

EVALUACIÓN DE UN SISTEMA DE CONTROL AUTOMATIZADO DE MANEJO CLIMÁTICO EN RELACIÓN AL MANEJO TRADICIONAL DE INVERNADERO EN EL CENTRO EXPERIMENTAL COTA COTA

Evaluation of an automated climate management control system in relation to traditional greenhouse management at Cota Cota Experimental Center

Javier Ariel Ticona Pari¹; Magali García Cárdenas²; Roberto Miranda Casas³

RESUMEN

La producción en invernadero especialmente en zonas altas en la agricultura boliviana está muy alejada de su potencial que puede ser aprovechado en la medida que se adecuen otros determinantes como el control de las variables climáticas que actúan sobre la producción. Así, un buen funcionamiento del sistema requiere adecuar las consignas de control. Para este propósito se utilizó un invernadero convencional de cubierta de lámina flexible, un invernadero móvil Pachamama de cubierta de placas rígidas y la variedad de rábano Crimson Giant. Se tomaron variables de estudio microclimáticas y agronómicas. Para su análisis se recurrió a la estadística descriptiva e inferencial (prueba t de Student). El trabajo se realizó en dos temporadas o fases: en la primera fase se evaluó comparativamente en ambos invernaderos, el control microclimático en forma manual únicamente y en la segunda fase se evaluó comparativamente el control manual en el invernadero convencional con el control automatizado en el invernadero móvil Pachamama. Los resultados muestran que el invernadero móvil Pachamama bajo un control microclimático de manejo manual, se alcanzaron los valores más elevados de radiación solar, temperatura, déficit de presión de vapor en comparación al invernadero convencional desencadenando mayores condiciones de estrés, y bajo un control microclimático de manejo automático, se alcanzaron los valores más bajos de radiación solar, temperatura, déficit de presión de vapor. Por lo cual es factible llevar adelante un manejo de control microclimático automático, lo cual permite aprovechar al máximo el potencial que ofrecen los invernaderos.

Palabras clave: invernaderos, control, manual, automático, microclima.

ABSTRACT

The greenhouse production especially in high areas in Bolivian agriculture is far removed from its potential that can be exploited to the extent that other determinants are adapted such as the control of climatic variables that act on production. Thus, a good functioning of the system requires adapting the control instructions. For this purpose, a conventional flexible sheet roof, a Pachamama greenhouse, rigid plate roof greenhouse and the Crimson Giant radish variety were used. Microclimatic and agronomic study variables were taken. For its analysis, descriptive and inferential statistics were used (Student's t-test). The work was carried out in two seasons or phases: in the first phase it was evaluated comparatively in both greenhouses, the microclimatic control manually only and in the second phase the manual control in the conventional greenhouse was compared comparatively with the automated control in the greenhouse Pachamama mobile. The results show that the Pachamama mobile greenhouse under a manually controlled microclimatic control, the highest values of solar radiation, temperature, vapor pressure deficit were achieved compared to the conventional greenhouse triggering higher stress conditions, and under a microclimatic control of automatic operation, the lowest values of solar radiation, temperature, vapor pressure deficit were reached. Therefore, it can be done carrying out an automatic microclimatic control operation, which allows to maximize the potential offered by greenhouses.

Keywords: greenhouses, control, manual, automatic, microclimate.

¹ Facultad de Agronomía, Universidad Mayor de San Andrés, Bolivia. javier10jatp@gmail.com

² Docente, Facultad de Agronomía, Universidad Mayor de San Andrés, Bolivia. magalygc1@yahoo.es

³ Docente, Facultad de Agronomía, Universidad Mayor de San Andrés, Bolivia. roberto_neco@hotmail.com

INTRODUCCIÓN

La agricultura boliviana se encuentra en búsqueda permanente de opciones de manejo tecnológicas que permitan luchar contra las restricciones climáticas del país, especialmente en zonas altas, cuya restricción principal es la helada. Ante ello, se ha planteado el uso de carpas solares y/o invernaderos, los que no logran un total éxito ni aceptación masiva. Uno de los problemas enfrentados es la acumulación de calor sensible que pueda alcanzar magnitudes que sofocan a la planta y ralentizan la fotosíntesis.

Ante este problema, se requiere plantear soluciones tecnológicamente factibles que ayuden a aprovechar al máximo las ventajas que ofrecen los invernaderos. Con el fin de conocer las posibilidades de uso de estas estructuras y las condiciones climáticas desarrolladas y el efecto del manejo se plantearon los siguientes objetivos: 1) evaluar el efecto del control microclimático en dos invernaderos manejados ambos de manera manual comparados con un manejo manual y automático simultáneo, 2) cuantificar el impacto de elevadas temperaturas sobre el rendimiento de hortalizas de producción típicas en la zona de estudio y 3) explorar opciones de manejo automático de invernaderos para reducir los niveles de estrés inducidos por la modificación microclimática.

MATERIALES Y MÉTODOS

Ubicación de la zona de estudio

El presente estudio fue realizado en Centro Experimental Cota Cota, dependiente de la Facultad de Agronomía de la Universidad Mayor de San Andrés (UMSA), Bolivia. Su situación geográfica es 16° 32' 09" latitud sur y 68° 03' 48.7" longitud oeste, a una altitud de 3447 m s.n.m.

Metodología

Los ensayos se realizaron bajo condiciones ambientales de dos invernaderos: 1) invernadero Convencional e 2) invernadero móvil Pachamama. Con superficie, estructura, material de cerramiento y superficie de ventilación diferentes, que fueron: 1) superficie de 693 m², multitúnel (trimodular), cubierta de lámina flexible fabricado con polietileno de baja densidad (PEBD) con un espesor de 250 µm y una superficie de ventilación de 14.27% en las ventanas laterales y 2) superficie de 59.72 m², cuya geometría

de la cubierta fue túnel, de placas rígidas, fabricado con resina de poliéster y reforzado con fibra de vidrio, espesor promedio 4000 µm, con porcentaje de superficie de ventilación del 2.37% en las ventanas cenitales y 0.56% en las ventanas laterales.

El trabajo se realizó en dos temporadas o fases: en la primera fase se evaluó comparativamente en ambos invernaderos, el control microclimático en forma manual únicamente (18 marzo a 22 de abril de 2017) la apertura de las ventanas laterales y cenitales se realizó por percepción térmica y disponibilidad del personal aproximadamente abriendo las ventanas a las 10 h 00 min y cerrando a las 17 h 00 min además en los invernaderos Convencionales en el Centro Experimental Cota Cota emplearon pantallas de sombreo por lo cual se mantuvo su uso y se evaluó los parámetros microclimáticos bajo esas condiciones de manejo.

En la segunda fase se evaluó comparativamente el control manual en el invernadero Convencional con el control automatizado en el invernadero móvil Pachamama (8 de septiembre a 10 de octubre de 2017). El control automatizado fue compuesto por el mecanismo de piñón y cadena (ventanas cenitales), mecanismo biela manivela (ventanas laterales), ventilador, extractor y el ordenador de gestión climática. De esta manera si la temperatura sobrepasaba el límite térmico pre-establecido, dicho ordenador, automáticamente activó la orden de apertura de ventanas laterales (32°C), cenitales (35°C), inicio del extractor (37°C) y ventilador (40°C), para reducir la temperatura. Asimismo en el Centro Experimental Cota Cota en invierno y primavera en el invernadero Convencional no emplearon pantallas de sombreo.

En cada invernadero se instaló una estación meteorológica; y una estación a cielo abierto a una altura de 1.5 m de la superficie, para medir la radiación solar, temperatura de aire, humedad relativa y velocidad de viento, además se instaló en cada invernadero una estación de temperatura y humedad de suelo. Las variables meteorológicas evaluadas fueron: radiación solar; temperatura máximas, mínimas, promedio de aire; humedad relativa máximas, mínimas y promedio; presión real de vapor y de saturación; velocidad de viento promedio; temperatura de suelo y humedad de suelo solo en la segunda fase.

Durante los mismos periodos (en las dos fases) en los dos invernaderos se cultivó rábano (*Raphanus sativus*

L. cv. Crimson Giant). Con el fin de controlar el efecto de variación de la fertilidad del suelo en el cultivo se procedió a homogenizar el suelo, extrayendo un volumen consecuente de una superficie de 3.00 m x 3.00 m x 0.30 m, del área destinada al trabajo de ambos invernaderos. Consecutivamente después de la mezcla se reintegró la mitad del volumen total de suelo a cada uno de los sitios de donde se extrajo. La siembra en ambos invernaderos fue directa, en surcos y por golpe, a una densidad de siembra de 11.1 kg ha⁻¹, marco de plantación 15 x 10 cm (distancia entre surcos de 15 cm y entre plantas 10 cm, sin pasillos), número de semillas por golpe 1 y profundidad de 1 cm.

Durante la primera fase, en ambos invernaderos se aplicó similar cantidad de compost con activador yogurt en una tasa de 1 kg m⁻² (total de 9 kg por invernadero), el sistema de riego usado fue el goteo localizado, con un caudal de 0.71 L h⁻¹, distribuido entre cinta de goteo 0.30 m y entre emisor 0.30 m con un tiempo de riego de 00 h 40 min e intervalo entre riegos días lunes, miércoles y viernes; esta es la distancia estándar, tiempo e intervalo de riego de trabajo en el Centro Experimental Cota Cota, por lo que se mantuvo su uso (riego manual).

Una vez concluida la primera fase, durante la segunda fase, se procedió a realizar un análisis químico de suelo en el invernadero móvil Pachamama y en el invernadero Convencional, con el fin de determinar la oferta de nutrientes para luego subsanar el desequilibrio químico nutricional mediante la aplicación de una dosis exacta de fertilizante para cada invernadero. En esta fase el riego en el invernadero móvil Pachamama fue aplicado en base al contenido de agua del suelo, activado y desactivado automáticamente la válvula eléctrica por medio de un controlador que funcionó en base a la información provista por los sensores de humedad del suelo y en el invernadero Convencional el riego fue la misma de la metodología de la primera fase.

Las variables agronómicas medidas fueron: porcentaje de emergencia, altura de planta, cobertura vegetal, área foliar, índice de área foliar, peso de raíz, peso de hojas y sus rendimientos y porcentaje de materia seca. El porcentaje de emergencia se determinó mediante conteos diarios de las plántulas emergidas de toda el área experimental (9 m²), durante 14 días desde el momento de la siembra (600 semillas sembradas), la cobertura vegetal se evaluó cada tres días mediante

fotografías tomadas a una altura de 2m (resolución de 16.1 MP), de 4 muestras aleatorias de 1 m² de superficie cada una. Se estimó la cobertura mediante un proceso digital de imágenes con el software Cobcal 2. Las restantes variables agronómicas fueron evaluadas al final del ciclo de cultivo, mediante 9 plantas representativas en cada invernadero. La altura de planta se determinó con una regla, el área foliar mediante fotografía y el software Sigma Scan Pro 5.0 previamente haciendo una limpieza de la imagen con Photoshop Adobe CS5. El índice de área foliar (IAF) se calculó utilizando la Ecuación 1.

$$IAF = \frac{\text{Área foliar}}{\text{Área del suelo}} \quad (1)$$

El peso de raíz y hojas se determinó con una balanza analítica y la materia seca con una estufa a 65°C durante 72 horas.

Para evaluar el efecto del control microclimático se empleó la estadística descriptiva y para cuantificar el impacto de las elevadas temperaturas sobre el cultivo se empleó la estadística inferencial prueba t de Student a una significancia de 0.05%.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Primera fase evaluación microclimático

La radiación solar transmitida al invernadero móvil Pachamama en promedio fue de 25.9% (8.04 MJ m⁻² día⁻¹) superior a la radiación solar que atraviesa la cubierta del invernadero Convencional 17.7% (5.51 MJ m⁻² día⁻¹) en comparación a cielo abierto 31.08 MJ m⁻² día⁻¹. Similarmente en un estudio análogo en el Centro Experimental Cota Cota, Butrón (2017) determinó la radiación solar diaria recibida al interior del invernadero Convencional, resultando en promedio 39.3% de radiación solar. Al respecto Bot (1983), Zabeltitz (1999), Soriano et al. (2004) citado por Castilla (2005), menciona que la transmisividad está en función del material de cerramiento, elementos estructurales, equipos del invernadero que limitan la radiación al sombrear, condiciones climáticas (nubosidad principalmente), la posición del sol en el cielo (que dependerá de la fecha y hora del día y la latitud del lugar), de la geometría de la cubierta del invernadero y de su orientación. Por tanto esta baja transmisividad del invernadero Convencional se debe al empleo de pantallas de sombreado, método que es empleado en esos periodos por la Estación Experimental Cota Cota para evitar quemaduras de plantas. También se

observó que la temperatura máxima promedio de aire del invernadero móvil Pachamama (43.55°C) fue superior a la del invernadero Convencional (33.45°C) y a cielo abierto se registró 19.14°C.

Asimismo se reportó temperaturas máximas que alcanzaron los 54.30°C en el invernadero móvil Pachamama y 42.00°C en el invernadero Convencional, ya que lo máximo registrado a cielo abierto fue de 25.00°C. En relación a las temperaturas mínimas promedio se observó que no hubo diferencias significativas en los invernaderos, siendo prácticamente iguales (invernadero móvil Pachamama 10.10°C e invernadero Convencional 9.55°C), en ambos casos son temperaturas superiores a lo registrado a cielo abierto (7.03°C). Castilla (2005) menciona que la temperatura del aire dentro del invernadero es el resultado del balance energético del abrigo. Por otra parte Alpi y Tognoni (1991) indican que la temperatura de un invernadero dependen en su mayor parte del efecto invernadero que nace de la radiación solar y de la impermeabilidad de los materiales de recubrimiento a las radiaciones calóricas.

Por otra parte, se pudo observar que las curvas de los invernaderos presentaron un comportamiento irregular a diferencia a cielo abierto que es regular (Figura 1). Esta irregularidad explica la deficiencia del manejo manual por parte del personal en las aperturas de las ventanas para reducir las altas temperaturas por medio de la ventilación natural. Si bien en el invernadero Convencional se observó un manejo ideal de la temperatura de aire al abrir las ventanas a la hora cuando empieza a sobrepasar el óptimo de cultivo, esto no sucedió con los demás invernaderos ya que el personal de forma manual abre las ventanas en serie en todos los invernaderos y no en paralelo provocando durante ese intervalo de tiempo de abrir la primera ventana a la última sobrepasar los óptimos de temperatura.

Se observó en el invernadero móvil Pachamama que no es suficiente la apertura de las ventanas laterales y cenitales para una reducción de la temperatura de aire. Si bien al abrir las ventanas reduce la temperatura, pero esta va incrementando cuando el sol se acerca al punto más alto sobre el horizonte debido a que llega mayor energía a la superficie terrestre, lo que es consistente con la latitud geográfica. La evolución de la temperatura en relación con la intensidad de radiación solar también se observa en el invernadero

Convencional aunque con menos significancia debido a que emplean pantallas de sombreo reduciendo la intensidad de radiación solar. Este efecto varía según las condiciones concretas de transmisión y absorción de la cubierta a las radiaciones y según las condiciones de ventilación y estanqueidad del invernadero (Castilla, 2005).

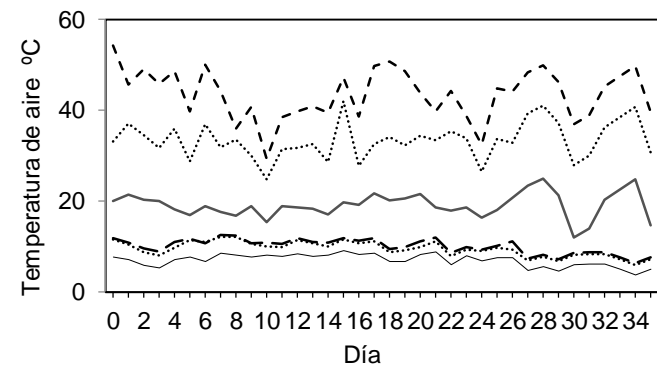
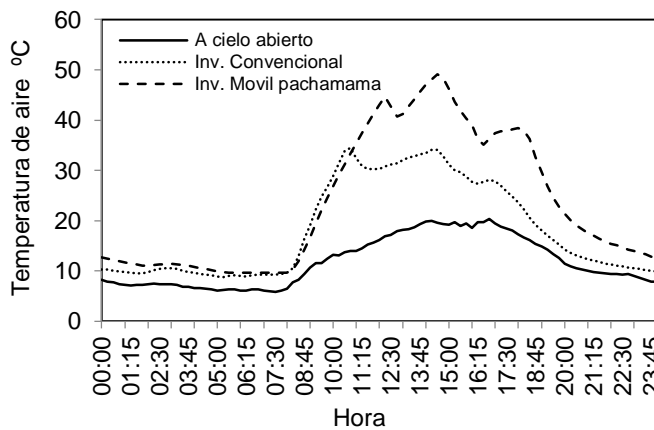
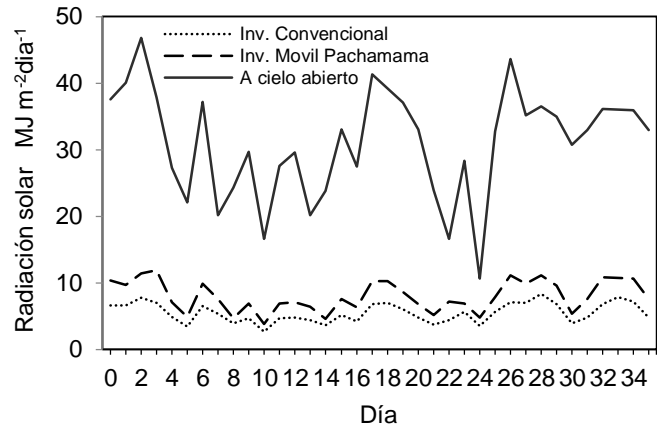
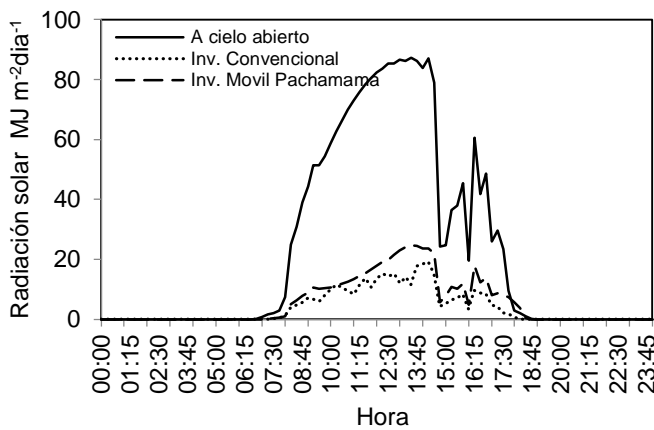
En cuanto a la velocidad del viento determinada a cielo abierto en promedio durante todo el ciclo de cultivo fue de 0.1ms^{-1} , valor que representa a una localidad con muy baja velocidad del viento y 0.0ms^{-1} en el invernadero móvil Pachamama tanto como en el invernadero Convencional. Day et al. (1991) citado por Castilla (2005) indica que el cerramiento con la película de cubierta y laterales del invernaderos implica una reducción del viento respecto al exterior. Asimismo Bartzanas et al. (2002) menciona que la velocidad del viento es un factor importante, ya que la distribución de la temperatura y la humedad relativa sigue el patrón de flujo de aire. Mientras Bailey (2006) citado por Thihe (2014) indica que una distribución no uniforme de la velocidad del aire conduce a una temperatura y humedad relativa no uniforme. De esta forma desde el punto de vista de la ventilación natural los invernaderos con ventanas laterales no son eficientes tanto en el invernadero Convencional e invernadero móvil Pachamama, ya que no es significativo la renovación del aire por medio del flujo natural (viento), más bien el proceso ocurre por efusión, cuando el aire (conjunto de gases) que está bajo presión por la elevadas temperaturas del invernadero, escapa del interior del invernadero hacia el exterior, por medio de una abertura (ventanas laterales). Al respecto de los valores medios de la humedad relativa en el invernadero móvil Pachamama fueron de 64.6%, valor menor a la del invernadero Convencional que fue de 67.4% y a cielo abierto 71.1%. Kittas y Bartzanas (2007) citado por Thihe (2014) señala que uno de los objetivos del cultivo en invernadero es aumentar la humedad relativa, lo cual al disminuir su volumen mediante pantallas de sombreo y sin ventanas cenitales (invernadero Convencional) es mayor la humedad relativa.

La presión de saturación de vapor promedio durante el ciclo de cultivo en el invernadero móvil Pachamama fue de 5.22 KPa una presión mayor al invernadero Convencional 3.23 KPa y a cielo abierto fue 1.62 KPa, ya que es directamente proporcional la presión de saturación de vapor con la temperatura. Igualmente la FAO (2002) menciona que durante el día por efecto de la calefacción solar, la humedad absoluta del aire

aumenta puesto que la apertura de los estomas hace aumentar la transpiración, al mismo tiempo la humedad relativa puede disminuir con el aumento de la temperatura. Así, bajo estos escenarios la presión real de vapor promedio en el invernadero móvil Pachamama fue de 3.33 KPa, mayor al invernadero Convencional presentando 2.17 KPa y a cielo abierto se registró 1.15 KPa, lo cual se explica esta mayor presión real de vapor en el invernadero móvil Pachamama por efecto de menor área de ventilación (2.93%) ya que IDAE (2008) recomienda como mínimo 20 al 30%. Además Boulard et al. (1997) menciona que la renovación del aire permite modificar la humedad atmosférica, evacuando el aire interior del invernadero, enriquecido de vapor de agua por transpiración de las plantas y evaporación del suelo.

Por tanto los resultados presentados aquí, muestran que en el invernadero móvil Pachamama existe mayor déficit de presión de vapor (DVP) en promedio es 1.89 KPa a diferencia del invernadero Convencional su DVP

es 1.06 KPa y a cielo abierto 0.47 KPa de DVP. La temperatura promedio del suelo determinado en invernadero móvil Pachamama (18.71°C) fue superior al invernadero Convencional (16.87°C), esta diferencia se debe a la transmisión de calor de las altas temperaturas del aire hacia el suelo. Según Porta, López-Acevedo y Roquero (1994) el calor puede ser transmitido de un compartimiento a otro del suelo o intercambiando con la atmosfera. Además se observa como la temperatura del suelo va disminuyendo durante los días, esto debido a la época del año, a la etapa de transición de solsticio de verano a equinoccio de otoño ya que Castilla (2005) indica que en lo equinoccios ninguno de los dos polos tiene inclinación hacia el sol, aparte de que la amplitud térmica del suelo es menor a comparación de la amplitud térmica de la temperatura del aire de los invernadero. Castilla (2005) declara que el suelo en sus capas superficiales actúa como volante de inercia térmico y estacional, calentándose y enfriándose mucho más despacio que el aire circundante.



..... T. max Inv. Convencional T. min Inv. Convencional
 - - - - T. max Inv. Movil Pachamama - - - - T. min Inv. Movil Pachamama
 _____ T. max A cielo abierto _____ T. min A cielo abierto

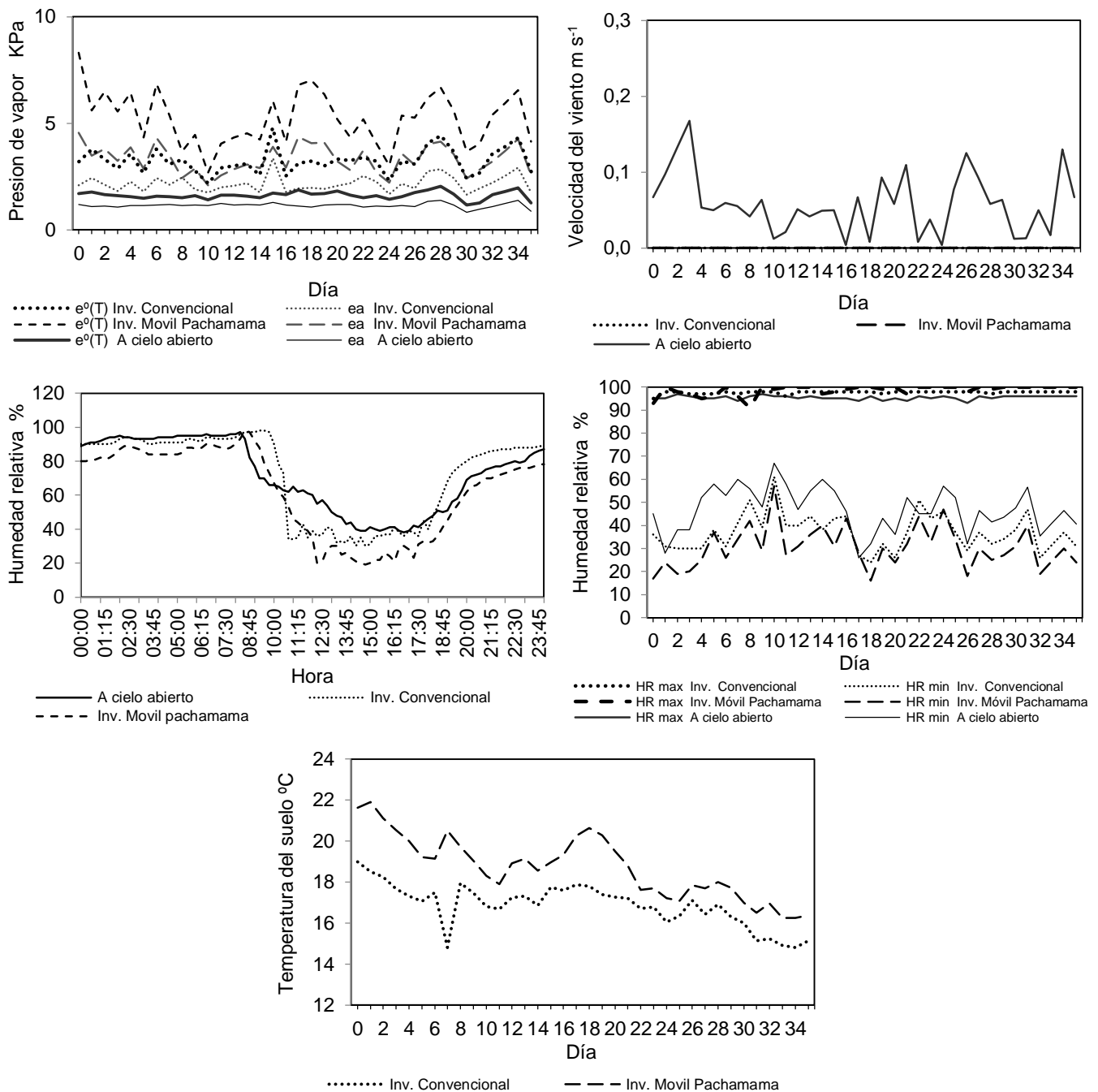


Figura 1. Comportamiento diario y horario de las variables microclimáticas, en el invernadero Convencional, invernadero móvil Pachamama y a cielo abierto, desde el 18 de marzo hasta 22 de abril de 2017 (Primera fase).

Segunda fase evaluación microclimática

En esta segunda fase la radiación solar transmitida al invernadero móvil Pachamama en promedio fue de 22.5% (8.50 MJ m⁻² día⁻¹) no tan diferente a la primera fase (25.9%), esta pequeña diferencia se debe a la posición del sol referente a las estaciones del año, según Soriano et al. (2004) citado por Castilla (2005) la transmisibilidad está en función de varios factores entre ellas se debe a la posición del sol que dependerá

de la fecha, hora del día, latitud y el lugar. Asimismo la radiación solar que es transmitida por la cubierta del invernadero Convencional fue 45.5% (17.22 MJ m⁻² día⁻¹), demostrando que al emplear pantallas de sombreo reduce la intensidad de radiación a 17.7% (5.51 MJ m⁻² día⁻¹) disipando un total de 31.1% por el empleo de pantallas de sombreo. Mientras el valor medido a cielo abierto para el periodo evaluado presenta una media de 37,73 MJ m⁻² día⁻¹ superior a la radiación solar de la primera fase. En cambio en esta

fase la temperatura máxima promedio del invernadero móvil Pachamama (37.61°C) fue menor a la primera fase y a la del invernadero Convencional (39.71°C), y lo registrado a cielo abierto fue 20.16°C .

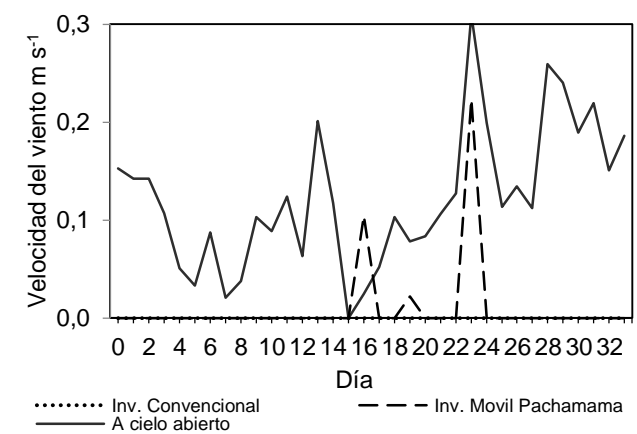
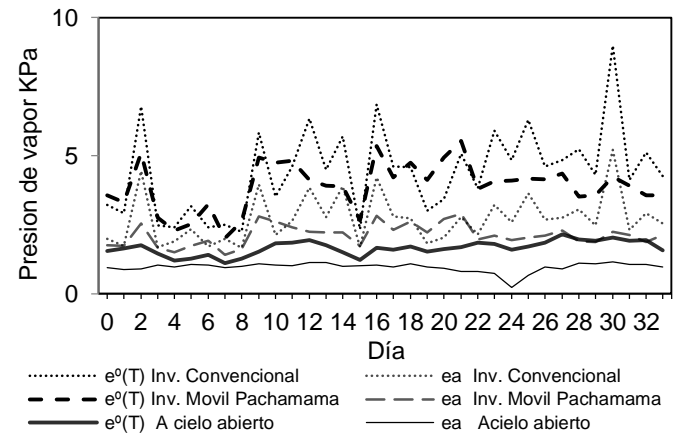
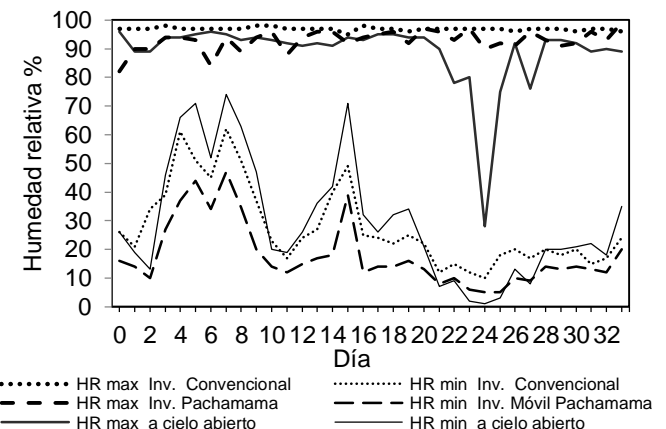
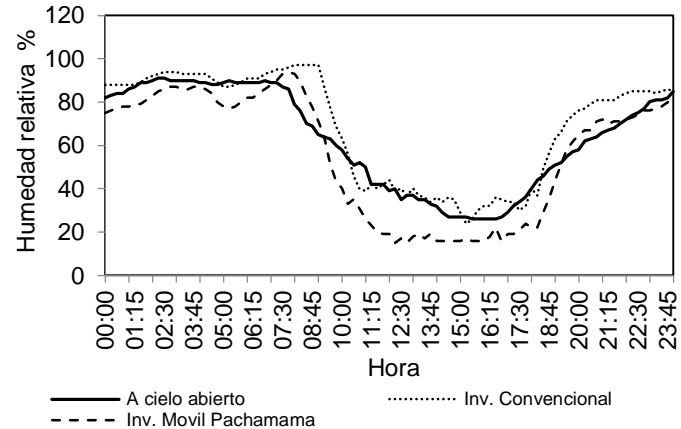
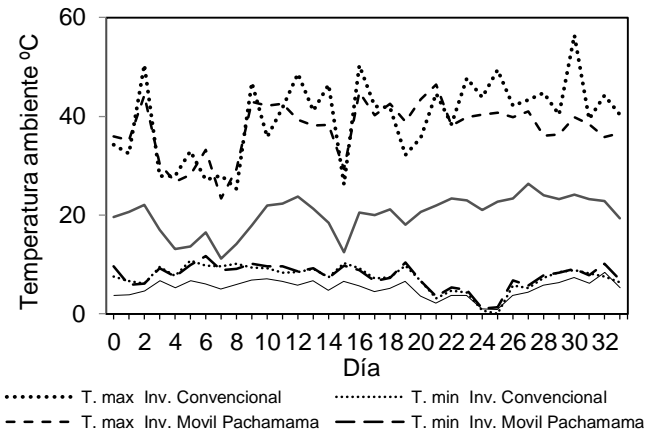
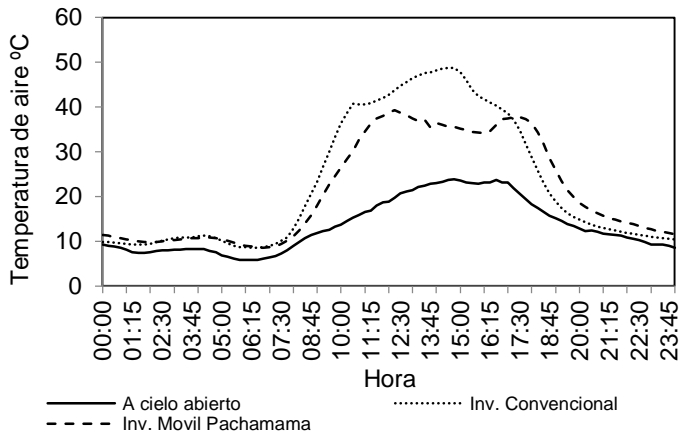
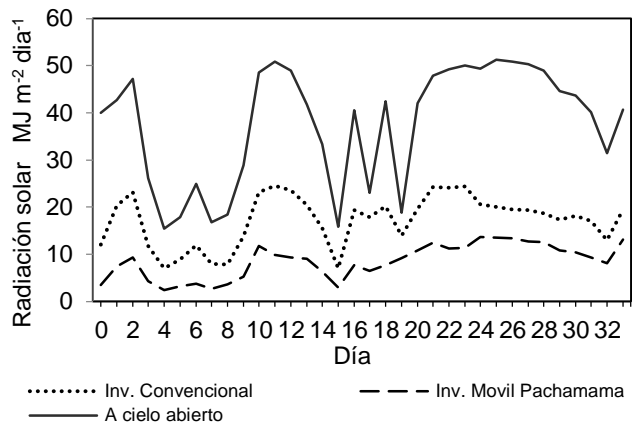
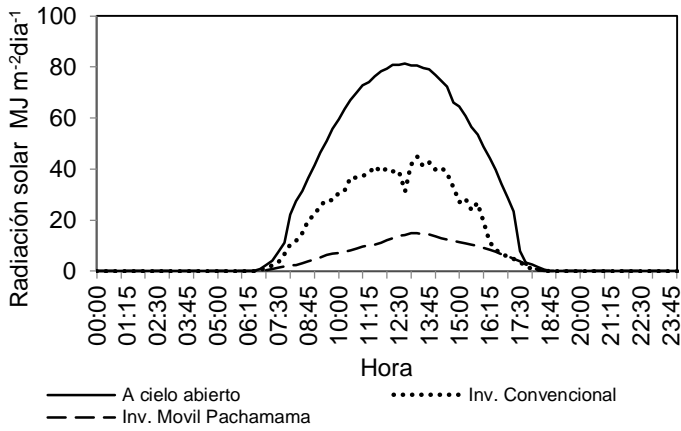
Asimismo en algunos días, la temperatura máxima registrado alcanzo los 46.40°C en el invernadero móvil Pachamama mucho menor a la primera fase (54.30°C), mientras en el invernadero Convencional se registraron en algunos días generalmente domingos temperaturas máximas de 56.40°C . Nuevamente revisando sus temperaturas mínimas promedio de aire se observó que no hubo diferencias significativas en los invernaderos, siendo prácticamente iguales, registrando el invernadero móvil Pachamama 7.69°C inferior a la primera fase y el invernadero Convencional 7.39°C inferior a la primera fase, pero en ambos invernaderos las temperaturas mínimas fueron superiores a la temperaturas mínimas promedio a cielo abierto 5.22°C .

Observando las curvas de las temperaturas de los invernaderos presentan un comportamiento irregular, esta irregularidad explica dos circunstancias de manejo diferentes: La primera circunstancia se explica el invernadero móvil Pachamama por la eficiencia del manejo automatizado de las aperturas de las ventanas laterales, cenitales, extractor y ventilador, como se vio en la primera fase no era suficiente solo ventanas laterales y cenitales por lo cual se adicionó una ventilación forzada mediante el empleo de un extractor de aire y un ventilador manteniendo la temperatura alrededor del óptimo del cultivo (35°C) con pequeños desfases. Mientras en la segunda circunstancia se explica en el invernadero Convencional por la deficiencia del manejo manual (tradicional) por parte del personal en las aperturas de las ventanas laterales, si bien se abren las ventanas laterales a la hora cuando empieza a sobrepasar el óptimo de cultivo, esta no es suficiente para mantener a la temperatura óptima, aunque reduzca la temperatura esta se va incrementando a medida que el sol se acerca al punto más alto sobre el horizonte debido a que llega mayor energía a la superficie terrestre lo que no ocurrió en la primera fase debido al empleo de pantallas de sombreo. En cuanto a la velocidad del viento determinado a cielo abierto en promedio durante todo el ciclo de cultivo es 0.1ms^{-1} , permaneciendo igual que

en la primera fase y 0.0ms^{-1} en los invernaderos. De manera que los valores medios de la humedad relativa en el invernadero móvil Pachamama fueron de 55.4%, mientras que en el invernadero Convencional fue de 62.3% y a cielo abierto 59.4%.

La presión de saturación de vapor promedio en el invernadero móvil Pachamama fue de 3.89 KPa inferior a la primera fase y menor al invernadero Convencional 4.43 KPa, asimismo a cielo abierto presentó 1.65 KPa. Bajo estos mismos escenarios la presión real de vapor promedio en el invernadero móvil Pachamama fue de 2.12 KPa menor a la primera fase, también menor al invernadero Convencional presentando 2.71 KPa y a cielo abierto se registró 0.96 KPa. Por tanto en el invernadero móvil Pachamama existe en promedio mayor déficit de presión de vapor (DVP) 1.77 KPa a comparación del invernadero Convencional su DVP fue 1.72 KPa, y a cielo abierto 0.69 KPa.

La temperatura de suelo determinado en invernadero móvil Pachamama fue inferior al invernadero Convencional, obteniendo en promedio durante el ciclo de cultivo 16.66°C (menor que la primera fase), mientras el invernadero Convencional alcanzó un promedio 18.45°C . El contenido hídrico del suelo del invernadero móvil Pachamama fue adecuadamente mojado, no sobrepasando el rango usual de déficit hídrico de mayor a 100 cbar para suelos pesados (IRROMETER, 2017). Simultáneamente el suelo del invernadero Convencional se observó que estuvo adecuadamente mojado hasta el día 13 (jueves) y no el día 14 (viernes), pero el cronograma de riego en el Centro Experimental Cota Cota fue tres días a la semana (lunes, miércoles y viernes), justamente el día viernes sobrepaso el límite de 100 cbar, este mismo comportamiento se vió reflejado el día 17 (lunes) regando al día siguiente. También el día 24 (lunes) no se rego con el suficiente volumen de agua, ya que el día siguiente (martes) la tensión sobrepaso los 150 cbar como también paso lo mismo el día 31 (lunes). Nuevamente se comprueba que el riego de manera manual o tradicional es ineficiente no por los días establecidos por el Centro Experimental Cota Cota ya que se comprobó que están adecuadamente calculados a los intervalos de riego requerido, sino por no respetar en algunos días esos intervalos programados y el tiempo de riego.



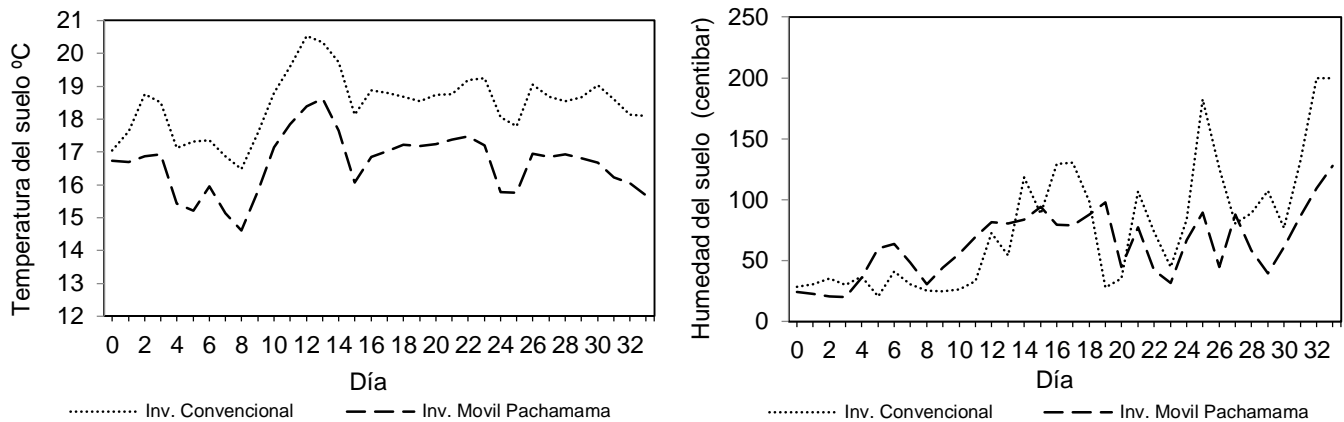


Figura 2. Comportamiento diario y horario de las variables microclimáticas, en el invernadero Convencional, invernadero móvil Pachamama y a cielo abierto, desde el 8 de septiembre hasta 10 de octubre de 2017 (Segunda fase).

Primera fase análisis agronómico

Las características físicas del suelo indican que presenta una textura franco arcillo limoso (FYL) de densidad aparente 1.25 g cm^{-3} , según el estadístico prueba t de student los valores de emergencia en el día 3, no muestra diferencias significativas entre los invernaderos. Sin embargo, a partir del día 4 hasta el día 11 existen diferencias estadísticas en la emergencia en el invernadero Convencional y el invernadero móvil Pachamama, llegando al día 12 a 14 no hay diferencias significativas entre los dos invernaderos. El invernadero móvil Pachamama ha sido más eficiente en el porcentaje de emergencia del rábano obteniendo mayor al 50% de emergencia el día 4 a comparación del invernadero Convencional llega a ser mayor al 50% de emergencia el día 6. Berninger (1981) citado por Castilla (2005) indica que temperaturas menores limitan el crecimiento de algunos cultivos. Por tanto el mayor porcentaje de emergencia en el menor tiempo en el invernadero móvil Pachamama se debe a que registró temperaturas máximas.

La altura de planta en el invernadero móvil Pachamama en promedio fue 43.9 cm mayor al invernadero Convencional que alcanzó una altura promedio de 38.0 cm, de igual manera fue superior el porcentaje de cobertura vegetal en el invernadero móvil Pachamama, presentando un suelo cubierto en un 50% el día 21 y el día 25 en el invernadero Convencional, el área foliar es superior en el invernadero Convencional en promedio 626.0 cm^2 y el invernadero móvil Pachamama 512.4 cm^2 . Bakker (1991) señala que la humedad del aire influye en el tamaño de hoja por ejemplo humedades altas inducen

hojas más grandes en pepino, lo que no ocurre en tomate. Sin embargo el rábano si fue influenciado por las humedades altas ya que el invernadero Convencional se obtuvo la mayor humedad relativa.

En cuanto al peso de raíz, fue superior en el invernadero Convencional registrando en promedio 27.4 g, y en el invernadero móvil Pachamama en promedio 23.1 g. La FAO (2002) si el cultivo dispone de suficiente luz, la temperatura es el factor de mayor influencia en las tasas de crecimiento y desarrollo de las plantas, sin embargo temperaturas superiores a 50°C desnaturalizan las proteínas. Por lo cual elevadas temperaturas en el invernadero móvil Pachamama afecto al peso de la raíz obteniendo menor peso. Mientras en el peso de hoja las diferencias estadísticamente no fueron significativas, registrando en el invernadero Convencional en promedio 35.6 g y en el invernadero móvil Pachamama 39.0 g. Aviles (1992), explica que el mayor crecimiento de la parte aérea en el invernadero es por falta de luz, entonces esta leve superioridad aunque no significativa en el invernadero móvil Pachamama es debido a la falta de luz ya que también se presentó mayor altura de planta y mayor cobertura vegetal.

El porcentaje de materia seca de raíz en el invernadero móvil Pachamama fue 5.0% a diferencia en el invernadero Convencional se registró menor porcentaje de materia seca de 4.1%, Por otro lado, en el porcentaje de materia seca de las hojas, nuevamente resulta superior en el invernadero móvil Pachamama presentando 5.2% de materia seca a diferencia del invernadero Convencional se registró menor porcentaje de materia seca de 4.1%. Castilla (2005) menciona que bajos niveles de intensidad de radiación en la mayoría

de las plantas inducen a menor peso seco, lo cual se confirma para el cultivo de rábano, pues el invernadero Convencional registro menor radiación solar y

presentó menor porcentaje de materia seca en la raíz y en las hojas.

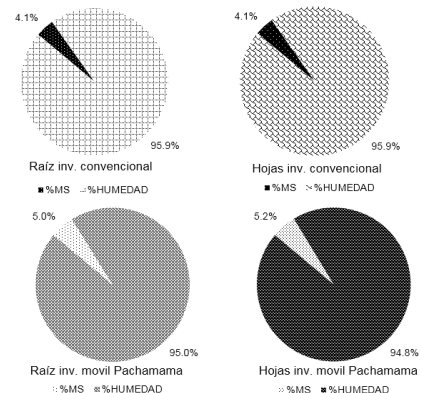
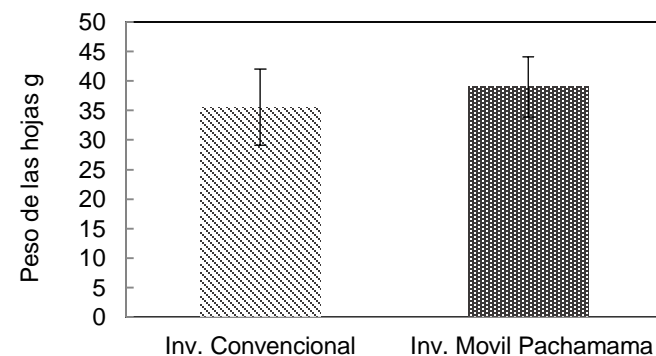
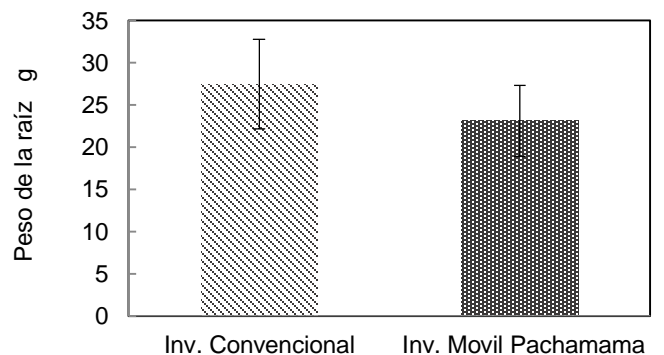
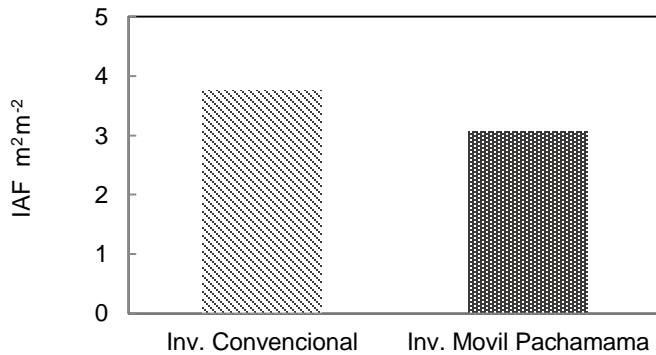
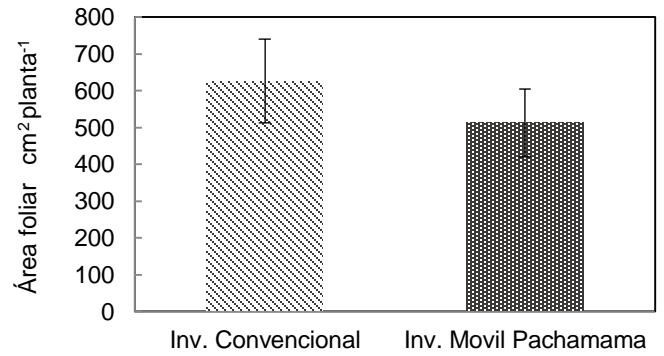
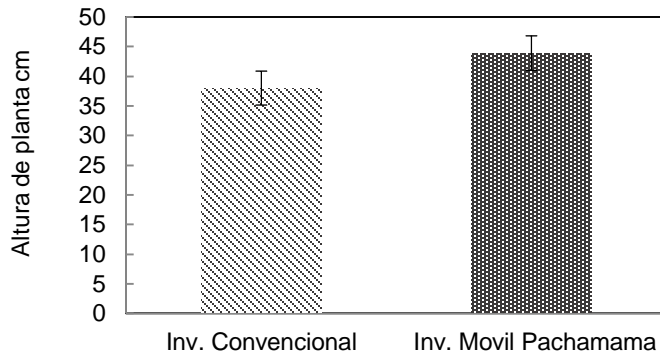
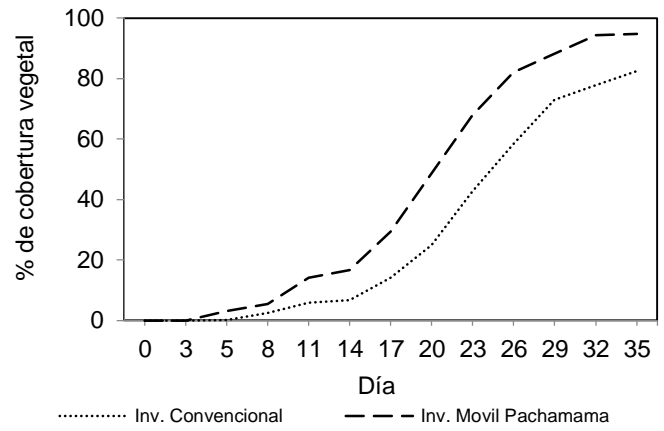
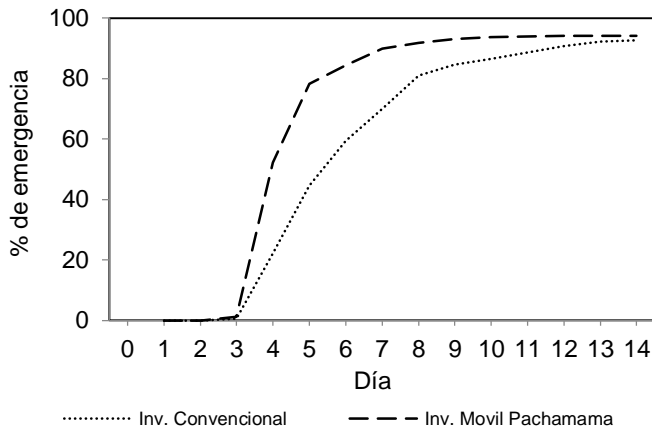


Figura 3. Comparación de las variables agronómicas del *Raphanus sativus* L. cv. Crimson Giant, en el invernadero Convencional y en el invernadero móvil Pachamama (Primera fase).

Segunda fase análisis agronómico

Las características químicas de suelo después de la cosecha de la primera fase indican que se absorbieron en mayor cantidad en el invernadero Convencional. Para lo cual hay una variación en los nutrientes en ambos invernaderos, para subsanar esta diferencia y no se vea afectado por esta variable, se aplicó una dosis del fertilizante orgánico (compost con activador de yogurt), para el invernadero móvil Pachamama que fue 1.427 kg m^{-2} (en total 12.847 kg por 9 m^2) y la dosis para el invernadero Convencional fue 1.433 kg m^{-2} (en total 12.894 kg por 9 m^2).

El comportamiento del porcentaje de emergencia alcanzó aproximadamente el 50% de emergencia el día 4 en el invernadero Convencional y más del 50% el día 6 en el invernadero móvil Pachamama. Simultáneamente se observa que a mayor temperatura de aire, el porcentaje de emergencia tiende a ser mayor (invernadero Convencional), confirmando los resultados de la primera fase en invernadero móvil Pachamama que obtuvo mayor porcentaje de emergencia por tener mayor temperatura de aire, afirmando lo expuesto por Berninger (1989) de que temperaturas inferiores limitan el crecimiento de algunos cultivos. Igualmente Porta et al., (1994) afirman que los procesos físicos, químicos y biológicos de un ecosistema están fuertemente influenciados por la temperatura, además indica la importancia del calor del suelo, debido a su papel como factor de control de la intensidad de germinación. Además se observa que hubo un descenso en el porcentaje de emergencia el día 9 en el invernadero Convencional, debido a una plaga de pulgones que afectó durante 3 días con la consecuencia de la pérdida de plántulas emergidas (se empleó Cypertrin 250 EC para el control del pulgón).

En cuanto a la altura de planta en el invernadero móvil Pachamama fue superior en promedio es 26.1 cm y en el invernadero Convencional fue 18.1cm. Castilla (2005) indica que bajos niveles de intensidad de radiación inducen a hojas pequeñas (con mayor índice longitud/anchura), entrenudos más largos, (...), ya que el invernadero móvil Pachamama fue la que menor radiación solar registro. Sin duda, la variable que influye en el mayor crecimiento de altura de planta en el invernadero móvil Pachamama es la luz, pues se valida lo expuesto por Aviles (1992) que indica que mayor crecimiento de la parte aérea en el invernadero es por falta de luz. Con respecto al menor crecimiento

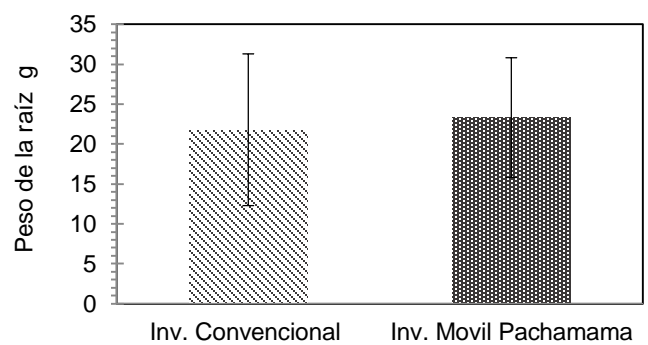
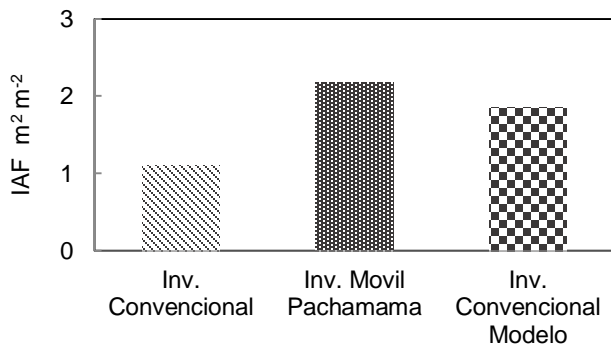
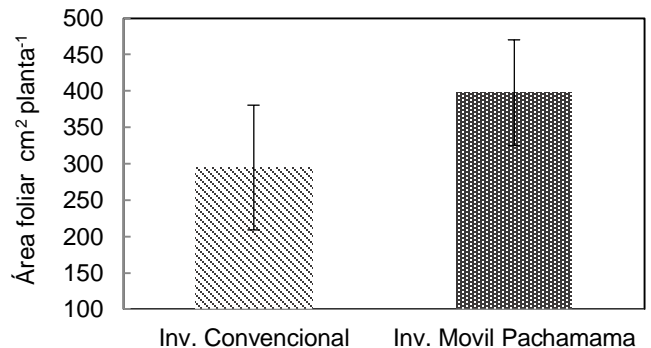
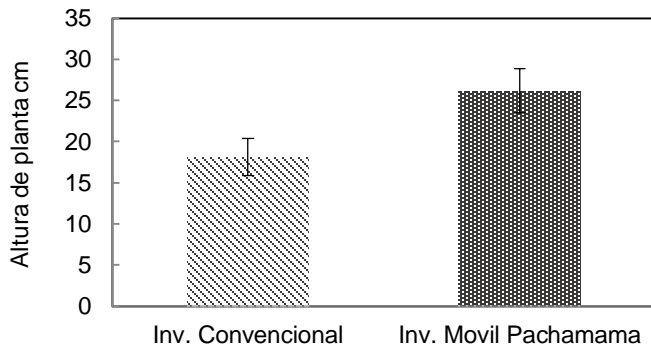
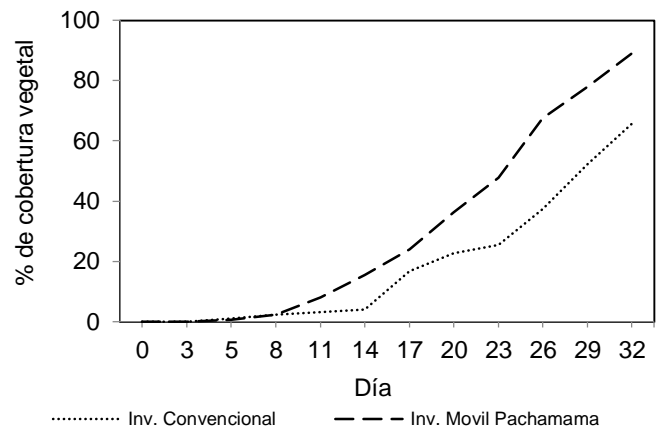
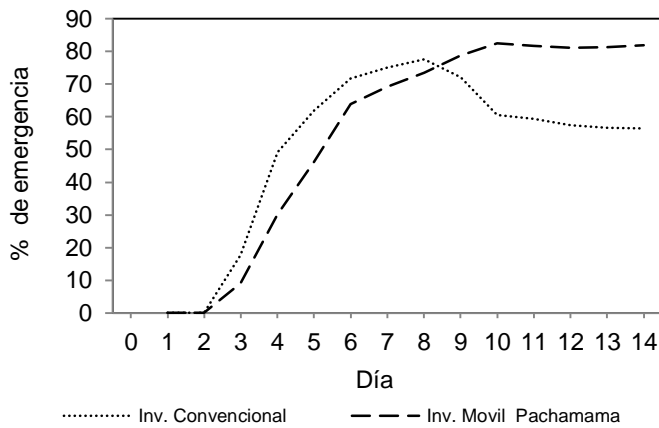
de altura de planta en el invernadero Convencional se debe a la temperatura, afirmación en base a lo citado por la FAO (2002) que indica si el cultivo dispone de suficiente luz, la temperatura es el factor de mayor influencia en las tasas de crecimiento, por lo que el promedio de temperatura máxima fue de 39.71°C y en algunos días se registró 56.40°C .

En la cobertura vegetal, el mayor porcentaje se percibió en el invernadero Convencional hasta el día 8, aunque estadísticamente no significativo, pero es un antecedente que demuestra que altas temperaturas influyen en el crecimiento foliar comprobando lo expuesto en la primera fase. Por otro lado fue superior el área foliar en el invernadero móvil Pachamama (397.7 cm^2) en comparación con el invernadero Convencional (294.4 cm^2). En esta segunda fase se observó que no influyó la humedad del aire, pues en el invernadero móvil Pachamama fue la que menor humedad relativa registró (55.4%) y obtuvo mayor área foliar en comparación del invernadero Convencional que fue 62.3% de humedad relativa y menor área foliar, negando que mayor humedad relativa en el rábano induce mayor área foliar en base a lo expuesto por Bakker, (1991). Por tanto la variable que influye en el área foliar son las temperaturas máximas, ya en la primera fase el invernadero móvil Pachamama presentó la menor área foliar y su temperatura fue muy superior al invernadero Convencional, en esta segunda fase la temperatura máxima del invernadero móvil Pachamama fue menor al invernadero Convencional y obtuvo el mayor área foliar.

El IAF fue 2.17 en el invernadero móvil Pachamama superior al IAF del invernadero Convencional 1.11. Sin embargo sino se presentaría problemas de pulgones en el invernadero Convencional esta alcanzaría un IAF de 1.85. En cambio al peso de raíz no hay diferencias significativas, estadísticamente son iguales, siendo en promedio en el invernadero móvil Pachamama de 23.3 g y en el invernadero Convencional 21.8 g. Por lo cual no solamente afecto las elevadas temperaturas en el invernadero móvil Pachamama al peso de la raíz en la primera fase sino también la deficiencia de luz pues se comprueba esto bajo los resultados de la segunda fase donde la temperatura se mantuvo en los rangos óptimos pero de igual manera su peso de raíz fue bajo, asimismo en el invernadero Convencional presentó suficiente luz pero la temperaturas elevadas que se registró provoco que su peso de raíz sea bajo lo cual no paso en este invernadero en la primera fase.

En cuanto al peso de las hojas muestra diferencias significativas, siendo mayor el peso en el invernadero móvil Pachamama con un promedio de 23.4 g referente al invernadero Convencional registrando en promedio 12.2 g, demostrando en esta segunda fase nuevamente el efecto de la luz, induciendo mayor peso de hojas en el invernadero móvil Pachamama a comparación del invernadero Convencional. Asimismo se determinó mayor porcentaje de materia seca (%MS) de raíz en el invernadero móvil Pachamama con 4.0% y menor %MS en el invernadero Convencional de 3.0%. Por otro lado, en el %MS de las hojas, resulta inferior en el invernadero móvil Pachamama

presentando 5.8% a diferencia del invernadero Convencional se registra 6.7%. De esta manera no se ratifica lo afirmado en la primera fase en base a lo expuesto por Castilla (2005) que menciona que bajos niveles de intensidad de radiación en la mayoría de las plantas inducen a menor peso seco, pues el invernadero móvil Pachamama registro menor radiación solar y presento mayor %MS en la raíz pero a la vez en la hoja presentó menor %MS. Por tanto el mayor %MS en la raíz se debe a la insuficiente cantidad de luz, ya que es la única variable que se mantuvo en las dos fases de evaluación, y el mayor %MS en las hojas se debe a las temperaturas elevadas.



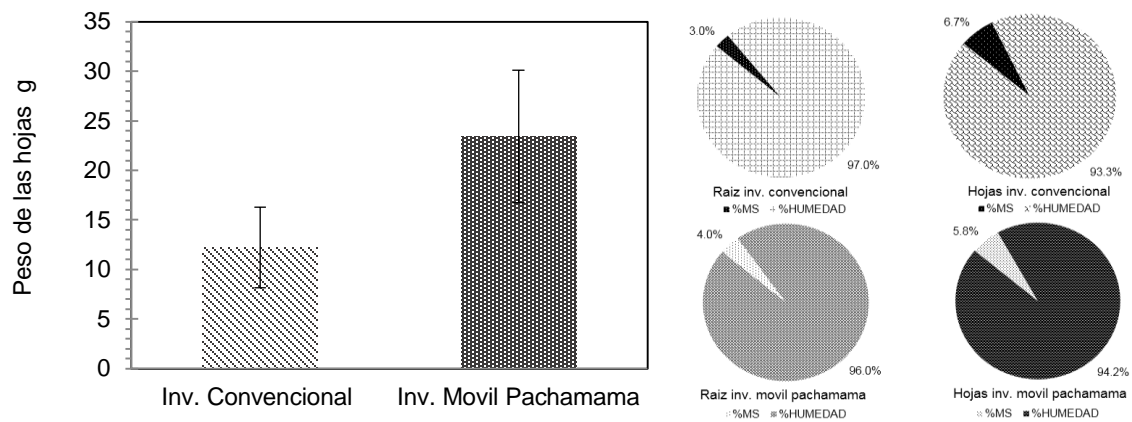


Figura 4. Comparación de las variables agronómicas del *Raphanus sativus* L. cv. Crimson Giant, en el invernadero Convencional y en el invernadero móvil Pachamama (Segunda fase).

CONCLUSIONES

Es factible llevar adelante un manejo de control microclimático automático, lo cual permite aprovechar al máximo el potencial que ofrecen los invernaderos, ya que durante el primer ciclo de cultivo bajo un control microclimático de manejo manual (primera fase) se desencadenaron mayores condiciones de estrés, lo que explicaría el mayor tiempo de desarrollo del cultivo de rábano (35 días), desarrollando más el peso en hojas y altura de planta. Mientras en el segundo ciclo de cultivo (segunda fase) con un manejo de control microclimático automático se redujo el tiempo de cosecha (33 días), se incrementó el peso de la raíz reduciendo la altura de planta y peso de hojas aunque en esta segunda fase el invernadero móvil Pachamama de manejo automático y el invernadero Convencional de manejo manual no existan diferencias estadísticas en el peso de la raíz debido a un factor importante como la intensidad lumínica.

Elevadas temperaturas del aire y suelo permiten mayor porcentaje de emergencia y en el menor tiempo, temperaturas elevadas reducen el crecimiento del área foliar y el peso de la raíz, el mayor crecimiento de la parte aérea en el invernadero es por falta de luz y el menor peso de raíz es por deficiencia de luz.

El manejo automatizado de las pantallas de sombreado es primordial y debe ser manejado de dos formas: mediante sensores de temperatura que activen el cierre de las pantallas de sombreado cuando las temperaturas sobrepasen los 35°C y la otra es mediante un reloj digital que active el cierre de las pantallas de sombreado a las 17 h 00 min y se pueda abrir a las 08 h 30 min lo cual permitirá reducir el

espacio del invernadero permitiendo mayor retención de humedad y por efecto será mayor la temperatura y menor será el daño por heladas.

Se debe tener un buen diseño de ventilación lo cual implica tener aberturas de ventanas laterales y ventanas cenitales con una superficie como mínimo del 20 al 30% y de este porcentaje 1/3 debe ocupar las ventanas cenitales, de esta forma la automatización de las ventanas laterales y cenitales será más efectiva para reducir los niveles de estrés inducidos por la modificación microclimática. Se recomienda seleccionar un material de cubierta para el invernadero que permita el mayor paso de luz y retenga la radiación infrarroja.

BIBLIOGRAFÍA

- Alpi, A., & Tognoni, F. 1991. Cultivo en Invernadero (Mundi-Pren). Madrid, España.
- Aviles, D. L. 1992. Evaluación Comparativa de Sistemas Microclimáticos para la Producción de Hortalizas En la Provincia Pacajes-Departamento de La Paz. Universidad Mayor de San Andrés.
- Bakker, J. C. 1991. Analysis of humidity effects on growth and production of glasshouse fruit vegetables. Wageningen Agricultural University.
- Bartzanas, T., Boulard, T., & Kittas, C. 2002. Numerical simulation of the airflow and temperature distribution in a tunnel greenhouse equipped with insect-proof screen in the openings. *ELSEVIER*, 34, 207–221.

Berninger, E. 1989. Cultures florales de serre en zone méditerranéenne française: Eléments climatiques et physiologiques (INRA). París.

Boulard, T., Feuilloley, P., & Kittas, C. 1997. Natural Ventilation Performance of Six Greenhouse and Tunnel Types. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 67(4), 249–266.

Butrón, C. 2017. Calibración de la ecuación FAO Penman-Monteith para calcular la evapotranspiración de referencia (ET_o) en condiciones de invernadero en el centro experimental de Cota Cota. Universidad Mayor de San Andrés.

Castilla, N. 2005. Invernaderos de plástico tecnología y manejo (Mundi-Pren). Almería, España.
FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura). 2002. El cultivo protegido en clima mediterráneo. Roma.

IDAE. 2008. Ahorro y Eficiencia Energética en Invernaderos (IDAE). Madrid, España. Retrieved from http://www.idae.es/uploads/documentos/documentos_10995_Agr07_AyEE_en_invernaderos_A2008_9e4c63f5.pdf

IRROMETER. 2017. Irrrometer Soil Moisture Basics. Retrieved from <http://www.irrometer.com/basicssp>
Porta, J., López-Acevedo, M., & Roquero, C. 1994. Edafología para la agricultura y el medio ambiente (p. 799). Madrid, España.

Thipe, E. L. 2014. Comparative Analysis of two Greenhouse Microclimates in the Sub-humid Climate of South Africa. University of KwaZulu-Natal.

Artículo recibido en: 16 de septiembre 2019
Aceptado en: 13 de diciembre 2019