desarrolló un sistema basado en Hardware de Software embebido de bajo costo y de plataforma abierta empleando sensores de humedad y temperatura de bajo costo fácilmente accesibles en el mercado mexicano.

La temperatura y la humedad de cada uno de los invernaderos se registraron simultáneamente usando sensores de temperatura (LM135 y LM35) calibrados en grados Kelvin y grados Celsius, respectivamente. También se utilizaron sensores de temperatura y humedad (DHT11) integrados en un único encapsulado, los cuales se colocaron a una altura de un metro sobre el nivel del suelo del invernadero y fuera del mismo para el registro de la temperatura ambiente. Los datos fueron tomados en intervalos de un minuto (Figura 8). Los sensores fueron probados a una distancia de dos metros donde se encontró menos variación en los resultados.



Figura 8. Sensores integrados

Los sensores están conectados a un circuito electrónico (Figura 9), compuesto por procesador de software embebido de la marca Arduino modelo “Leonardo” que tiene 12 entradas analógicas, 20 pines de entrada/salida, configurables como digitales, el cual se comunica directamente con el ordenador por medio de un conector USB (Arduino, 2014). Esta plataforma es el dispositivo electrónico que se encarga de recolectar las lecturas de los sensores y registrar los datos en una memoria micro

SD. Además el programa fue creado para controlar el encendido de la bomba para la calefacción.



Figura 9. Vista superior del Microcontrolador Arduino y circuitos periféricos para la medición de temperatura y control de la bomba de agua.

4.9 Monitoreo de la temperatura del agua del sistema de calefacción

Para tener un registro del comportamiento de la temperatura del agua, se monitoreó esta variable con la ayuda de un termómetro durante el mes de febrero, estando en funcionamiento el sistema de calefacción. Los valores fueron tomados por la noche y al día siguiente cuando el sistema dejó de transferir calor al invernadero.

Posteriormente se determinó la cantidad de calor cedido por los 390 L de agua de acuerdo con la siguiente expresión:

$$Q = C_p (T_2 - T_1)$$

Donde C_p se tomó a la temperatura promedio entre las dos mediciones de temperatura.

$$C_{p@50} = 4.181 \text{kJ/kg } ^\circ\text{C}$$

5. Resultados

5.1 Análisis de información meteorológica

5.1.1 Obtención de variables climatológicas

Los datos del clima de la localidad de Jiquilpan se obtuvieron de la interpolación de las estaciones meteorológicas más cercanas (Figura 10) con el programa Meteororm®. Se interpolaron las siguientes estaciones: Tizapan (40 km), Chapala (61 km), Jocotepec (80 km), Angamacutiro (105 km), Los Colomos (107 km), Presa Allende (220 km), Don Miguel/gdl (85 km), Uruapan/Gen Rayon (97 km), Morelia New (177 km), del Bajío/León (171 km) (los valores entre paréntesis indican la distancia a la localidad de Jiquilpan).

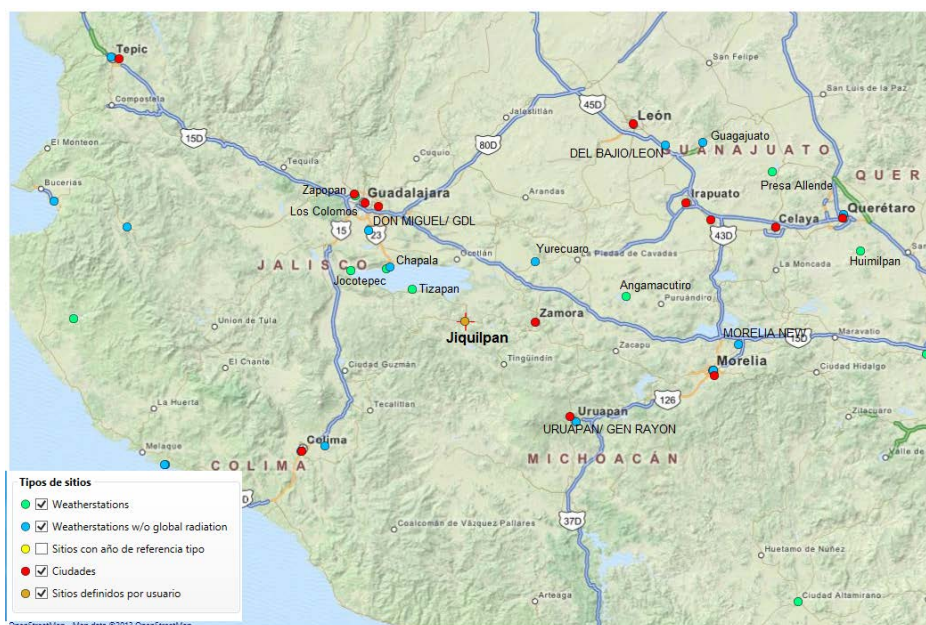


Figura 10. Ubicación de las estaciones meteorológicas utilizadas por meteororm®.

El programa proporcionó como resultado los valores promedio reportados en el Cuadro 5.

Cuadro 5. Datos meteorológicos de Jiquilpan de Juárez (Meteonorm, 2012)

Variable	Valor
Temperatura media anual	19.4°C
Temperatura máxima	33°C
Temperatura mínima	5°C
Horas de sol pico	6.5 h
Radiación global horizontal anual	2118 kWhm ⁻²
Radiación difusa anual	731 kWhm ⁻²
Insolación promedio anual horizontal	5.8 kWhm ⁻²
Velocidad de viento anual	1.8 ms ⁻¹

5.1.2 Temperatura

De acuerdo a los datos meteorológicos interpolados la temperatura mensual (Figura 11) va aumentando con el transcurso del año hasta llegar a sus valores más altos en los meses de abril, mayo y junio, siendo abril el mes con mayor variación de temperatura, con valores desde los 33°C como máxima y 10°C como mínima. Posteriormente se observa que de junio a octubre se encuentra una mayor estabilidad de temperatura con una diferencia de 9 °C en promedio, debido a que hay una considerable cantidad de nubosidad por ser época de lluvias, esta nubosidad actúa como barrera para retener la radiación terrestre y en consecuencia se obtiene una menor variación en la temperatura.

Así mismo, los valores muestran que la temperatura de los meses más fríos, comprendidos de noviembre a febrero, varía ampliamente desde 5 °C como mínima, hasta 29 °C como máxima. También se observa la variación de la temperatura

mínima nocturna para los meses fríos que va desde los 5 °C hasta los 14 °C, siendo noviembre el mes con mayor variación.

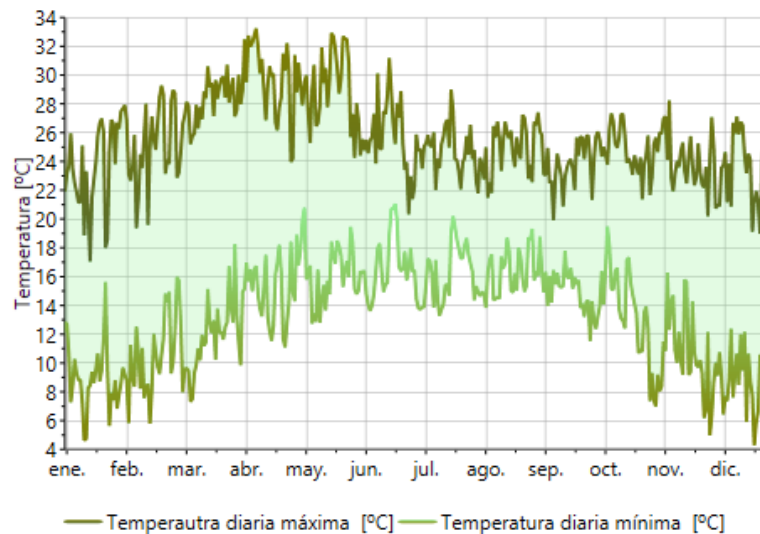


Figura 11. Gráfica de la temperatura mínima y máxima diaria (Meteonorm, 2012)

5.1.3 Radiación solar

En la Figura 12 se muestra la duración de la radiación solar en horas pico por mes, dónde se observa que se tiene en promedio 6 horas de radiación solar diaria con una ligera variación de 5 a 7 horas, siendo los meses de junio hasta octubre los de menor duración de la radiación solar debido a que es época de lluvia. Esto contrasta con la duración astronómica del día (reportado como duración astronómica de la radiación solar) para la que de mayo a agosto se encuentran los valores máximos, ya que en estos meses los días son más largos que las noches.

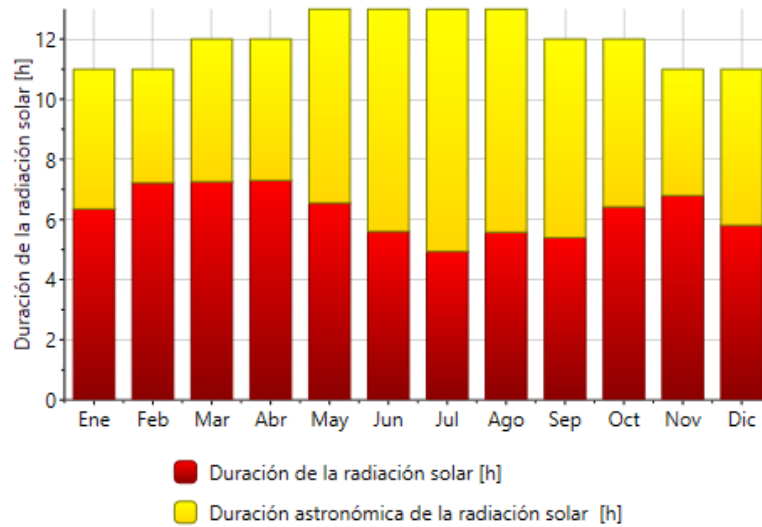


Figura 12. Gráfica de las horas sol pico por mes (Meteonorm, 2012)

En la Figura 13 se observa la cantidad de radiación global y radiación difusa mensual, de la cual se obtiene la radiación promedio diaria. Este cálculo proporciona un valor promedio de 4.7 kWh/m^2 para los meses fríos en los cuales se aplicará el sistema de calefacción.

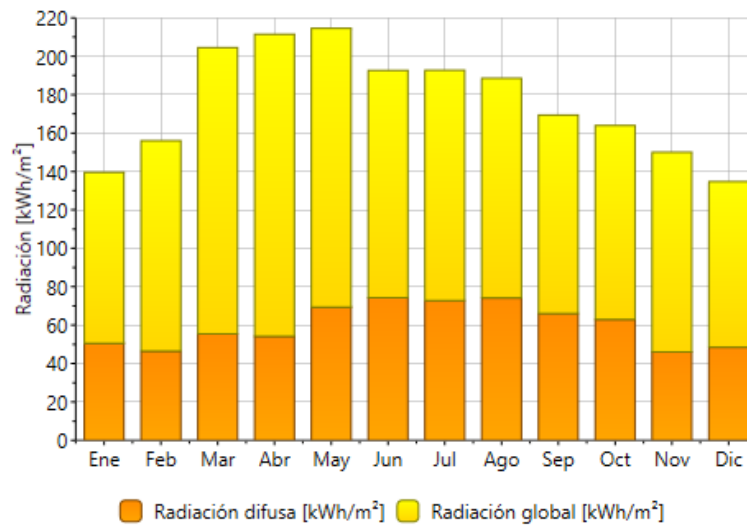


Figura 13. Gráfica de radiación solar por mes (Meteonorm 2012)

5.1.4 Velocidad de viento

En Jiquilpan se tiene un promedio de velocidad de viento de 1.8 ms^{-1} , obteniendo en el mes de mayo el máximo valor de 2.4 ms^{-1} (Figura 14).

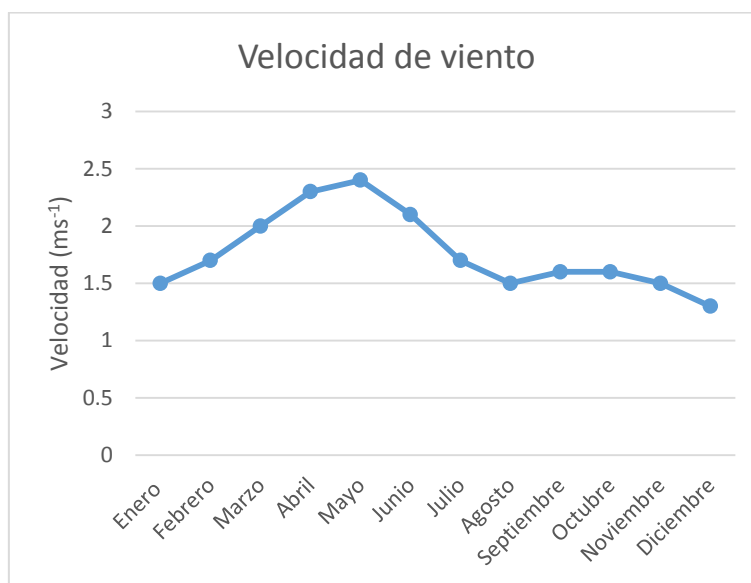


Figura 14. Gráfica de velocidad de viento (Meteonorm, 2012)

5.1.5 Precipitación

La temporada de lluvias en Jiquilpan está comprendida entre los meses de junio y septiembre (mayo-octubre) como se puede observar de la cantidad de precipitación en la Figura 15. La precipitación en los meses fríos se presenta en un promedio de cuatro días con lluvia, los que no ponen en riesgo la aplicación de fuentes de energía solar. Además, la precipitación es baja y no sobrepasa los 20 mm. Al comparar este valor con las normales climatológicas de Jiquilpan para estos meses, se tiene un valor de precipitación máxima de 25.9 mm (SMN, 2010), indicando que el programa Meteonorm arroja valores similares a los reportados por otras fuentes.

Por otra parte, se observa que en los meses fríos de noviembre a febrero, existe un total de 14 días con lluvia con una precipitación de 38 mm para todo el periodo.

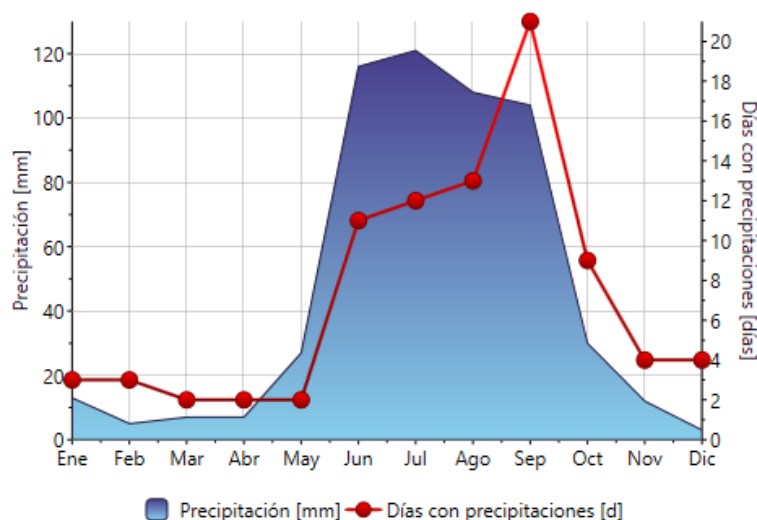


Figura 15. Gráfica de precipitación (Meteonorm, 2012)

5.2 Balance de energía del invernadero

Se analizó la transferencia de calor mediante un balance de energía, considerando las características del invernadero, del equipo de calefacción y del requerimiento de temperatura del pepino.

El invernadero de polietileno fue dividido en dos partes iguales. En la división del oeste se colocó el sistema de calefacción descrito líneas arriba como se muestra en la Figura 16. La temperatura mínima esperadas para los meses del experimento según datos meteorológicos es de 5 °C y la máxima de 29 °C (Meteonorm, 2012). Como temperatura mínima el cultivo de pepino requiere de 12 °C (López *et al.*, 2000), y la óptima nocturna es de 17 °C a 20 °C (Benavides, 2011).

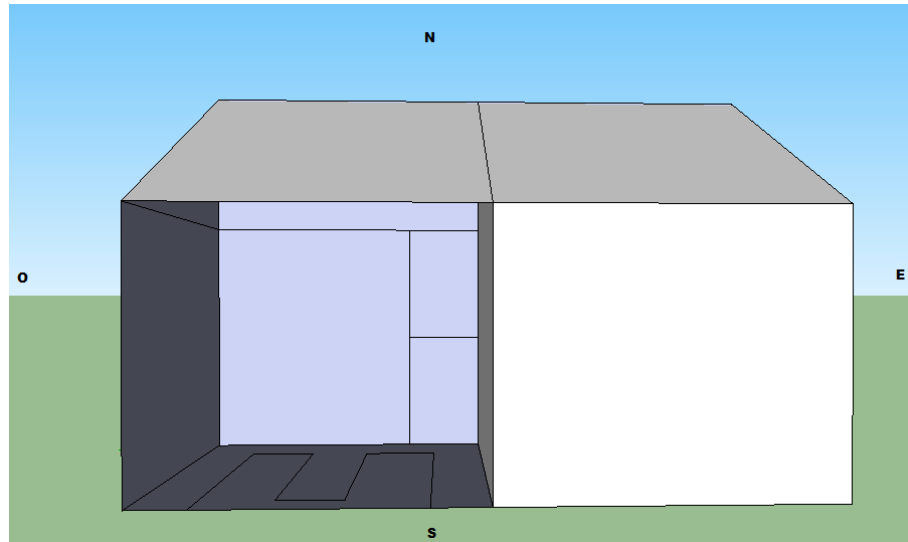


Figura 16. Vista esquemática del Invernadero utilizado, mostrando del lado izquierdo el serpentín de la calefacción solar.

Suposiciones:

- La temperatura del aire y la humedad, son uniformes
- El invernadero se supone vacío de plantas
- El efecto de la humedad y del calor latente del vapor de agua, son despreciables
- No hay condensación dentro del invernadero
- El intercambio por radiación se desprecia
- No se consideran las pérdidas por conducción y convección (después se consideraran)
- La capacidad de calor de la cubierta es despreciable

Parámetros del invernadero

Densidad del aire a temperatura promedio $\rho_{@10^{\circ}\text{C}} = 1.246 \text{ Kg m}^{-3}$

Calor específico $C_{p@10^{\circ}\text{C}} = 1006 \text{ J (Kg K)}^{-1}$

Volumen del invernadero $V_{inv} = 34.125 \text{ m}^3$

Conductividad térmica de la cubierta, polietileno $k = 0.64 \text{ W (m K)}^{-1}$

Área superficial 10.5 m^2

Temperatura mínima registrada $T_{\min} = 5 \text{ }^\circ\text{C}$

Temperatura mínima requerida $T_{\max} = 17 \text{ }^\circ\text{C}$

La ecuación que rige el balance de energía dentro del invernadero es

$$C_{air} \rho_{air} V_{inv} \frac{dT_{inv}}{dt} = \dot{Q}_{inv}$$

Con los valores antes mencionados se tiene que el calor necesario para mantener la temperatura deseada dentro del invernadero sin ninguna pérdida ni ganancia de calor es:

$$Q_{inv} = 513.29 \text{ kJ}$$

Por lo tanto 513,29 kJ es la cantidad de energía necesaria para subir la temperatura de 5 a 17 °C.

5.2.1 Pérdidas de calor por conducción y convección en el invernadero

La transferencia de calor por conducción y convección se puede expresar con la siguiente ecuación.

$$\dot{Q}_{cond,conv} = U_{inv} A_{inv} (T_{inv} - T_{amb})$$

Donde U_{inv} es el coeficiente de transferencia total de las paredes del invernadero, A_{inv} es el área superficial total del invernadero y T_{inv} , T_{amb} , son la temperatura del invernadero y la temperatura ambiente respectivamente.

Hay algunos valores para U_{inv} publicados en la literatura que van desde 3.4 hasta 7.14 $\text{W m}^{-2} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ para cubiertas de polietileno de una sola hoja de 0.2 mm de espesor. Este valor puede variar según las condiciones *in situ* (Abdel y Kozai, 2006).

El valor de U_{inv} se puede determinar mediante la siguiente expresión.

$$U_{inv} = \left[\frac{1}{h_o} + \frac{L_c}{k_c} + \frac{1}{h_i} \right]^{-1}$$

Donde L_c y k_c son el espesor y la conductividad térmica de la cubierta de polietileno, y h_i , h_o son los coeficientes de transferencia de calor por convección dentro y fuera del invernadero respectivamente.

El espesor de la cubierta de polietileno es de 0.2 mm y la conductividad térmica es de $0.64 \text{ W m}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$, lo que da:

$$\frac{L_c}{k_c} = \frac{2 \times 10^{-4} \text{ m}}{0.64 \text{ W m}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}} = 0.0003125 \text{ W}^{-1} \text{ m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$$

Los coeficientes de transferencia de calor por convección se pueden obtener de la siguiente manera (Papadakis *et al.*, 1992):

$$h_i = 2.21 \Delta T^{0.33} \text{ Para pequeño invernadero de polietileno}$$

$$h_o = 0.95 + 6.76 V^{0.49} \text{ Para invernaderos de polietileno donde la velocidad del viento promedio es } V \leq 6.3 \text{ m/s}$$

La diferencia de temperatura máxima se considera como $7 \text{ }^\circ\text{C}$ y la velocidad de viento promedio en la localidad de estudio es de 1.8 m s^{-1} , por lo que:

$$h_i = 4.2 \text{ W m}^{-2} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$$

$$h_o = 9.96 \text{ W m}^{-2} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$$

Por lo que

Considerando una diferencia de temperatura promedio entre el invernadero y el ambiente de 7°C y que el área total del invernadero es de 53.67 m^2 , se obtienen las pérdidas de calor por conducción y convección del invernadero:

$$\dot{Q}_{cond,conv} = 1108.28 \text{ W}$$

5.2.2 Pérdidas de calor por la tubería

Para realizar los cálculos de las ganancias de calor del invernadero fue necesario considerar la transferencia de calor de la tubería, realizadas a continuación.

El agua caliente a $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ que fluye por una tubería de cobre no aislado de 12.8 m de largo con una sección transversal de 0.0005 m^2 , que pasa a través de un invernadero a razón de 1.5 l s^{-1} , el cual se encuentra a $12\text{ }^{\circ}\text{C}$. Se determinará la temperatura de salida del agua y la razón de transferencia de calor de la tubería hacia el invernadero (Figura 17).

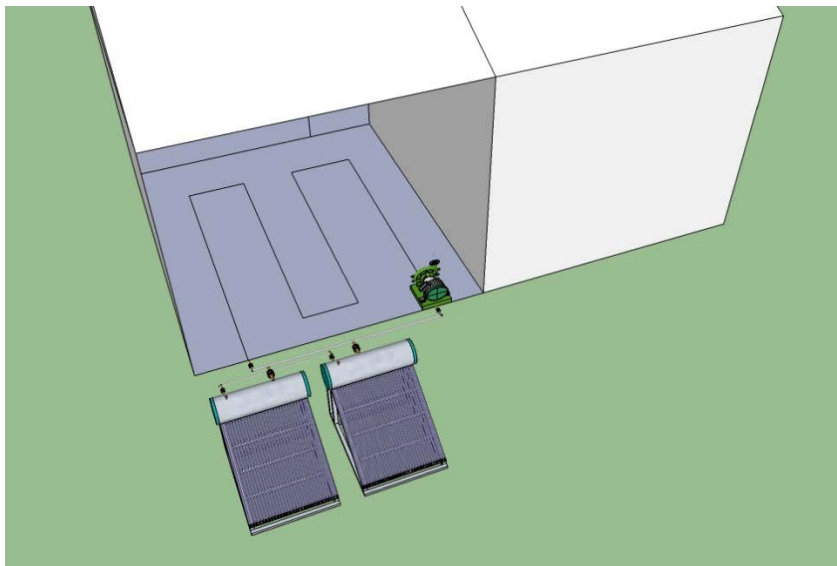


Figura 17. Diagrama del sistema de calefacción

Suposiciones:

- Existen condiciones estacionarias de operación
- Las superficies del tubo son lisas

Propiedades:

No se conoce la temperatura de salida del agua en el tubo, por lo que no se puede determinar la temperatura media de la masa de agua a la cual se deben determinar las propiedades. La temperatura de entrada del agua es de $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ y se espera que descienda como resultado de la transferencia de calor a través del tubo cuya

superficie se encuentra a 12°C. Las propiedades del agua se especifican a la temperatura de entrada, las cuales se tomaron de Cengel (2007).

$$\rho = 977.5 \text{ kgm}^{-3}$$

$$C_p = 4190 \text{ J (kg } ^\circ\text{C)}^{-1}$$

$$k = 0.663 \text{ W (m } ^\circ\text{C)}^{-1}$$

$$\mu = 0.404 \times 10^{-3}$$

$$\nu = \mu / \rho = 0.413 \times 10^{-6} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$$

$$Pr = 2.55$$

Análisis: con la razón volumétrica de entrada de agua se determinó la velocidad del fluido y el flujo másico.

$$V_{prom} = \dot{v} / A_c$$

$$V_{prom} = 3 \text{ m/s}$$

$$\dot{m} = \rho A_c V_{prom}$$

$$\dot{m} = 1.49 \text{ kg/s}$$

El número de Reynolds

$$Re = V_{prom} D_h / \nu$$

$$Re = 188135.59$$

El cual es mayor a 10 000. Por lo tanto, el flujo es turbulento y las longitudes de entrada en este caso son aproximadamente.

$$L_h \approx L_t \approx 10D = 0.254 \text{ m}$$

Lo cual es más corto que la longitud total de la tubería. Por lo tanto se puede suponer que se tiene un flujo turbulento completamente desarrollado en todo el tubo, por lo que se determina el número de Nusselt con la expresión de Dittus-Boelter

$$Nu = hD_h/k = 0.23 Re^{0.8} Pr^{0.3} = 392.42$$

Entonces

$$h = k/D Nu = 10243.11 \text{ W/m}^2\text{°C}$$

El h del cobre es de $15 \text{ W/m}^2\text{°C}$ el cual es mucho más pequeño que el del resultado. Entonces la resistencia térmica por convección en el tubo es insignificante y por lo tanto la temperatura de la superficie interior del tubo se puede tomar como la temperatura del agua. Así mismo se espera que la tubería sea casi isotérmica, ya que está hecha de metal delgado.

El diámetro exterior del tubo es de 2 mm más que el interior

$$A_0 = \pi D_0 L = 1.075 \text{ m}^2$$

$$\dot{Q}_{conv} = h_0 A_0 (T_s - T_{surr}) = 935.25 \text{ W}$$

$$\dot{Q}_{rad} = \varepsilon A_0 \sigma (T_s^4 - T_{surr}^4) = 309.06 \text{ W}$$

$$\dot{Q}_{Total} = \dot{Q}_{conv} + \dot{Q}_{rad} = 1244.31 \text{ W}$$

La temperatura a la cual sale el agua del invernadero es

$$\dot{Q} = \dot{m} C_p (T_i - T_e) \rightarrow T_e = T_i - \dot{Q} / \dot{m} C_p$$

$$T_e = 69.8^\circ\text{C}$$

Los resultados demuestran la suposición de que el descenso de la temperatura en el tubo es despreciable.

La resistencia térmica del tubo y el descenso de temperatura a través del tubo son:

$$R_{tubo} = \frac{\ln(D_2/D_1)}{4\pi k L} = 1.203 \times 10^{-6} \text{ °C/W}$$

$$\Delta T_{tubo} = \dot{Q}_{Total} R_{tubo} = 0.0015 \text{ °C}$$

5.2.3 Determinación de la temperatura dentro del invernadero con respecto al tiempo

La diferencia de temperatura dentro del invernadero con calefacción de acuerdo con lo anteriormente determinado es:

$$dT_{inv} = \int \frac{\dot{Q}_{tubo} - \dot{Q}_{cond,conv}}{C_{air} \rho_{air} V_{inv}} dt$$

Para obtener el comportamiento de esta diferencia de temperatura con respecto al tiempo se necesita insertar esta ecuación en un programa de simulación, dando valores iniciales de cada una de las variables y los valores de temperatura ambiente para una noche típica del mes en el que se está llevando a cabo el experimento.

5.3 Temperatura del agua del sistema de calefacción

Los valores de temperatura del agua tomados por la noche y al día siguiente del sistema de calefacción durante el proceso en el mes de Febrero, se muestran a continuación (Figura 18).

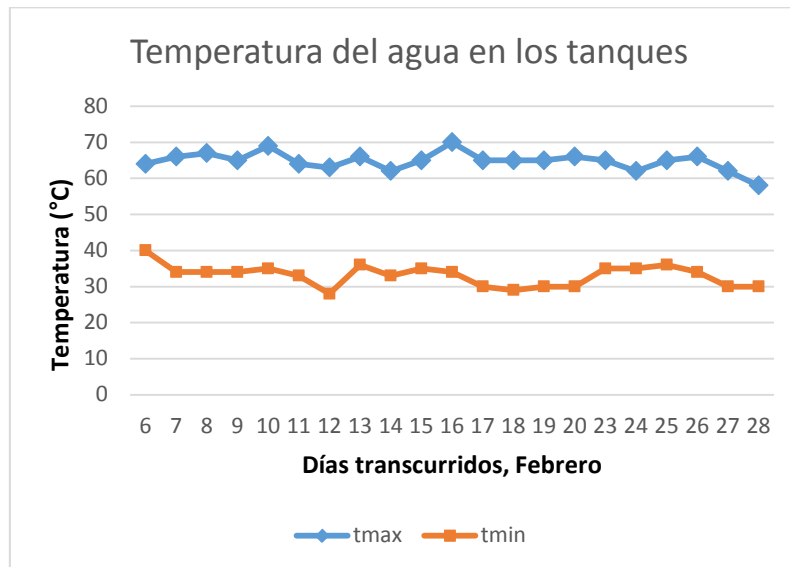


Figura 18. Temperatura del agua registrada antes y después de la calefacción

De estos datos obtenidos se observó que el valor promedio de la temperatura máxima durante el mes de febrero de 65°C, mientras que la mínima es de alrededor de 35 °C. Esto indica que un área de 4.17 m² de colección solar fue capaz de aumentar en 30°C diariamente la temperatura un volumen de 350 l de agua.

Con los valores de la Figura 18 se calculó la cantidad total de calor que es cedido por los 350 l de agua mostrados en la Figura 19.

Sin embargo, esta cantidad no se puede considerar como el calor cedido al invernadero, debido a que el sistema no se encuentra totalmente aislado de pérdidas en los tanques y en las tuberías externas al invernadero.

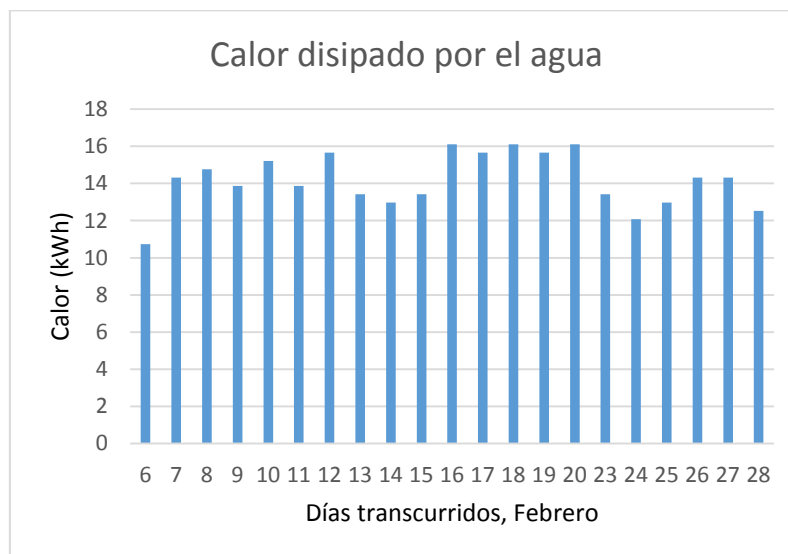


Figura 19. Gráfica de calor cedido por el agua durante transcurso de la calefacción

5.4 Pérdidas de calor en el sistema

Se observó que cuando el sistema no se usaba para calentar el invernadero las pérdidas de calor en los calentadores provocaron un descenso de temperatura de aproximadamente 8°C en el transcurso de la noche, lo que es equivalente a 3.56 kWh por día (Figura 20). Esto indica que de todo el calor disponible, el sistema solo

transfiere 10.6 kWh en promedio por día al invernadero. Además se observaron perdidas en las tuberías externas al invernadero durante la calefacción.

Se colocó un sensor LM135 entre el invernadero y los tanques con el fin de monitorear la temperatura ambiente. Se observó un aumento de temperatura en esta área debido a la pérdida en las tuberías de CPVC que conectan el sistema de calefacción en la parte externa del invernadero.

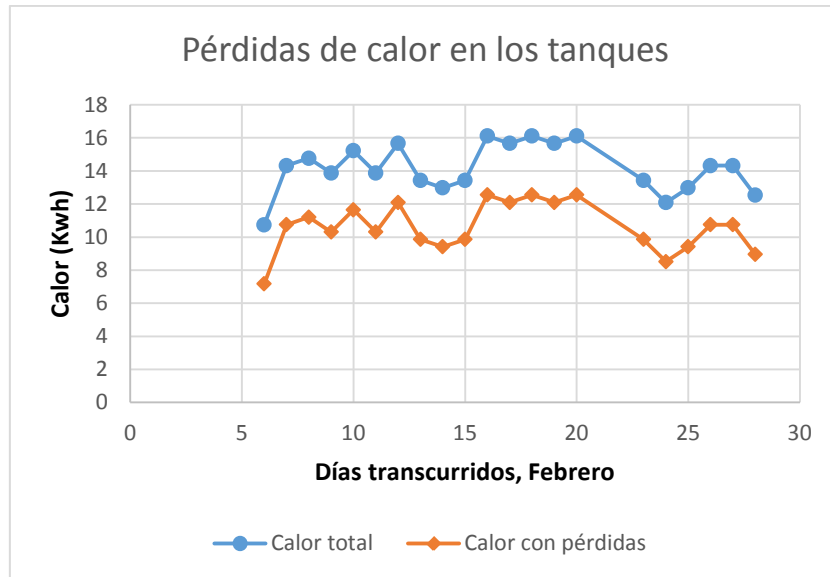


Figura 20. Pérdidas de calor en los tanques de almacenamiento de agua

En la Figura 21 se muestra que el aumento de temperatura dentro del invernadero y el aumento de temperatura del área entre el invernadero y los tanques siguen el mismo patrón, reforzando el argumento de las pérdidas en las tuberías.

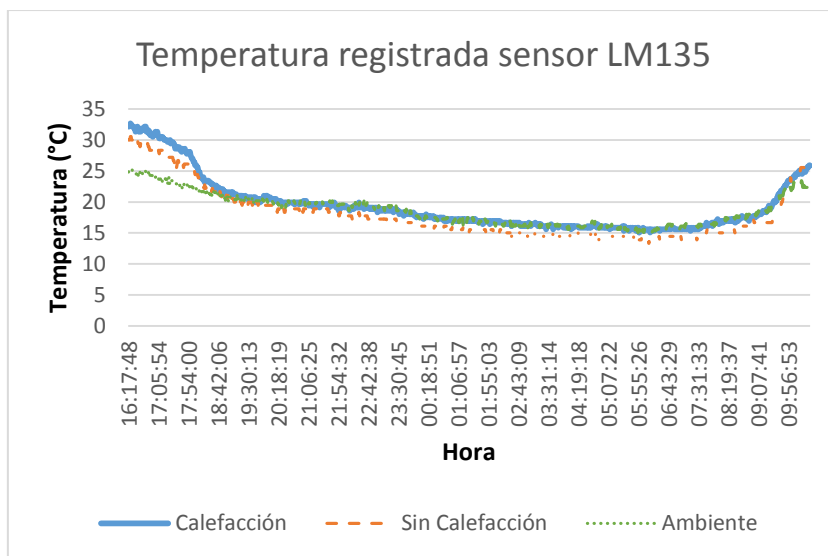


Figura 21. Gráfica de temperatura donde se registran pérdidas de calor en las tuberías externas durante la calefacción

La medición de la temperatura ambiente no arrojó resultados muy confiables, debido a que los sensores se encontraban colocados cerca del invernadero. El cable de los sensores fue de dos metros. Esta cercanía ocasionó que la medición de la temperatura ambiente fuera alterada por las pérdidas de calor del invernadero hacia el ambiente, mostrando valores elevados de temperatura, por lo que para poder monitorear esta variable sería necesario contar con un sistema adicional colocado a una distancia considerable del invernadero, como mínimo 10 metros.

5.5 Registro de temperatura doble techado

La Figura 22 muestra el registro de las temperaturas máximas y mínimas del invernadero y el ambiente. Como resultado del doble techo se obtuvo dentro del invernadero una mejora de 2°C con respecto al ambiente por la noche. Sin embargo el doble techo propició una temperatura dentro del invernadero de hasta 48 °C durante el día por lo que fue necesario retirar este techo en el mes de febrero.

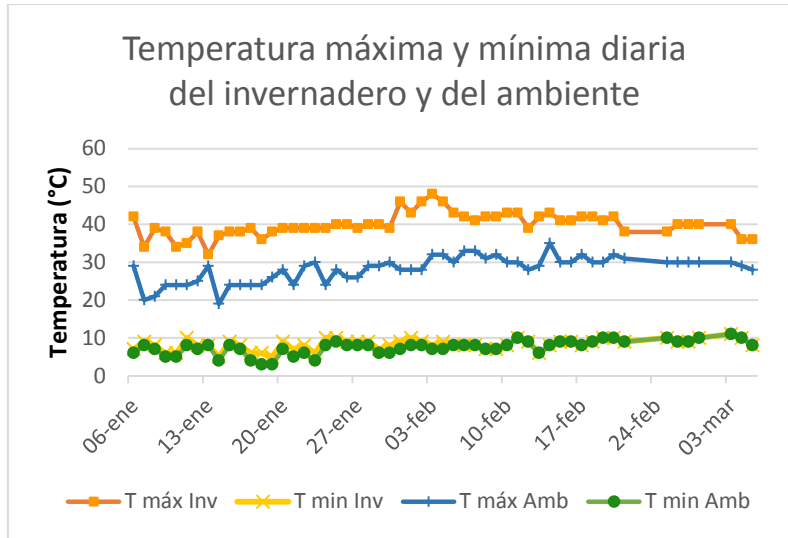


Figura 22. Temperatura máxima y mínima utilizando doble techo

5.6 Registro de temperatura y humedad relativa durante la calefacción

Se registraron datos de temperatura durante el periodo de calefacción activa (del 04/02/2014 al 11/04/2014). Para comparar el efecto de la calefacción activa se eligió un día promedio de febrero. Los datos muestran en promedio un efecto en el invernadero de 3°C con respecto al testigo (Figura 23).

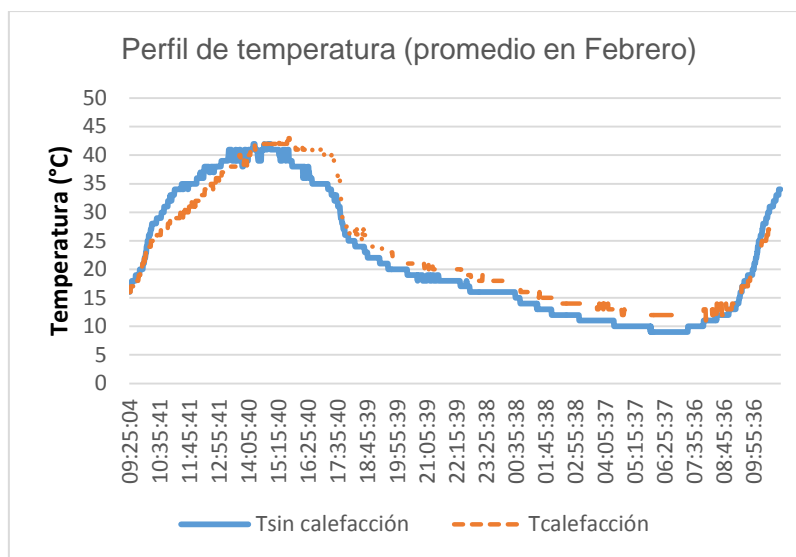


Figura 23. Registro de temperatura, con y sin calefacción

De estos datos, el perfil de temperatura tiene una línea de tendencia polinomial de orden 3, con un $R^2=0.8797$ para la temperatura con calefacción y $R^2=0.9226$ para la temperatura sin calefacción, lo que muestra que el calor ganado en el día es perdido por la noche, representando fluctuaciones en los datos, por lo que el invernadero sin calefacción tiene un coeficiente de correlación más cercano a 1, ya que las pérdidas de calor en este fueron más marcadas por la noche.

Se realizaron varias pruebas modificando el área de colección, reduciendo el volumen de agua a la mitad, utilizando solo el calentador de tubos evacuados, obteniendo resultados similares de aumento de temperatura.

Respecto a la humedad relativa se observó que no hubo cambios considerables con la calefacción activa, pero ya que la humedad tiene la tendencia a disminuir con el aumento de la temperatura, se observa un ligero incremento en el invernadero sin calefacción en las horas más frías (Figura 24).

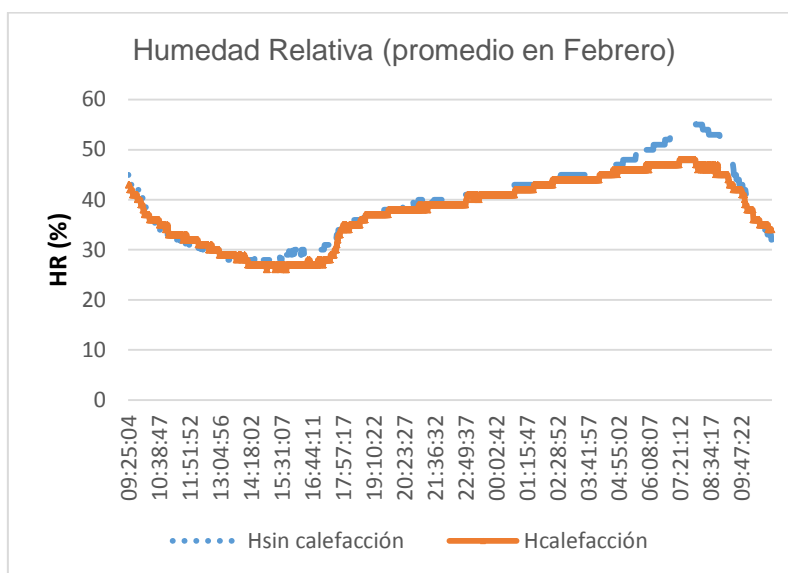


Figura 24. Humedad registrada con y sin calefacción

De acuerdo a estos datos, el perfil de humedad relativa tiene una línea de tendencia polinomial, con un $R^2=0.7511$ para el invernadero con calefacción y $R^2=0.79024$ para el invernadero sin calefacción, ya que las fluctuaciones en los datos son menos evidentes.

Los datos registrados de temperatura también revelan que en el mes de marzo se tuvo una disminución en la diferencia de temperatura con calefacción de 3 a 2°C atribuible al aumento en la velocidad de viento, como muestra el análisis climatológico (Figura 25). En cuanto a las temperaturas mínimas se logró mantener una temperatura arriba del punto perjudicial para la planta. Sin embargo las temperaturas máximas sobrepasaron la ideal, aun abriendo la cortina, lo que pone de manifiesto la necesidad de controlar mejor este aspecto contando con un sistema adicional de ventilación. Las variaciones en los picos máximos se deben a la ventilación y/o nubosidad del cielo.

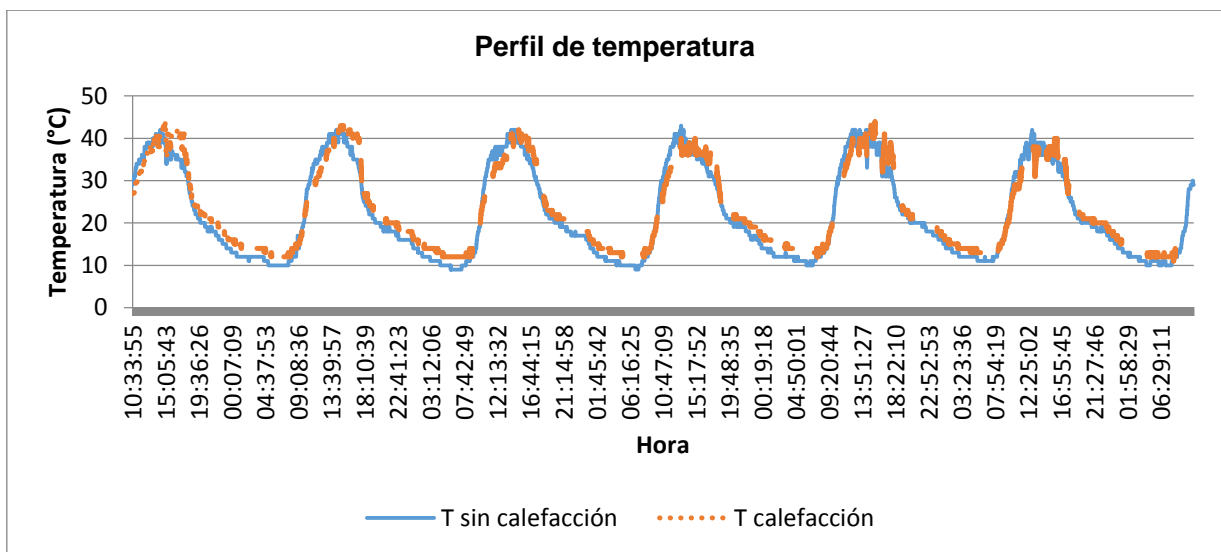


Figura 25. Temperatura registrada durante la calefacción (del 26/02/2014 al 04/03/2014)

5.7 Características físicas y químicas del sustrato

Los resultados de los análisis físico-químicos del sustrato empleado se muestran en el Cuadro 6.

Cuadro 6. Características físico-químicas del sustrato

Textura	Migajón arcilloso
pH	7.8
Conductividad eléctrica	775 μ s
% Materia orgánica	1.273
% Nitrógeno	0.0975
Fósforo	1304 ppm
CIC	28.81 meq/100g
Ca	10.35 cmol/kg
Mg	13.88 cmol/kg
K	1.29 cmol/kg
Na	0.56 cmol/kg

El suelo migajón arcilloso se agrupa como textura media. Son los suelos ideales para la producción agrícola por su amplia capacidad productiva y disponibilidad de agua y nutrientes. Pueden o no ser friable y a medida que se incrementa la porción de limo tiene mayor potencial de compactación, lo cual puede dificultar su manejo (Castellanos *et al.*, 2000).

Respecto al pH, la mayoría de las plantas presentan su mejor desarrollo en valores neutros, ya que en estas condiciones los elementos nutritivos están más fácilmente disponibles y en equilibrio, en este caso el valor se encontró ligeramente alcalino (Garrido, 1994).

La conductividad eléctrica (CE) es la medida de concentración total de sales en una solución y de acuerdo a la norma NOM-021-SEMARNAT-2000 el nivel de CE muestra que el suelo tiene efectos despreciables de salinidad ($<1.0 \text{ dSm}^{-1}$). La

literatura recomienda que el valor no debe exceder 3 dSm^{-1} , (Warncke (1988) citado por García *et al.*, 2001) lo que muestra que el sustrato es bajo en sales.

La materia orgánica es un componente esencial del suelo, que afecta su estado y el funcionamiento de otros componentes presentes en él. Hay tres formas para categorizar al suelo según el contenido de materia orgánica: las categorías son frescos o materia orgánica sin descomponer (1-10%), parcialmente descompuesto (10-40%), y totalmente descompuesto (40-60%) (Lickacz y Penny 2001). Sin embargo Juo y Franzluebbers (2003) reportaron un promedio de materia orgánica en el suelo de aproximadamente 2%. Por lo que éste sustrato presenta un contenido de materia orgánica moderadamente bajo.

Los análisis de laboratorio mostraron resultados del nitrógeno orgánico y del amoniacal, ya que solo existen normas oficiales para éstos. Estos se encuentran formando parte de residuos de cosecha, abonos orgánicos y microorganismos del suelo. Este nitrógeno se libera poco a poco para ser utilizado por las plantas. Por lo tanto, la medida analítica de nitrógeno no expresa la cantidad realmente disponible por las plantas. Por ello es difícil llegar de esta forma a hacer un cálculo real de las necesidades de los cultivos (Garrido, 1994).

La mayor parte del fósforo (P) en el suelo se encuentra en forma no asimilable para las plantas, pero por fortuna las cantidades requeridas por la planta son muy bajas. Según los resultados obtenidos con el método Olsen, el suelo clasifica como pobre si la concentración de P es menor a 5.5 mg kg^{-1} , mediano entre 5.5 y 11 mg kg^{-1} y rico para mayor de 11 mg kg^{-1} (CSTPA, 1980). Sin embargo este sustrato tiene una cantidad muy elevada de este elemento, debido a que contiene gallinaza, según He *et al.* (2004) el contenido de P en esta, puede variar entre $4\ 100$ y $18\ 300 \text{ mg kg}^{-1}$.

La capacidad de intercambio catiónico (CIC) de un suelo le permite retener los elementos necesarios para nutrir a la planta, es decir, entre mayor sea la cantidad mayor es la fertilidad del suelo. En este caso el resultado encontrado para el sustrato indica que se encuentra en un valor medio (Garrido, 1994).

El calcio es un elemento esencial en la formación de compuestos que forman parte de la estructura de la pared celular. Este elemento fortalece la estructura de las plantas, coadyuva en varios sistemas enzimáticos. Ayuda a reducir la acidez del suelo y beneficia a la planta al reducir el efecto negativo del aluminio y magnesio. De acuerdo con Castellanos *et al.* (2000) el valor de Ca en el sustrato se encuentra moderadamente alto. En tal sentido, Aparicio *et al.* (2000) señalan que el calcio es abundante en la mayoría de los suelos y rara vez se comporta como un factor limitante, salvo en suelos ácidos donde puede ser necesario el aporte de sales cálcicas.

Uno de los papeles bien conocidos del magnesio se encuentra en el proceso de la fotosíntesis, ya que es un componente básico de la clorofila. El magnesio se encuentra en el suelo en tres diferentes formas: no intercambiable, intercambiable y soluble. Los suelos más susceptibles a deficiencias de Mg son los de textura ligera. Un bajo nivel de pH del suelo afecta negativamente su absorción y en los suelos alcalinos se da una competencia con el calcio. De acuerdo con la NOM-021-SEMARNAT-2000 el valor de Mg en el sustrato se encuentra moderadamente alto.

El potasio actúa como un cofactor en reacciones enzimáticas, metabolismo y translocación del almidón, absorción del ion NO_3^- , apertura de los estomas y síntesis de proteínas. Las carencias de potasio se pueden corregir aportando materia orgánica (compost), sales minerales ricas en potasio, etcétera (Infoagro, 2014). De acuerdo con Hernández *et al.* (2000) citado por (Castellanos *et al.*, 2000), el valor encontrado de K se encuentra moderadamente alto.

5.8 Análisis de rendimiento del cultivo

El análisis de varianza mostró que hay significancia entre invernaderos con y sin calefacción, pero no entre las dosis de solución nutritiva, por lo que se puede afirmar que la aplicación de calor por medio del sistema de calefacción solar influyó positivamente en la producción de pepino. Entre las diferencias encontradas se observó que la calefacción tuvo influencia significativa en el tiempo de floración, que ocurrió 4 días antes, así como sobre el corte de fruto, con una diferencia de 2 días en comparación con el sistema sin calefacción.

Los resultados muestran que hay una relación de 1.6 en la producción de pepino entre el invernadero con calefacción y el testigo en el mes de marzo (Figura 26).

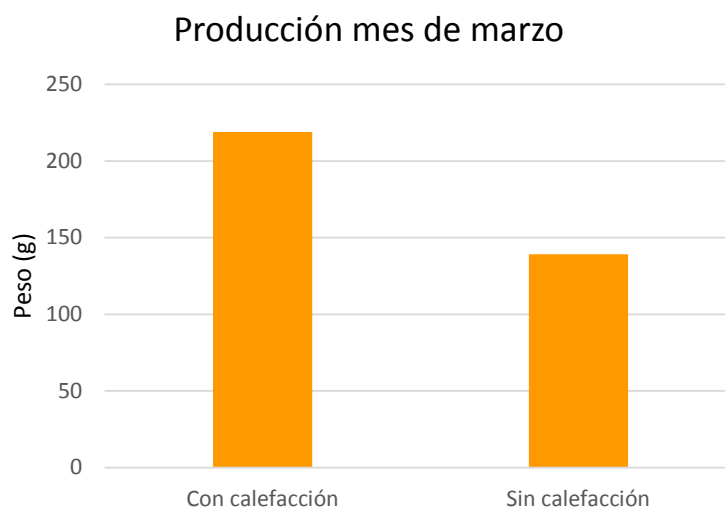


Figura 26. Producción de pepino por planta de invernadero con y sin calefacción, marzo

Posteriormente, en el mes de abril la diferencia de producción se redujo a 1.4, atribuible a que el sistema de calefacción solo pudo mantener una diferencia de 2°C sobre la temperatura ambiente durante las noches (Figura 27). Sin embargo, la producción por planta aumentó de 218 g a 271 g en promedio, principalmente debido a que la temperatura media fue mayor que en el mes anterior.

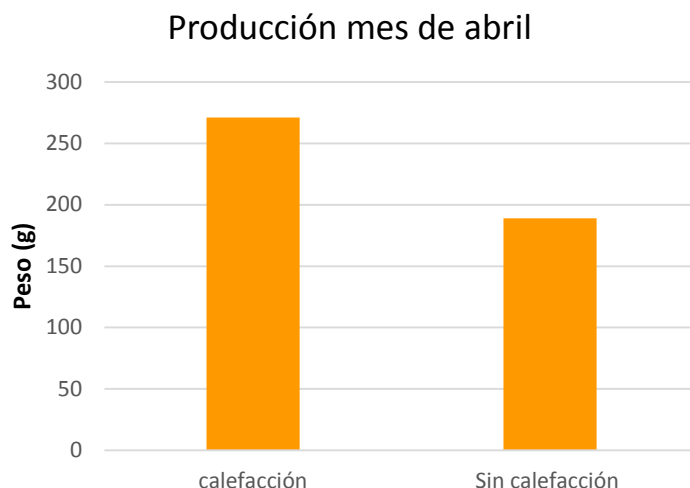


Figura 27. Producción de pepino por planta de invernadero con y sin calefacción, abril

En cuanto a las variables de rendimiento como la altura de la planta (Figura 28), la aplicación de calor no tuvo efecto estadísticamente significativo, no obstante se presentaron plantas más altas en el invernadero con calefacción.

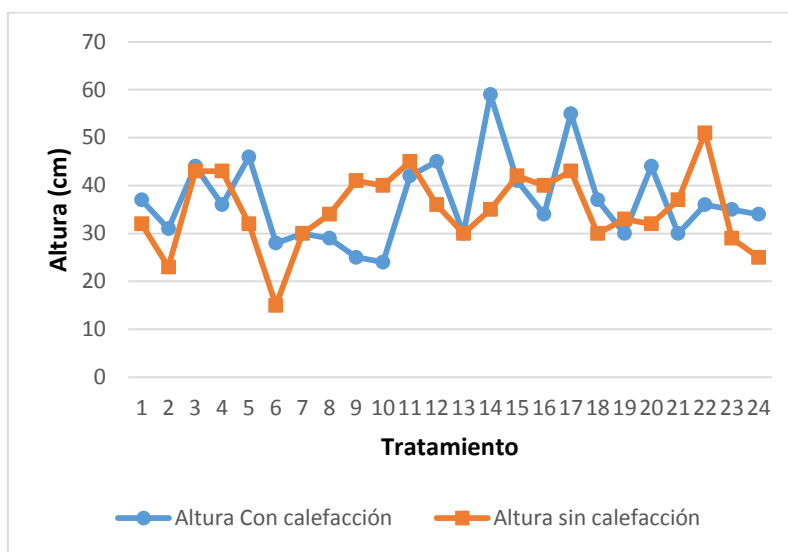


Figura 28. Altura de las plantas en invernadero con calefacción y sin calefacción

El área foliar (Figura 29) mostró un comportamiento distinto a la altura de planta presentando los valores más elevados en el invernadero sin calefacción, sin ser estadísticamente significativo.

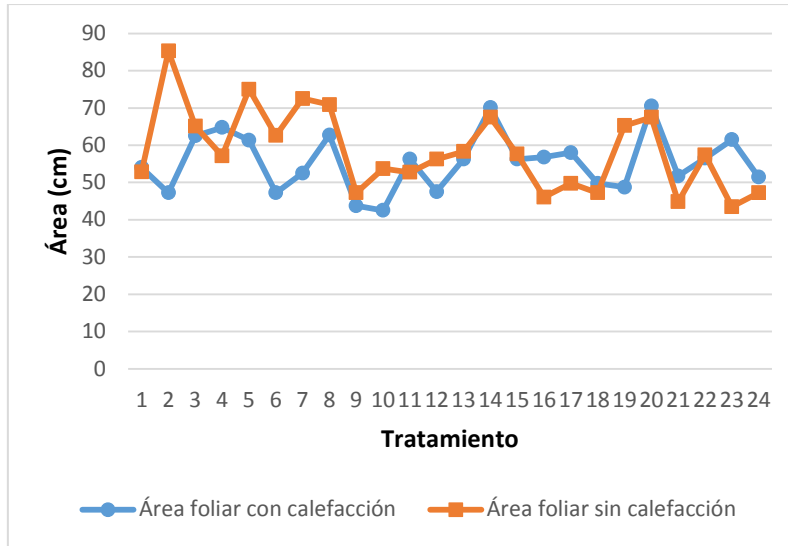


Figura 29. Área foliar de las plantas en invernadero con calefacción y sin calefacción

El diámetro de tallo (Figura 30) además de no mostrar diferencias estadísticamente significativas, sus valores no presentaron picos pronunciados, como son los casos de la altura de planta y el área foliar.

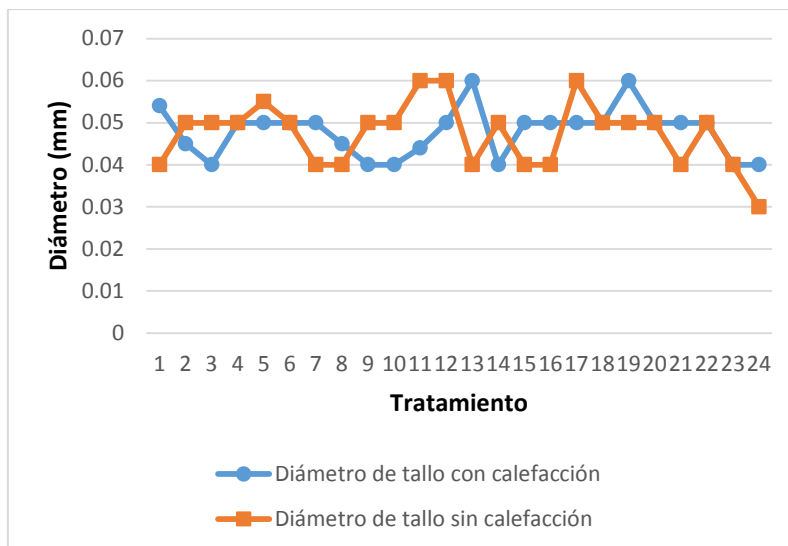


Figura 30. Diámetro de tallo de las plantas en invernadero con calefacción y sin calefacción

6. Discusión

6.1 Variables meteorológicas

6.1.1 Temperatura

De acuerdo con Miller (1992) el clima global del planeta está determinado por su masa total, su distancia respecto al Sol y la composición de su atmósfera. De acuerdo con los primeros dos factores se estima que la temperatura media de la Tierra sería aproximadamente $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$. Sin embargo, la temperatura media es $33\text{ }^{\circ}\text{C}$ más alta, es decir alrededor de $15\text{ }^{\circ}\text{C}$. Esto es debido a la presencia en la atmósfera de pequeñas cantidades de vapor de agua (0 - 2 %), de CO_2 (0.03 a 0.04 %), así como otros gases que absorben parte de la radiación térmica de la superficie terrestre e impiden que escape hacia el exterior, constituyendo así el efecto invernadero natural.

De acuerdo a las Normales Climatológicas Jiquilpan tiene una temperatura media anual de $19.3\text{ }^{\circ}\text{C}$, una máxima de $33.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ y una mínima de $5.1\text{ }^{\circ}\text{C}$, valores muy similares a los entregados por el programa Meteonorm (Cuadro 5). La decisión de utilizar este programa obedece a que las normales climatológicas no cuentan con datos de radiación solar mientras que Meteonorm sí las posee.

6.1.2 Horas de radiación solar

La duración astronómica de la radiación solar se define como la duración en horas desde la salida hasta la puesta del Sol.

La Tierra gira alrededor del Sol en una órbita elíptica, y además gira sobre su eje, denominado polar, el que se encuentra inclinado aproximadamente 23.5° respecto a la normal al plano de traslación, denominado elíptico. La rotación de la Tierra alrededor de su eje ocasiona los cambios diurnos en la radiación solar que incide sobre el planeta Tierra y la posición de este eje relativo al Sol causa los cambios estacionales en la radiación solar (Mendoza, 2012).

La diferencia entre días más largos y días más cortos se debe a la inclinación de 23.5° , lo que conlleva a una inclinación de los rayos del Sol sobre la superficie, provocando diferencias en la cantidad de horas de radiación recibidas de acuerdo a la latitud y a la traslación de la Tierra. Por esto es que, la diferencia de la cantidad de horas de radiación solar de una región se debe a su posición geográfica y a la cantidad de nubes que interfieren sobre dicha radiación (Brenes y Sabrino, 1999; Petterssen, 1968). Por esta razón en los meses de mayo hasta agosto se tiene una duración de la radiación solar mayor que en otros meses, los días duran más que las noches, debido a que el hemisferio norte está inclinado hacia el Sol, permitiendo que los rayos incidan de forma perpendicular, iniciándose en este hemisferio el verano. Sin embargo en el Hemisferio Sur se produce la situación contraria, iniciándose entonces el invierno.

6.1.3 Radiación solar

A la parte de la radiación solar que proviene del Sol en línea recta se denomina radiación directa, y a la que proviene de diversas direcciones al haber sido reflejada, desviada o dispersada por las nubes o la turbidez atmosférica se denomina radiación difusa. La suma de ambas se le llama radiación global (Manrique, 1984; Hernández *et al.*, 2001). En Jiquilpan se tiene en promedio 60 kWhm^{-2} mensuales de radiación solar difusa, mostrando un aumento en los meses de lluvia, junio-octubre, debido a los obstáculos de la atmósfera.

En cuanto a la radiación global la NASA (2013), menciona que para las coordenadas del sitio se tiene un valor promedio de 5.69 kWhm^{-2} , y al dividir la cantidad de radiación global dada por Meteonorm entre la cantidad de días de cada mes para obtener la radiación promedio diaria, se puede afirmar que es un valor muy acercado ya que como se mencionó anteriormente el valor promedio de radiación es de 5.8 kWhm^{-2} . Para los meses fríos, en los cuales se trabajó, se tienen un valor de radiación promedio de 4.7 kWhm^{-2} , valor adecuado para la aplicación de sistemas solares, ya que como menciona el investigador Enrique Caldera miembro de la ANES (Asociación Nacional de Energía Solar), Alemania tiene un promedio de insolación de 3.2 kWhm^{-2} , y es uno de los países líderes en explotación de energía solar. Por esto

destacó que en México este recurso podría ser sustentable, sin embargo, nuestro país no se enfoca en aprovecharlo (Crónica, 2013).

6.1.4 Precipitación

Jiquilpan se encuentra localizado en el eje volcánico transversal cerca del sur de la Altiplanicie Mexicana donde se tienen lluvias al año de entre 600 mm a 1000 mm. De acuerdo con Garcia (2003), en general se presentan lluvias de convección y orográficas, en verano con su máximo en julio, lo que sugiere la presencia de la “lengua” de humedad alimentada por los vientos alisios. Esta lengua fue llamada así por Mosiño en 1959 para representar una columna de aire húmedo que se presenta comúnmente en verano sobre la costa del Pacífico, la cual penetra desde este hacia el norte por la Altiplanicie Mexicana.

De acuerdo a lo reportado por las Normales climatológicas de Jiquilpan la precipitación anual promedio es de 807 mm, donde el mes con mayor precipitación es julio con 215.5 mm. No obstante los datos mostrados en la gráfica obtenida por medio del programa Meteonorm no coinciden con los valores antes mencionados; aunque sigue siendo julio el mes con mayor precipitación este presenta un valor de 120 mm.

6.1.5 Velocidad del viento

El fenómeno del origen de los vientos se debe a que en las regiones alrededor del ecuador reciben más radiación solar que el resto de las regiones del planeta. Esta diferencia en la radiación recibida, se traduce en una diferencia de temperatura entre las latitudes más altas y las más bajas. La atmósfera terrestre tiende a suavizar estas diferencias mediante la circulación de aire y complejos procesos termodinámicos (Durán, 2013).

A nivel de la superficie terrestre la diferencia de velocidad de viento de una región a otra depende de la topografía, ya que esta tiene una gran influencia en los vientos a menos de 5, 800 m sobre el nivel del mar (Delgado, 1997).

La velocidad del viento es una variable importante a considerar en el control climático, ya que esta influye en gran medida en la cantidad de pérdidas de calor por

convección forzada de los invernaderos, presentando cambios ligeros a velocidades inferiores a 3 ms^{-1} (Roy *et al.*, 2002).

En Jiquilpan se tiene un promedio de velocidad de viento de 1.8 ms^{-1} , siendo Mayo el mes con mayor velocidad, 2.4 ms^{-1} .

6.2 Aumento de temperatura con sistema de calefacción

En el experimento se obtuvo un aumento de la temperatura de 2°C y 3°C empleando un área de colección de 4.17 m^2 un tanque de 350 L y un volumen del invernadero de 34 m^3 . Attar *et al.* (2013), realizó cálculos teóricos para un invernadero de 3.75 m^2 de área empleando un intercambiador de calor enterrado de polipropileno y 200 L de agua, usando un colector 4 m^2 , para la localidad de Borj Cedria (Norte de Túnez): latitud $36^{\circ}48 \text{ N}$, longitud $10^{\circ}10$ y altitud de 3 m, de acuerdo a los cuales se puede obtener un aumento de la temperatura de 5°C . Sin embargo Attar *et al.* (2013) no realiza la evaluación del invernadero en condiciones reales. En este caso se contó con una relación de volumen de agua y área de invernadero 60% más desfavorable y un área de colección más pequeña que el área del invernadero. Por otra parte, los cálculos de Attar *et al.* (2013) no incluyen efectos del viento sobre la refrigeración del invernadero o aspectos de ineficiencias del sistema de calefacción o de transferencia de calor. Tomado en cuenta todos estos aspectos y el hecho de que los datos son medidas experimentales, el incremento de temperatura de entre 2 y 3°C es bastante aceptable.

6.3 Rendimiento del cultivo

6.3.1 Área foliar

El área foliar es un parámetro importante, ya que es la medida del tejido fotosintéticamente activo y finalmente determina la cantidad o importe de energía solar que es absorbida y convertida a materiales orgánicos (Shibles, 1987). En este sentido Milthorpe y Moorby (1982) afirman que la luz y la temperatura influyen sobre la división celular en el primordio foliar, de la misma manera que lo hace sobre la iniciación foliar.

Boschi *et al.* (2004) y Vidal *et al.* (2010) encontraron un elevado coeficiente de correlación entre la tasa de expansión foliar y la temperatura diaria promedio. Igualmente Grimstad y Frimanslund (1993) encontraron que el área foliar depende solamente de la temperatura promedio diaria y no de las diferencias de temperatura entre el día y la noche.

Estos resultados son apoyados por Papadopoulos y Hao (2000) quienes indican que la tasa de desarrollo de la planta (número de hojas y flores) aumenta linealmente con el aumento de la temperatura media diaria, pero no son afectadas por la diferencia de temperatura del aire DIF (diferencia entre la temperatura del día y la noche, día-noche), por lo que deducen que la tasa de desarrollo de la planta depende de la temperatura promedio diaria.

Por otra parte, Samaniego *et al.* (2002) mencionan que el utilizar cubiertas de polietileno con aditivos reflejantes en invernadero, disminuye la temperatura, la radicación y la fotosíntesis de las plantas, lo cual refleja cambios en el área foliar, biomasa de la planta y diámetro del tallo con un porcentaje más elevado que el testigo; lo cual muestra que el área foliar está estrechamente relacionada con la cantidad de radiación incidente y la temperatura promedio diaria. Y debido a que en este trabajo no se controló la cantidad de luz no se encontraron cambios significativos en esta variable.

6.3.2 Altura de planta

Berghage (1998) explica que la altura de una planta es una función del número de nudos y de la longitud de cada entrenudo, y ambos son influenciados fuerte por la temperatura del invernadero. La longitud de los entrenudos está influenciada por el DIF, cuando este aumenta, así lo hace la longitud del entrenudo en la mayoría de las especies de plantas estudiadas. El controlar la diferencia de temperatura entre el día y la noche se hace con el objetivo de manipular la altura de la planta para trasplante sin necesidad de químicos.

Afirmando que la altura depende del DIF, Grimstad y Frimanslund (1993) encontraron un mejoramiento en la longitud de los entrenudos con la temperatura, y que una

temperatura más baja en el día que en la noche inhibe el crecimiento y desarrollo de plantas jóvenes de pepino al igual que el brote de flores.

En este sentido, la diferencia entre la altura de plantas de un invernadero a otro en este trabajo no fue significativo debido a que el DIF no fue manipulado.

Por otro lado, para el caso específico de Tomate y Pepino Grimstad (1993) menciona que las bajas temperaturas son muy importantes, en el sentido de que la altura de las mismas se ve afecta si la temperatura desciende debajo de 6°C para Pepino.

En este trabajo no se encontraron diferencias significativas en la altura de las plantas en los invernaderos con y sin calefacción, muy posiblemente porque en ninguno de los dos casos la temperatura descendió de 8 °C.

6.3.3 Fruto

Medany *et al.* (1999) encontraron un incremento significativo en la tasa de crecimiento del fruto de pepino con la temperatura nocturna. En este sentido Grimstad (1993) encontró que las temperaturas bajas aumentan el tiempo de cosecha al igual que la aparición de flores en pepino y jitomate.

Mao *et al.* (2012) encontraron que para el cultivo de jitomate el tiempo de floración y fructificación se adelantaron por 2.3 y 1.9 días respectivamente con el aumento de temperatura.

Papadopoulos y Hao (2000) encontraron que para dos variedades de pepino (Corona y Aramon) se tiene diferencias en la producción (tamaño y cantidad de fruto) con la temperatura, teniendo diferente rango óptimo de producción.

6.3.4 Humedad y rendimiento de pepino

Fricke y Krug (1997) mencionan que no hay diferencias significativas en el rendimiento de la producción de pepino con la humedad, sin embargo la calidad del fruto se redujo al humidificar, contradiciendo las expectativas comunes. Concluyendo que no es necesario humedecer o deshumedecer el cultivo en verano.

Sin embargo Del Castillo *et al.* (2004) mencionan que si la temperatura se encuentra por encima del cero vegetativo (35°C), el abonado pierde su importancia pasando a

ser vital el riego y la humedad relativa, la cual se debe mantener en lo posible cercana al óptimo.

En acuerdo con lo anterior, debido a que no se tuvo un control de la temperatura máxima y la humedad relativa, sobre pasando límite superior e inferior, respectivamente, no se vieron cambios significativos en el rendimiento del pepino con la aplicación de dos dosis de fertilización diferentes.

6.3.5 Efecto de altas temperaturas

Es importante mencionar que en ambos invernaderos (con y sin calefacción), se registraron temperaturas altas, 43°C que es superior al límite, lo cual podría afectar diversos procesos fisiológicos como cambios bioquímicos, integridad de la membrana celular, actividad de enzimas fotosintéticas, difusión y asimilación de CO₂ que podrían repercutir en el rendimiento del cultivo (Dinar y Rudich, 1985).

En este sentido Ortega (1991) menciona que las altas temperaturas, especialmente cuando están asociadas a condiciones de humedad baja, inducen la caída de flores y frutos recién cuajados en pimiento. Sin embargo cuando el fruto ya está en una fase avanzada de desarrollo resulta menos sensible a estos efectos.

Los efectos que tienen las altas temperaturas en el cultivo no fueron estudiados en este trabajo, sin embargo cabe mencionar que la producción total no fue en la cantidad esperada, ya que se obtuvo 11.19 kg m⁻² y 7.5 kg m⁻² para el invernadero con calefacción y sin calefacción respectivamente.

De acuerdo a Ramírez *et al.* (2012) encontraron un rendimiento promedio en el cultivo de pepino en invernadero de 21.2 kg m⁻² representando casi el doble de la producción obtenida el invernadero con calefacción. De igual manera López *et al.* (2011) encontraron en promedio 16 kg m⁻² para variedades con longitud de 23.2 cm, equivalentes al pepino tipo americano.

Para el caso de pepinos tipo europeo al que pertenece la variedad Urano utilizada en este estudio, variedad que alcanza longitudes menores a 15 cm (Infoagro, 2014b), Ortiz *et al.* (2008) encontraron un rendimiento promedio, que extrapolados a la densidad de plantas de nuestro estudio implicarían valores de 9.86 kg m⁻². Este valor

es aún mayor que el valor encontrado en el invernadero sin calefacción, pero menor al invernadero con calefacción.

De manera similar Té (2008) encontró un rendimiento promedio para el cultivo de pepino en Querétaro de 8.62 kg m^{-2} , valor que sigue siendo mayor al encontrado en el invernadero sin calefacción, pero menor que rendimiento del invernadero con calefacción.

7. Conclusiones

Las características climatológicas y de radiación solar de Jiquilpan son factibles para el uso de sistemas de control climático para invernaderos en meses fríos, y en especial los que aprovechan la energía solar.

El uso de un doble techo como control climático en un invernadero sencillo resultó ser inconveniente debido a las características climatológicas, ya que en los meses cálidos se puede llegar a aumentar la temperatura al punto de ser perjudicial para el cultivo. Sin embargo este sistema en meses fríos mantuvo una diferencia positiva de temperatura nocturna de 2°C con respecto al ambiente.

El sistema de calefacción solar logró mantener la temperatura del invernadero 3°C por encima de la temperatura ambiente durante la noche en los meses de febrero y marzo. Posteriormente logró solo un aumento de 2 °C debido a que se incrementaron las pérdidas por convección por el aumento de la velocidad de viento, lo que influyó en el rendimiento del cultivo en el mes de abril.

Los sensores que mostraron menor variación en sus mediciones fueron los DHT11. Mientras que los sensores LM135 arrojaban errores de hasta 10°C en los picos mínimos y máximos. Así mismo, los sensores LM35 registraron temperaturas máximas y mínimas confiables sin embargo las mediciones mostraron diferencias de hasta 2°C de un minuto a otro.

En el sistema de calefacción solar se puede llegar a utilizar la mitad del volumen de agua, obteniendo resultados similares de aumento de temperatura; sin embargo la diferencia de presión generada por la diferencia de volumen, provoca que el flujo se disminuya, influyendo en la eficiencia del sistema y poniendo en riesgo la seguridad del mismo.

Los resultados en la producción del cultivo de pepino con calefacción y un incremento de 3°C fueron satisfactorios, representado una relación de 1.6 con respecto al invernadero sin calefacción en el mes de marzo. Posteriormente un aumento de 2°C en el mes de abril obtuvo a una relación de 1.4 de producción.

La cantidad de producción de pepino en el invernadero sin calefacción fue menor al promedio esperado según lo reportado por varios autores, lo cual fue provocado por factores que no fueron controlados en ambos invernaderos, sin embargo la producción en el cultivo con calefacción fue superior al promedio esperado.

8. Recomendaciones

El uso de un sistema de calefacción para invernaderos depende de muchos factores, tales como inversión inicial, sus efectos sobre la productividad de la cosecha del invernadero y del clima local. Los sistemas que utilizan combustibles fósiles han demostrado ser capaces de satisfacer las necesidades de calefacción, sin embargo no dejan de ser una fuente contaminante para el ambiente y es donde se puede considerar las fuentes alternativas de energía como la solar.

Para evitar la mayoría de las pérdidas en las tuberías externas al invernadero se podría colocar el tanque de almacenamiento de agua lo más cercano posible a donde se va a transferir el calor.

Para evitar diferencias de presión en los tanques, debido a la diferencias de volumen, se podría optar por tanques de mayor capacidad, para impedir daños en el equipo, ya que esto amortiguara los cambios de temperatura manteniendo una presión más estable.

Para evitar diferencias en la producción debido a altas temperaturas sería conveniente contar con un sistema de ventilación adecuado (y posiblemente automatizado) para controlar esta variable. También sería conveniente contar con un sistema de riego automatizado para controlar la humedad relativa del cultivo, para con ello evitar estrés hídrico en las plantas.

9. Bibliografía

Abdel, G. A. and T. Kozai. 2006. On the determination of the overall heat transmission coefficient and soil heat flux for a fog cooled, naturally ventilated greenhouse: Analysis of radiation and convection heat transfer. *Energy Conversion and Management*, 47, 2612–2628.

Amuyunzu, P.A., JA Chweya, Y. Rosengartner y S. Mendlinger. 1997. Short communication Effect of different temperature regimes on vegetative growth of melon plants. *African Crop Science Journal*, 5(1), 77-86.

ANES, 2012. *Energía Renovable*. Recuperado el 12 de Marzo de 2012, de http://www.anes.org/anes/index.php?option=com_wrapper&Itemid=11

Aparicio, P., C. Arrese, M. Becama. 2000. Fijación de nitrógeno en *Fundamentos de Fisiología Vegetal*. Editores J. Azcon-Bietos y M. Talón. Mc Graw Hill. Barcelona.

Arduino, 2014. Arduino Leonardo. Recuperado el 21 de Abril de 2014, de <http://arduino.cc/en/Main/arduinoBoardLeonardo>

Attar, I. N. Naili, N. Khalifa, M. Hazami, A. Farhat. 2013. Parametric and numerical study of a solar system for heating a greenhouse equipped with a buried exchanger. *Energy Conversion and Management*, 70, 163–173.

Ávila, J. G., V. F. Lara, R. L. Leyte. 2012. Deshidratador de frutas con energía solar. *Energías Renovables*, 9-13.

Badia, M. S. y J. F. Osorio. 2007. *Usos del agua en el sector energético: Escenarios de evolución futura*. . Recuperado el 18 de Agosto de 2014, de <http://oph.chebro.es/DOCUMENTACION/DirectivaMarco/ParticipacionCiudadana/1msanz-jfcosanz-circe.pdf>

Benavides, A. 2011. *La importancia de la temperatura en la productividad de hortalizas en invernadero*. Recuperado el 29 de Octubre de 2013, de http://www.abenmen.com/a/Importancia_temperatura_productividad_hortalizas_invernadero.pdf

Berghage, R. 1998. Controlling Height with Temperature. *HortTechnology*, 8(4).

Boche, L. A. 2012. *Análisis comparativo entre dos sistemas de invernadero para producción de tomate en la empresa CEICKOR S.A. de México*. Tesis de Licenciatura. Departamento de administración de agronegocios. Zamorano, Honduras.

Boschi, C., A. Di Benedetto, C. Pasian. 2004. Predicción de los eventos de desarrollo en *Spathiphyllum floribundum* schott “petite” en función de unidades térmicas acumuladas. *Journal of Horticultural/ Science & Biotechnology*, 79, 776 – 782.

Brun R. 1974. Orientation of greenhouses in the Mediterranean Zone. *Acta Horticulturae*, 42, 43–54.

Castellanos, J. Z., J. X. Uvalle, A. Aguilar. 2000. *Manual de interpretación de análisis de suelos y aguas*. 2a Edición. Instituto de Capacitación para la Productividad Agrícola. San Miguel de Allende, México.

Castilla, N. 2007. *Invernaderos de plástico: tecnología y manejo (segunda edición)*. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid, España p. 169

Cengel, Y. A. 2007. *Transferencia de calor y masa: Un enfoque práctico*. México D.F.: McGraw-Hill.

Chandra P. 1976. *Predicting the effects of greenhouse orientation and insulation on energy conservation*. Unpublished M.Sc. thesis. Department of Agricultural Engineering, University of Manitoba, Winnipeg, Manitoba, Canada.

Comunidad de Madrid, 2006. *Guía de la Energía Solar*. Recuperado el 12 de Noviembre de 2012, de <http://www.fenercom.com/pdf/publicaciones/guia-de-la-energia-solar-fenercom.pdf>

Crónicas, 2013. *México, entre los cinco países con mayor potencial de energía solar*. Recuperado el 22 de Octubre de 2013 <http://www.cronica.com.mx/notas/2012/639094.html>

CSTPA. Council on Soil Testing and Plant Analysis. 1980. Handbook on Reference Methods for Soil Testing. Athens, Georgia. USA

Daubenmire, R. F. 1974. Plants and Environment. Washington State University. JOHN WILEY & SONS. Third edition. 422 pp

Del Castillo, J., A. Uríbarri, S. Sábada, G. Aguado, J. Sanz. 2004. Guía del cultivo en invernadero del pepino de suelo. *Navarra Agraria*. 143, 27-33

Delgado, H., G. Carrasco, P. Cervantes, R. Cortés, R. Molinero. 1997. *Patrones de viento en la región del volcán Popocatepetl y ciudad de México*. Recuperado el 3 de Septiembre de 2014 de <http://www.disaster-info.net/lideres/spanish/mexico/biblio/spa/doc8626/doc8626-a.pdf>

Dinar, M., J. Rudich. 1985. Effect on heat stress on assimilate metabolism in tomato flower bud. *Annals of Botany*, 56, 249-257

Durán, L. 2013. *Origen del viento. Taller virtual de Meteorología y Clima*. Recuperado el 3 de Septiembre de 2014 de <http://meteolab.fis.ucm.es/meteorologia/viento>

Fabrizio, E. 2012. Energy reduction measures in agricultural greenhouses heating: Envelope, systems and solar energy collection. *Energy Buildings*, 57-63

FAO. 2002a. *El Cultivo Protegido en Clima Mediterráneo*. Capítulo 4. Control del medio ambiente: Temperatura. Roma. Recuperado el 11 de Septiembre de 2013, de <http://www.fao.org/docrep/005/s8630s/s8630s06.htm#bm06.1>

FAO. 2002b. *El Cultivo Protegido en Clima Mediterráneo*. Capítulo 4. Control del medio ambiente: Sistemas de calefacción tradicionales. Roma. Recuperado el 11 de Septiembre de 2013, de <http://www.fao.org/docrep/005/s8630s/s8630s06.htm#bm06..4.1.1>

FAO-SAGARPA. 2012. *Producción de hortalizas a cielo abierto y bajo condiciones protegidas*. Recuperado el 10 de Junio de 2014, de www.sagarpa.gob.mx/pesa/docs_pdf/proyectos_tipo/invernaderos.pdf

Francescangel, N. 2010. *Doble techo y pantallas térmicas*. Recuperado el 11 de Agosto de 2014, de www.economíayviveros.com.ar/marzo2010/nota1.html

Fricke A. y H. Krug. 1997. Influence of humidification and denumidification on greenhouse climate as well as water relations and productivity of cucumber II. Influences on plants. *GARDEN JOURNAL*, 62(6), 241-248

García, E. 2003. Distribución de la precipitación en la Republica Mexicana. *Investigaciones geograficas, voletin del instituto de geografia. UNAM*, 50, 67-76.

García, J. L., S. De la Plaza, J. M. Durán, L. M. Navas, R. M. Benavente, L. Luna. 1997. Calefacción por suelo radiante. *Horticultura*, 124, 105-108.

García, O., G., Alcántar, R. I. Cabrera, F. Gavi, V. Volke. 2001. EVALUACION DE SUSTRATOS PARA LA PRODUCCION DE *Epipremnum aureum* y *Spathiphyllum wallisii* CULTIVADAS EN MACETA. *Terra*, 19, 249-258.

Garrido, M. S., 1994. *Interpretación de analisis de suelos*. Madrid. Recuperado el 12 de Septiembre de 2014, de http://www.magrama.gob.es/ministerio/pags/biblioteca/hojas/hd_1993_05.pdf

Gázquez, J. C., J. C. López, J. Cabrera, D. Meca, J. Pérez, E. Baeza. 2005. Estrategias de calefacción en invernadero con cultivo de pimiento. Estación experimental de Cajamar "Las Palmerillas". 7 p.

Gil, R. A. 1991- El pimiento y sus variedades en España. Hortofruticultura. Año III. Edagríco-le. España; 76- 77; 97-105.

Gudiño, A. D. 2012. ESTUDIO TEÓRICO-PRÁCTICO DE UN SECADOR HIBRIDO SOL-GAS . *Energía Sostenible para todos* (págs. 1-7). Cuernavaca: ANES.

Gupta, M. J. and P. Chandra. 2002. Effect of greenhouse design parameters on conservation of energy for greenhouse environmental control. *Energy*, 27, 777–794.

Green, M., J. Flores, C. Sánchez. 2012. *Innovación tecnológica de sistemas de producción y comercialización de especies aromáticas y cultivos élite en agricultura orgánica protegida con energías alternativas de bajo costo*. Recuperado el 5 de

Septiembre de 2014, de <http://intranet.cibnor.mx/personal/bmurillo/docs/inteligencia-mercado-pepino.pdf>

Grimstad, S.O. 1993. The effect of a pulse of low daily temperature on growth and development of plants of cucumber and tomato greenhouse for propagation. *Scientia Horticulturae*, 53(1–2), 53–62.

Grimstad, S.O., and E. Frimanslund. 1993. Effect of different day and night temperature regimes on greenhouse cucumber young plant production, flower bud formation and early yield. *Scientia Horticulturae*, 53(3), 191-204.

Harnett, R. F., T. V. Sims, G. E. Bowman. 1979. Comparison of greenhouse types and their orientation. *Experimental Horticulture*, 31, 59–66.

He, Z., T. S. Griffin, C. W. Honeycutt. 2004. Phosphorus distribution in dairy manures. *Journal of environmental quality*, 33(4), 1528.

Heidari, M. D. and M. Omid. 2011. Energy use patterns and econometric models of major greenhouse vegetable productions in Iran. *Energy*, 220–225.

Hernández, J., I. Escobar, N. Castilla. 2001. *La radiación solar en invernaderos mediterráneos*. Junta de Andalucía y Caja Rural de Granada. 33 p. Recuperado el 10 de Octubre de 2014, de <http://www.ecofisiohort.com.ar/wp-content/uploads/2008/10/radiacion-solar-invernadero.pdf>

Hopkins W. 1999. *Introduction to Plant Physiology*. 2nd ed., John Wiley and Sons New York.

INEGI. 1988. *Atlas nacional del medio físico*. México.

Infoagro, 2013. *Control climático en invernaderos*. Recuperado el 3 de Agosto de 2014, de http://www.infoagro.com/industria_auxiliar/control_climatico.htm

Infoagro, 2014. *Análisis de suelo*. (2da parte) Recuperado el 21 Septiembre de 2014 http://www.infoagro.com/abonos/analisis_suelos2.htm

Infoagro, 2014b. *El cultivo de pepino (Parte 1)*. Recuperado el 6 de Septiembre de 2014, de <http://www.infoagro.com/hortalizas/pepino.htm>

Iriarte, A., L. Saravia, C. Matias. 2002. Acondicionamiento Térmico con Energía Solar de un Invernadero Rusticadero para la Producción de Plantas. *Congreso regional de ciencia y tecnología*, (págs. 1-33). Catamarca, Argentina.

Juárez, P., R. Bugarin, R. Castro, A. Sánchez, E. Cruz, C. Juárez, G. Santiago, R. Balois. 2011. Estructuras utilizadas en la agricultura protegida. *Revista Fuente* año 3 No. 8

Juo A., and K. Franzluebbbers. 2003. *Tropical soils: properties and management for sustainable agriculture*. Oxford University Press, New York.

Kıyan, M., Bingöl, E., Melikog̃lu, M., Albostan, A. 2013. Modelling and simulation of a hybrid solar heating system for greenhouse applications using Matlab/Simulink. *Energy Conversion and Management*, 72, 147–155.

Kurata K., Z. Quan, O. Nunomura. 1991. Optimal shapes of east–west oriented single-span tunnels with respect to direct light transmissivity. *Journal of Agricultural engineering Research* 48(2), 89–100.

Lickacz J., and D. Penny .2001. *Soil organic matter*. *Alberta Agriculture and Food Agdex*. Recuperado el 4 de Octubre de 2014, de [http://www1.agric.gov.ab.ca/\\$department/deptdocs.nsf/all/agdex890?opendocument](http://www1.agric.gov.ab.ca/$department/deptdocs.nsf/all/agdex890?opendocument).

López, E. J., J. Rodríguez, L. M. Huez, S. Garza, J. Jiménez, y E. E. Leyva. 2011. Producción y calidad de pepino (*Cucumis sativus* L.) bajo condiciones de invernadero usando dos sistemas de poda. *IDESIA*, 21-27.

López, J. C., P. Lorenzo, E. Medrano, M. Sánchez, J. Pérez, H. P. Arco. 2000. *Calefacción de Invernaderos en el Sudeste Español*. Obtenido de www.larural.es

Long, S. P., S. Humphries, P. G. Falkowski. 1994. Photoinhibition of photosynthesis in nature. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology* 45.

Lorenzo, P., M. C. Sánchez, E. Medrano, J. Pérez, C. Maroto. 1997. El enriquecimiento carbónico en invernadero del Sur Mediterráneo. *Horticultura*. No 118. 66-67.

- Lugo, O., G. A. Villavicencio, S. A. Díaz. 2014. Paquete tecnológico para monitoreo ambiental en invernaderos con el uso de hardware y software libre. *Terra Latinoamericana*, 32(1), 77-84.
- Manrique, J. A. 1984. Energía solar- Fundamentos y Aplicaciones Fototérmicas. Harla, México. 253
- Mao, L., Y. Li, X. Wen. 2012. Influence analysis of diurnal temperature performance factors training tomato seedling. *Nongye Gongcheng Xuebao/Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 28(16), 172-177.
- Marcelis, L. F. M., and L. R. Baan Hofman-Eijer. 1993. Effect of temperature on the growth of individual cucumber fruits. *Physiologia Plantarum, Kobenhavn*, 87(3), 321-328.
- Medany, M.A., M.M. Wadid, A.F. Abou-Hadid. 1999. Cucumber fruit growth rate in relation to climate. *Acta Hort*, 491, 107-111.
- Mekhilef, S., S. Faramarzi, R. Saidur, Z. Salam. 2012. The application of solar technologies for sustainable development of agricultural sector. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 583–594.
- Mendoza, C. A. 2012. Viabilidad técnica-económica de una central solar termoeléctrica de colectores cilíndricos parabólicos para su implementación de México. Tesis de licenciatura, UNAM, México.
- Miller, G. T. 1992. *Living in the environment, an introduction to environmental science*. Wadsworth Publishing Co., Belmont, California.
- Milthorpe F. and J. Moorby. 1982. Introducción a la fisiología de los cultivos. *Editorial Hemisferio Sur S. A.* 160, 164.
- Mohammadi, A., and M. Omid. 2010. Economical analysis and relation between energy inputs and yield of greenhouse cucumber production in Iran. *Applied Energy*, 191–196.

Moreno, R. A., D. J. Aguilar, G. A. Luévano. 2011. Características de la agricultura protegida y su entorno en México. *Revista mexicana de agronegocios*, 763-774.

Muñoz, P., A. Atón, J. Montero. 2013. Tendencias en la construcción de invernaderos: normas CEN y UNE. Sistemas de control ambiental y posibilidades de mecanización de operaciones de cultivo y riego. Recuperado el 20 de Septiembre de 2014, de http://www.ruralcat.net/migracio_resources/hivernacles.pdf

NASA. 2013. *NASA Surface meteorology and Solar Energy: RETScreen Data*. Recuperado el 12 de Marzo de 2013, de <https://eosweb.larc.nasa.gov/sse/RETScreen/>

Nakasima, M. O., N. Velázquez, S. Ojeda. 2012. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN BIODIGESTOR ANAEROBIO TIPO MEZCLA COMPLETA Y LECHO DE FLUJO ASCENDENTE. *Energía Sostenible para todos* (págs. 1-5). Cuernavaca: ANES.

NOM-021-SEMARNAT-2000. 2002. Que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos, estudio, muestreo y análisis. Recuperado el 10 de Agosto de 2014 de <http://www.profepa.gob.mx/innovaportal/file/3335/1/nom-021-semarnat-2000.pdf>

Ortiz, H., Vidal, E. R., De la Rosa, S., Dávila, M. R., Leyva, O. 2008. ¿Pepino americano o europeo? *Universidad Veracruzana, Facultad de Ciencias Biológicas y Agropecuarias de Córdoba, Veracruz*. Recuperado el 6 de Septiembre de 2014 de <http://www.hortalizas.com/cultivos/cucurbitaceas/pepino-americano-o-europeo/>

Ozgener, O., A. Hepbasli. 2005. Experimental performance analysis of a solar assisted ground-source heat pump greenhouse heating system. *Energy Buildings*, 101–110.

Ozgener, O., A. Hepbasli. 2007. A parametrical study on the energetic and exergetic assessment of a solar-assisted vertical ground-source heat pump system used for heating a greenhouse. *Building and Environment*, 42, 11–24.

Papadakis, G., A. Frangoudakis, S. Kyritsis. 1992. Mixed, forced and free convection heat transfer at the greenhouse cover. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 52, 191–205.

Papadopoulos, A.P., and X. Hao. 2000. Effects of day and night air temperature on growth, productivity and energy use of long English cucumber. *Canadian Journal of Plant Science*. 80. 143–150.

PESCO, 2012. Radiación solar. Recuperado el 12 de Octubre de 2014 de <http://www.pesco.com.mx/pesco/eficiencia/index.php/servicios/sistemas-fotovoltaicos/radiacion-solar>

Petterssen, S. 1968. Introducción a la metodología. Capítulo 2. Radiación en la atmósfera. 471

Piguillem, J. 2004. Competitividad del pepino Mexicano en el mercado internacional. Recuperado el 5 de Septiembre de 2014, de http://cdigital.dgb.uanl.mx/te/1020149815/1020149815_02.pdf

PROEXPORT, A. d.-e. 2009. *Sistemas de calefacción en invernadero mediante gas natural* Recuperado el 10 de Noviembre de 2012, de http://www.proexport.es/Documentos/Proyectos/200942117261310._Sistema_de_calefacci%C3%B3n_en_invernadero_mediante_gas_natural.pdf

R Core Team. 2014. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. Recuperado el 10 de Octubre de 2013, de <http://www.R-project.org/>.

Raffanel, Y., J. Fabrizio, J. Virgone, E. Blanco, M. Filippi. 2009. Integrated solar heating systems: from initial sizing procedure to dynamic simulation. *Solar Energy*, 657-663.

Ramirez, G., A. Mercado, R. Ocampo, R. G. Guevara, J. M. Soto. 2012. Efecto del manejo cultural y sombreado sobre la productividad del cultivo del pepino (*Cucumis sativus L.*). *Ciencia@uaq*, 5(1). Ingeniería de Biosistemas, Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Querétaro. Recuperado el 20 de Septiembre de 2014, de

https://www.uaq.mx/investigacion/revista_ciencia@uaq/ArchivosPDF/v5-n1/articulo2.pdf

Roy, J. C., T, Boulard, C. Kittas, S. Wang. 2002. Convective and Ventilation Transfers in Greenhouses, Part 1: the Greenhouse considered as a Perfectly Stirred Tank. *Biosystems Engineering*, 83 (1), 1–20.

Sabrino T, V. F. y A. Brenes. 1995. Elementos de climatología: Su aplicación didáctica a Costa Rica. Capítulo 3. Instrumentación de medición meteorológica y redes de observación. 97

SAGARPA, CONACYT, COFUPRO. 2010. *Demandas del sector 2010-2*. Recuperado el 10 de Septiembre de 2013, de http://www.conacyt.gob.mx/fondos/FondosSectoriales/SAGARPA/201002/Demandas-Especificas_SAGARPA-2010-2.pdf

Samaniego, E., M.R. Quesada, M. de la Rosa, J. Munguía, A. Benavides, L. Ibarra. 2002. Producción de plántula de tomate y pimiento con cubiertas de polietileno reflejante para disminuir la temperatura en invernadero. *Agrociencia*, 36(3), 305-318

Sánchez, P. 2010. Efecto de la época de transplante sobre la acumulación de Luteína en inflorescencias en cempaxúchil (*Tagetes erecta L.*)

Sethi, V., and S. Sharma. 2008. Survey and evaluation of heating technologies for worldwide agricultural greenhouse applications. *Solar Energy*, 832–859.

Shibles R. 1987. *Crop physiology*. Iowa, USA, Iowa StateUniversity. 214 p.

SMN. 2010. *Normales climatológicas Jiquilpan de Juárez*. Obtenido de Sistema meteorológico nacional. Recuperado el 10 Octubre de 2013, de <http://smn.cna.gob.mx/climatologia/Normales5110/NORMAL16197.TXT>

Té, G. E. 2008. Producción orgánica de tres variedades de pepino bajo condiciones de invernadero. Tesis profesional. Universidad Autónoma de Querétaro. Santiago de Querétaro, Querétaro.

Teitel, M., I. Segal, A. Shklyar, M. Barak. 1999. A Comparison between Pipe and Air Heating Methods for Greenhouses. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 259—273.

Trade Map. Trade Statistics for International Business Development. Recuperado el 7 de Septiembre de 2014, de <http://www.trademap.org>

Valera, D. L., F. D. Molina, A. J. Álvarez. 2008. Ahorro y eficiencia energética en invernaderos. IDEA, serie "Ahorro y Eficiencia Energética en la Agricultura". No. 7. 71 p.

Vidal, J.L.; R. Budeguer; G. Alderete; E. Romero; J. Rodríguez Rey; M.E. Amado y S. Bas Nas. 2010. Influencia del régimen térmico en el desarrollo foliar del pimiento (*Capsicum annuum L.*) cultivado en campo. *Horticultura Argentina*, 29(69), 13-17.