

UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS
FACULTAD DE AGRONOMÍA
CARRERA DE INGENIERÍA AGRONÓMICA



TESIS DE GRADO

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

POR: JAVIER ARIEL TICONA PARI

LA PAZ – BOLIVIA

2019

UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS
FACULTAD DE AGRONOMÍA
CARRERA DE INGENIERÍA AGRONÓMICA

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

*Tesis de Grado presentado como requisito
Parcial para optar el Título de Licenciado en
Ingeniería Agronómica.*

JAVIER ARIEL TICONA PARI

Asesor:

Ing. Ph.D. Magali García Cárdenas
Ing. Ph.D. Roberto Miranda Casas

Tribunal Examinador:

Ing. M.Sc. Hugo Bosque Sánchez
Ing. M.Sc. Medardo Wilfredo Blanco Villacorta

Aprobada

Presidente Tribunal Examinador:

La Paz – Bolivia

2019

DEDICATORIA

A Dios.

Por haberme permitido llegar hasta este punto

A mis padres

Abraham y Albertina

AGRADECIMIENTOS

- Al Centro Experimental Cota Cota-Facultad de Agronomía-UMSA, por el apoyo brindado en infraestructura, materiales y equipos para que se haga realidad este proyecto de tesis.
- A la empresa CONDOR SRL. (Compañía internacional de franquicias), por el donativo del invernadero móvil “Pachamama” a la facultad de agronomía, para realizar estudios científicos.
- Agradecer infinitamente a mis asesores: Ing. Ph.D. Magali García Cárdenas y Ing. Ph.D. Roberto Miranda Casas por el apoyo y principalmente por haberme brindado la oportunidad de iniciar mi proceso de formación profesional en el área de climatología y edafología, es un placer contar con su apoyo y seguir aprendiendo cada día más de su conocimiento.
- A mis revisores Ing. M.Sc. Hugo Bosque Sánchez y Ing. M.Sc. Wilfredo Blanco Villacorta por su orientación y colaboración en la revisión del presente documento.
- Al Ing. M.Sc. Estanislao Poma Loza director del Centro Experimental Cota Cota, por su apoyo incondicional que hicieron posible la realización del proyecto de investigación.
- Al Ing. Eber Candia y Alexandro Becerra por haberme iniciado en este mundo de la automatización y la mecanización.
- Al Ing. Humberto Ortuño por motivarme a seguir en este rubro.
- A mí querida familia, mis padres Abraham y Albertina, y mis hermanos Santos, Héctor, Henry, Ximena, Wilma y Eddy por apoyarme siempre.

ÍNDICE GENERAL

1	INTRODUCCIÓN	1
1.1	Justificación	1
1.2	Objetivos	2
1.2.1	Objetivo general	2
1.2.2	Objetivos específicos	2
2	REVISION BIBLIOGRAFICA	3
2.1	Concepto de invernadero	3
2.1.1	Objetivo del cultivo protegido.	3
2.2	Agricultura protegida en el mundo	4
2.2.1	Invernadero tradicional o convencional	5
2.2.2	Invernaderos automatizados	5
2.3	Agricultura protegida en Bolivia	5
2.3.1	Automatización de invernaderos en Bolivia	7
2.4	Clima espontáneo en invernaderos	7
2.4.1	Efecto invernadero	8
2.5	Microclima del invernadero	9
2.5.1	Radiación solar	9
2.5.2	Temperatura	10
2.5.2.1	Temperatura del aire	10
2.5.2.2	La temperatura del suelo	11
2.5.3	Humedad relativa	12
2.5.4	Dióxido de carbono (CO ₂)	13
2.5.5	Velocidad del viento	13
2.6	Ventilación y refrigeración en invernaderos.	14
2.6.1	Sistemas de ventilación natural	14
2.6.2	Sistemas de ventilación forzada	15
2.7	Sistema de regulación y control	17
2.8	La gestión climática por ordenador	17
2.8.1	Controles efectuados por los sistemas de regulación en invernadero	17

2.8.2	Sistema de control digital	18
2.9	El ordenador de gestión climática	18
3	LOCALIZACION	20
3.1	Ubicación geográfica	20
3.2	Fisiografía y características edáficas	21
3.3	Característica climática	21
3.4	Vegetación	21
4	MATERIALES Y METODOS	22
4.1	Materiales	22
4.1.1	Invernaderos	22
4.1.1.1	Invernadero Convencional	22
4.1.1.2	Invernadero móvil "PACHAMAMA"	22
4.1.2	Equipos de recolección de información.....	23
4.1.2.1	Estación meteorológica.....	23
4.1.2.2	Estación de temperatura y humedad del suelo	23
4.1.3	Mecanismo electromecánico automatizado	24
4.1.3.1	Mecanismo de piñón y cadena «Ventanas cenitales»	24
4.1.3.2	Mecanismo Biela-manivela «Ventanas laterales».....	24
4.1.3.3	Ventilador.....	25
4.1.3.4	Extractor.....	25
4.1.3.5	Ordenador de gestión climática	25
4.1.4	Material vegetal.....	25
4.1.5	Material Sistema de riego	26
4.2	Metodología	26
4.2.1	Evaluación del efecto de control microclimático en dos invernaderos manejados ambos de manera manual	26
4.2.1.1	Invernadero móvil Pachamama	26
4.2.1.2	Invernadero Convencional	26
4.2.1.3	Instalación de estación meteorológica	27
4.2.1.4	Instalación de estaciones de temperatura y humedad de suelo	27
4.2.1.5	Recolección de datos meteorológicos y de suelo	27

4.2.1.6	Variables meteorológicas evaluadas	27
4.2.2	Evaluación del efecto de control microclimático en dos invernaderos manejados ambos de manera manual y automática	28
4.2.2.1	Invernadero móvil Pachamama	28
4.2.2.2	Invernadero Convencional	29
4.2.2.3	Instalación de la estación de temperatura y humedad de suelo	29
4.2.2.4	Variables meteorológicas evaluadas	29
4.2.3	Cuantificación del impacto de elevadas temperaturas sobre el rendimiento de hortalizas de producción típicas en la zona de estudio	30
4.2.3.1	Primera fase (en fecha 2017-03-18 a 2017-04-22).....	30
4.2.3.1.1	Manejo de cultivo.....	30
4.2.3.2	Variables agronómicas.....	32
4.2.3.3	Segunda fase (en fecha 2017-09-08 a 2017-10-10).	34
4.2.3.3.1	Manejo de cultivo.....	34
4.2.3.3.2	Variables agronómicas	35
4.2.4	Análisis estadístico	36
4.2.4.1	Evaluación del efecto de control microclimático en dos invernaderos manejados ambos de manera manual comparados con un manejo manual y automático simultaneo	36
4.2.4.2	Cuantificación del impacto de elevadas temperaturas sobre el rendimiento de hortalizas de producción típicas en la zona de estudio	36
5	RESULTADOS Y DISCUSION	37
5.1	Evaluación del efecto de control microclimático en dos invernaderos manejados ambos de manera manual	37
5.1.1	Radiación solar	37
5.1.2	Temperatura de aire	39
5.1.3	Viento.....	42
5.1.4	Humedad relativa (HR)	43
5.1.5	Presión de saturación y presión real de vapor	45
5.1.6	Temperatura del suelo	47

5.2	Evaluación del efecto de control microclimático en dos invernaderos manejados ambos de manera manual y automática	48
5.2.1	Radiación solar	48
5.2.2	Temperatura de aire	49
5.2.3	Viento.....	52
5.2.4	Humedad relativa (HR)	53
5.2.5	Presión de saturación y presión real de vapor	56
5.2.6	Temperatura del suelo	57
5.2.7	Humedad del suelo	58
5.3	Cuantificación del impacto de las elevadas temperaturas sobre el rendimiento de hortalizas de producción típicas en la zona de estudio.....	60
5.3.1	Primera fase (en fecha 2017-03-18 a 2017-04-22)	60
5.3.1.1	Análisis físico del suelo	60
5.3.1.2	Porcentaje de Emergencia.....	61
5.3.1.3	Altura de planta.....	62
5.3.1.4	Cobertura vegetal	63
5.3.1.5	Área foliar.....	64
5.3.1.6	Índice de área foliar (IAF).....	65
5.3.1.7	Peso de raíz y rendimiento	66
5.3.1.8	Peso de hojas y rendimiento.....	67
5.3.1.9	Materia seca (MS).....	68
5.3.2	Segunda fase (en fecha 2017-09-8 a 2017-10-11)	69
5.4	Análisis químico de suelo.....	69
5.4.1.1	Porcentaje de Emergencia del rábano.....	70
5.4.1.2	Altura de planta.....	72
5.4.1.3	Cobertura vegetal	73
5.4.1.4	Área foliar.....	75
5.4.1.5	Índice de área foliar (IAF).....	76
5.4.1.6	Peso de la raíz y rendimiento.....	77
5.4.1.7	Peso de hojas y rendimiento.....	79
5.4.1.8	Materia seca (MS).....	80

6	CONCLUSIONES	81
7	RECOMENDACIONES.....	83
8	BIBLIOGRAFIA.....	84

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Limite térmico pre-establecido para apertura y cierre de mecanismos de control de altas temperaturas.	28
Tabla 2. Limite pre-establecidos de humedad del suelo para riego.	29
Tabla 3. Propiedades químicas del agua de tanque (agua de pozo).	31
Tabla 4. Propiedades físicas del suelo de los invernaderos.....	60
Tabla 5. Propiedades químicas del suelo en el invernadero móvil Pachamama.....	69
Tabla 6. Propiedades químicas del suelo en el invernadero Convencional.	69
Tabla 7. Propiedades físico y químico de compost con activador Yogurt.	69

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Valores de temperatura máxima y mínima semanal a cielo abierto y bajo condiciones de invernadero, elabora por Butrón (2017).	11
Figura 2. Ubicación del Centro Experimental Cota Cota. (Fuente: Elaboración propia).	20
Figura 3. Comportamiento de la radiación solar en el invernadero Convencional, invernadero móvil Pachamama y a cielo abierto, desde 18 de marzo hasta 22 de abril de 2017 (Primera fase).	38
Figura 4. Evolución de la intensidad de radiación solar horaria en el invernadero Convencional, invernadero móvil Pachamama y a cielo abierto, día 20 de marzo de 2017 (Primera fase).	38
Figura 5. Evolución horaria de la temperatura de aire en el invernadero Convencional, invernadero móvil Pachamama y a cielo abierto, día 20 de marzo de 2017 (Primera fase).	40
Figura 6. Comportamiento diarios de las temperaturas de aire máximas y mínimas, en el invernadero Convencional, invernadero móvil Pachamama y a cielo abierto, desde 18 de marzo hasta 22 de abril de 2017 (Primera fase).	41
Figura 7. Comportamiento diarios de velocidad del viento, en el invernadero Convencional, invernadero móvil Pachamama y a cielo abierto, desde 18 de marzo hasta 22 de abril de 2017 (Primera fase).	43
Figura 8. Evolución horaria de la humedad relativa del aire en el invernadero Convencional, invernadero móvil Pachamama y a cielo abierto, día 20 de marzo de 2017 (Primera fase).	44
Figura 9. Comportamiento diarios de la humedad relativa máximas y mínimas, en el invernadero Convencional, invernadero móvil Pachamama y a cielo abierto, desde 18 de marzo hasta 22 de abril de 2017 (Primera fase).	45

- Figura 10. Comportamiento diario de presión de saturación de vapor $e_o(T)$ y presión real de vapor (e_a), en el invernadero Convencional, invernadero móvil Pachamama y a cielo abierto, desde 18 de marzo hasta 22 de abril de 2017 (Primera fase)..... 46
- Figura 11. Comportamiento diario de la temperatura del suelo en el invernadero Convencional, invernadero móvil Pachamama y a cielo abierto, desde 18 de marzo hasta 22 de abril de 2017 (Primera fase)..... 47
- Figura 12. Comportamiento de la radiación solar en el invernadero Convencional, invernadero móvil Pachamama y a cielo abierto, desde 8 de septiembre hasta 10 de octubre de 2017 (Segunda fase) 48
- Figura 13. Evolución de la intensidad de radiación solar horaria en el invernadero Convencional, invernadero móvil Pachamama y a cielo abierto, día 20 de septiembre de 2017 (Segunda fase)..... 49
- Figura 14. Evolución horaria de la temperatura de aire en el invernadero Convencional, invernadero móvil Pachamama y a cielo abierto, día 20 de septiembre de 2017 (Segunda fase)..... 50
- Figura 15. Comportamiento diarios de las temperaturas de aire máximas y mínimas, en el invernadero Convencional, invernadero móvil Pachamama y a cielo abierto, desde 8 de septiembre hasta 10 de octubre de 2017 (Segunda fase). 52
- Figura 16. Comportamiento diarios de velocidad del viento, en el invernadero Convencional, invernadero móvil Pachamama y a cielo abierto, desde 8 de septiembre hasta 10 de octubre de 2017 (Segunda fase). 53
- Figura 17. Evolución horaria de la humedad relativa del aire en el invernadero Convencional, invernadero móvil Pachamama y a cielo abierto, día 20 de septiembre de 2017 (Segunda fase)..... 54

- Figura 18. Comportamiento diarios de la humedad relativa máximas y mínimas, en el invernadero Convencional, invernadero móvil Pachamama y a cielo abierto, desde 8 de septiembre hasta 10 de octubre de 2017 (Segunda fase). 55
- Figura 19. Comportamiento diario de presión de saturación de vapor $e^{\circ}(T)$ y presión real de vapor (e_a), en el invernadero Convencional, invernadero móvil Pachamama y a cielo abierto desde 8 de septiembre hasta 10 de octubre de 2017 (Segunda fase). 57
- Figura 20. Comportamiento diario de la temperatura del suelo en el invernadero convencional, invernadero móvil Pachamama y a cielo abierto desde 8 de septiembre hasta 10 de octubre de 2017 (Segunda fase). 58
- Figura 21. Comportamiento diario de la humedad del suelo bajo riego, mediante dos sistemas de manejo: automático (invernadero móvil Pachamama) y tradicional o manual (invernadero Convencional), desde 8 de septiembre hasta 10 de octubre de 2017 (Segunda fase). 60
- Figura 22. Evolución del Porcentaje de emergencia del *Raphanus sativus* L. cv. Crimson Giant, en el invernadero Convencional y en el invernadero móvil Pachamama evaluados en 14 días (Primera fase). 61
- Figura 23. Comparación de altura de planta y su desviación estándar del *Raphanus sativus* L. cv. Crimson Giant, en el invernadero Convencional y en el invernadero móvil Pachamama (Primera fase). 62
- Figura 24. Evolución de la cobertura vegetal del *Raphanus sativus* L. cv. Crimson Giant, en el invernadero Convencional y en el invernadero móvil Pachamama evaluados en 35 días (Primera fase). 63
- Figura 25. Comparación de área foliar y su desviación estándar del *Raphanus sativus* L. cv. Crimson Giant, en el invernadero Convencional y en el invernadero móvil Pachamama (Primera fase). 64

- Figura 26. Comparación IAF del *Raphanus sativus* L. cv. Crimson Giant en el invernadero Convencional y en el invernadero móvil Pachamama (Primera fase)..... 65
- Figura 27. Comparación del peso de la raíz y su desviación estándar del *Raphanus sativus* L. cv. Crimson Giant, en el invernadero Convencional y en el invernadero móvil Pachamama (Primera fase)..... 66
- Figura 28. Comparación del peso de las hojas y su desviación estándar del *Raphanus sativus* L. cv. Crimson Giant, en el invernadero Convencional y en el invernadero móvil Pachamama (Primera fase). 67
- Figura 29. Porcentaje de materia seca y humedad en órganos de la raíz y hojas del *Raphanus sativus* L. cv. Crimson Giant, en el invernadero Convencional y en el invernadero móvil Pachamama (Primera fase). 68
- Figura 30. Evolución del Porcentaje de emergencia del *Raphanus sativus* L. cv. Crimson Giant en el invernadero Convencional y en el invernadero móvil Pachamama evaluados en 14 días (Segunda fase). 71
- Figura 31. Comparación de altura de planta y su desviación estándar del *Raphanus sativus* L. cv. Crimson Giant, en el invernadero Convencional y en el invernadero móvil Pachamama (Segunda fase). 73
- Figura 32. Evolución de la cobertura vegetal del *Raphanus sativus* L. cv. Crimson Giant en el invernadero Convencional y en el invernadero móvil Pachamama evaluados en 32 días (Segunda fase). 74
- Figura 33. Comparación de área foliar y su desviación estándar del *Raphanus sativus* L. cv. Crimson Giant, en el invernadero Convencional y en el invernadero móvil Pachamama (Segunda fase). 75

- Figura 34. Comparación IAF del *Raphanus sativus* L. cv. Crimson Giant en el invernadero Convencional y en el invernadero móvil Pachamama (Segunda fase)..... 76
- Figura 35. Comparación del peso de la raíz y su desviación estándar del *Raphanus sativus* L. cv. Crimson Giant, en el invernadero Convencional y en el invernadero móvil Pachamama (Segunda fase). 78
- Figura 36. Comparación del peso de las hojas y su desviación estándar del *Raphanus sativus* L. cv. Crimson Giant, en el invernadero Convencional y en el invernadero móvil Pachamama (Segunda fase). 79
- Figura 37. Porcentaje de materia seca y humedad en órganos de la raíz y hojas del *Raphanus sativus* L. cv. Crimson Giant, en el invernadero Convencional y en el invernadero móvil Pachamama (Segunda fase). 80

INDICE DE ANEXOS

Anexo 1. Primera fase manejo manual: Datos meteorológicos en el invernadero móvil Pachamama.....	89
Anexo 2. Primera fase manejo manual: Datos meteorológicos en el invernadero Convencional.....	90
Anexo 3. Primera fase: Datos meteorológicos a cielo abierto.	91
Anexo 4. Primera fase: Datos de temperatura de suelo en dos invernaderos.	92
Anexo 5. Segunda fase manejo automático: Datos meteorológicos del invernadero móvil Pachamama.	93
Anexo 6. Segunda fase manejo manual: Datos meteorológicos del invernadero Convencional.....	94
Anexo 7. Segunda fase: Datos meteorológicos a cielo abierto.	95
Anexo 8. Segunda fase manejo automático y manual: Datos de temperatura y humedad del suelo en dos invernaderos.	96
Anexo 9. Primera fase manejo manual: Análisis descriptivo de la variable Radiación solar en dos invernaderos y a cielo abierto.....	97
Anexo 10. Primera fase manejo manual: Análisis descriptivo de temperatura máximo y mínimo de aire en dos invernaderos y a cielo abierto.	97
Anexo 11. Primera fase manejo manual: Análisis descriptivo de la velocidad del viento en dos invernaderos y a cielo abierto.....	98
Anexo 12. Primera fase manejo manual: Análisis descriptivo de la Humedad relativa (HR) máximo y mínima en dos invernaderos y a cielo abierto.....	98
Anexo 13. Primera fase manejo manual: Análisis descriptivo de la presión de saturación de vapor ($e^0(T)$) y presión real de vapor (e_a) en dos invernaderos y a cielo abierto.	99
Anexo 14. Primera fase manejo manual: Análisis descriptivo de la temperatura promedio de suelo en dos invernaderos.....	99
Anexo 15. Segunda fase manejo automático y manual: Análisis descriptivo de la Radiación solar en dos invernaderos y a cielo abierto.....	100

Anexo 16. Segunda fase manejo automático y manual: Análisis descriptivo de temperatura máximo y mínimo de aire en dos invernaderos y a cielo abierto.	100
Anexo 17. Segunda fase manejo automático y manual: Análisis descriptivo de la velocidad del viento en dos invernaderos y a cielo abierto.	101
Anexo 18. Segunda fase manejo automático y manual: Análisis descriptivo de la Humedad relativa máximo y mínima en dos invernaderos y a cielo abierto.	101
Anexo 19. Segunda fase manejo automático y manual: Análisis descriptivo de la presión de saturación de vapor ($e^0(T)$) y presión real de vapor (e_a) en dos invernaderos y a cielo abierto.	102
Anexo 20. Segunda fase manejo automático y manual: Análisis descriptivo de la temperatura promedio de suelo en dos invernaderos.	102
Anexo 21. Segunda fase manejo automático y manual: Análisis descriptivo de la Humedad de suelo en dos invernaderos.	103
Anexo 22. Prueba “t” de student del porcentaje de emergencia del <i>Raphanus sativus</i> L. cv. Crimson Giant en dos invernaderos evaluados en 14 días (Primera fase).	103
Anexo 23. Análisis descriptivo y prueba t de student de la altura de planta del <i>Raphanus sativus</i> L. cv. Crimson Giant en dos invernaderos (Primera fase).	104
Anexo 24. Prueba “t” de student y tabla de frecuencia de la cobertura vegetal del <i>Raphanus sativus</i> L. cv. Crimson Giant en dos invernaderos evaluados en 35 días (Primera fase).	105
Anexo 25. Análisis descriptivo y prueba t de student del área foliar por de planta del <i>Raphanus sativus</i> L. cv. Crimson Giant en dos invernaderos (Primera fase).	106
Anexo 26. Determinación del índice de área foliar (IAF) en dos invernaderos (Primera fase).	107
Anexo 27. Análisis descriptivo y prueba t de student del peso de la raíz del <i>Raphanus sativus</i> L. cv. Crimson Giant en dos invernaderos (Primera fase).	108

Anexo 28. Análisis descriptivo y prueba t de student del peso de las hojas del <i>Raphanus sativus</i> L. cv. Crimson Giant en dos invernaderos (Primera fase).	109
Anexo 29. Análisis químico de suelo del invernadero móvil Pachamama después de la primera fase.	110
Anexo 30. Análisis químico de suelo del invernadero Convencional después de la primera fase.....	111
Anexo 31. Análisis químico de compost con activador de Yogurt.	112
Anexo 32. Prueba “t” de student del porcentaje de emergencia del <i>Raphanus sativus</i> L. cv. Crimson Giant en dos invernaderos evaluados en 14 días (Segunda fase).....	113
Anexo 33. Análisis descriptivo y prueba t de student de la altura de planta del <i>Raphanus sativus</i> L. cv. Crimson Giant en dos invernaderos (Segunda fase).	114
Anexo 34. Prueba “t” de student y tabla de frecuencia de la cobertura vegetal del <i>Raphanus sativus</i> L. cv. Crimson Giant en dos invernaderos evaluados en 32 días (Segunda fase).....	115
Anexo 35. Análisis descriptivo y prueba t de student del área foliar por planta del <i>Raphanus sativus</i> L. cv. Crimson Giant en dos invernaderos (Segunda fase).	116
Anexo 36. Determinación del índice de área foliar (IAF) en dos invernaderos (Segunda fase).	117
Anexo 37. Análisis descriptivo y prueba t de student del peso de la raíz del <i>Raphanus sativus</i> L. cv. Crimson Giant en dos invernaderos (Segunda fase).	118
Anexo 38. Análisis descriptivo y prueba t de student del peso de las hojas del <i>Raphanus sativus</i> L. cv. Crimson Giant en dos invernaderos (Segunda fase).	119
Anexo 39. Galería de fotos del proceso de investigación.....	120

LISTA DE SIMBOLOS

T_{min} = Temperatura mínima
 T_{max} = Temperatura máxima
DPV = Déficit de presión de vapor
HR = Humedad relativa
 E_{To} = Evapotranspiración de referencia
 G = Flujo de calor del suelo
 R_n = Radiación neta
 T = Temperatura media del aire
 u_2 = Velocidad del viento
 $e^o(T)$ = Presión de vapor de saturación
 e_a = Presión real de vapor
 $e^o(T) - e_a$ = Déficit de presión de vapor
 Δ = Pendiente de la curva de presión de vapor
 γ = Constante psicométrica
 A = Arena
 L = Limo
 Y = Arcilla
 D_r = Densidad real
 D_{ap} = Densidad aparente
 CO_2 = Dióxido de carbono
 N_{total} = nitrógeno total
 $P_{disp.}$ = Fosforo disponible
 P_{total} = Fosforo total
 K_{total} = Potasio total
 K = Potasio
 Na = Sodio
 Ca = Calcio
 Mg = Magnesio
 Cl = Cloro

CO_3^{2-} = Radical Carbonato

SO_4^{2-} = Radical Sulfato

HCO_3 = Radical Bicarbonato

CE = Conductividad eléctrica

RAS_{aj} = Relación de Adsorción de Sodio ajustado

MO = Materia orgánica

MS = Materia seca

Inv = Invernadero

PMP = Punto de marchitez permanente

CC = Capacidad de campo

MP = Mega Pixeles

IAF = Índice de Área Foliar

LCA = Laboratorio de calidad ambiental

ASAE = American Society of Agricultural Engineers

UNE = Norma Española

IDEA = Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía

ADC = Analogue-Digital-Converter

CECC = Centro Experimental Cota Cota

PVC = Policloruro de vinilo

PEBD = Polietileno de baja densidad

UMSA = Universidad Mayor de San Andrés

INIAF = Instituto Nacional de Innovación Agropecuaria y Forestal

MDRyT = Ministerio de Desarrollo Rural y Tierras

INE = Instituto Nacional de Estadística

FAO = Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación

NNE = nornoreste

ESE = estesureste

WNW = oestenoeste

SSW = sursuroeste

NW = noroeste

RESUMEN

La producción de cultivos en invernaderos requiere un manejo adecuado y oportuno de la infraestructura a fin de evitar estrés en los cultivos. Asimismo debe ser una actividad que no demande mucho tiempo y esfuerzo a los productores. El objetivo de la presente investigación fue: “Evaluar el efecto del control microclimático en dos invernaderos manejados ambos de manera manual comparados con un manejo manual y automático simultáneo, cuantificar el impacto de elevadas temperaturas sobre el rendimiento de hortalizas de producción típicas en la zona de estudio y explorar opciones de manejo automático de invernaderos para reducir los niveles de estrés inducidos por la modificación microclimática”.

El trabajo fue realizado en el Centro Experimental Cota Cota, la cual está ubicado en el Municipio Nuestra Señora de La Paz. Durante el periodo de marzo a abril de 2017, se evaluó el efecto de control microclimático manejados de manera manual en el invernadero móvil Pachamama y en el invernadero Convencional (primera fase) y durante el periodo de septiembre a octubre de 2017 se evaluó el efecto de control microclimático manejados de manera automatizada y manual en el invernadero móvil Pachamama y en el invernadero Convencional respectivamente (segunda fase), a través de mediciones diarias de seis parámetros climáticos, el mismo estudio se realizó en terreno descubierto (a cielo abierto). Durante el mismo periodo se estableció el cultivo de rábano en los dos invernaderos.

El estudio del efecto de control microclimático en la segunda fase determino que la radiación solar transmitida en el invernadero Convencional (45,5%) es mayor al invernadero móvil Pachamama (22,5%) y a la primera fase (17,7%), siendo en el invernadero móvil Pachamama no diferente que a la primera fase (25,9%), además la amplitud térmica en el invernadero móvil Pachamama (29,93°C) es menor que el invernadero Convencional (32,32°C) y a la primera fase (33,45°C), siendo las temperaturas mínimas más elevadas que a cielo abierto pero no significativamente diferentes en ambos invernaderos, si muy diferentes en la temperatura máxima superando por mucho el óptimo de cultivo en el invernadero Convencional (56,40°C)

y en la primera fase en el invernadero móvil Pachamama (54,30°C). Presentan niveles estables de humedad relativa en ambos invernaderos, la velocidad de viento es cero en los dos invernaderos. Los problemas que se observaron en los invernaderos mediante un manejo manual del microclima tanto en la primera fase como la segunda, se refieren a las altas temperaturas y las amplitudes térmicas elevadas debido a un manejo inadecuado inoportuno e insuficiente por parte del operador, mientras en un manejo automático no se presentaron los problemas mencionados, además en la primera fase en el invernadero móvil Pachamama, se observó el efecto de niveles bajos de luminosidad ya que en este invernadero las hojas tienden a colocarse horizontalmente, esto debido al material de la cubierta. De igual modo se observó menor radiación solar en el invernadero Convencional debido al empleo de pantallas de sombreo permanente durante el periodo de evaluación. Además en la segunda fase en el invernadero Convencional presento mayor radiación (sin pantallas de sombreo), mayor temperatura y el área foliar disminuyó.

Palabras clave: Invernaderos, Control, Manual, Automático, Microclima.

ABSTRACT

The production of crops in greenhouses requires an adequate and timely management of the infrastructure in order to avoid stress on the crops. It must also be an activity that does not demand much time and effort from the producers. The objective of the present investigation was: "To evaluate the effect of microclimatic control in two greenhouses managed both manually compared to simultaneous manual and automatic handling, to quantify the impact of high temperatures on the yield of typical production vegetables in the area of study and explore options of automatic management of greenhouses to reduce stress levels induced by microclimatic modification".

The work was carried out in the Cota Cota Experimental Center, which is located in the Municipality of Nuestra Señora de La Paz. During the period from March to April 2017, the effect of microclimatic control managed manually in the Pachamama mobile greenhouse and in the conventional greenhouse was evaluated (first phase) and during the period from September to October 2017 the effect of microclimatic control managed in an automated and manual way in the Pachamama mobile greenhouse and in the conventional greenhouse respectively (second phase), through daily measurements of six climatic parameters, the same study was carried out in open terrain. During the same period the cultivation of radish was established in the two greenhouses.

The study of the effect of microclimatic control in the second phase determined that the solar radiation transmitted in the conventional greenhouse (45.5%) is greater than the Pachamama mobile greenhouse (22.5%) and the first phase (17.7%), being in the Pachamama mobile greenhouse no different than in the first phase (25.9%), in addition the thermal amplitude in the Pachamama mobile greenhouse (29.93°C) is lower than the conventional greenhouse (32.32°C) and the first phase (33.45°C), being the minimum temperatures higher than in the open air but not significantly different in both greenhouses, if very different in the maximum temperature, far exceeding the optimal cultivation in the conventional greenhouse (56.40°C) and in the

first phase in the Pachamama mobile greenhouse (54.30°C). They have stable levels of relative humidity in both greenhouses, the wind speed is zero in the two greenhouses. The problems observed in the greenhouses through manual handling of the microclimate in both the first and second phases, refer to high temperatures and high thermal amplitudes due to improper and inadequate handling by the operator, while in a automatic handling did not present the mentioned problems, in addition in the first phase in the Pachamama mobile greenhouse, the effect of low levels of luminosity was observed since in this greenhouse the leaves tend to be placed horizontally, this due to the material of the cover. Likewise, less solar radiation was observed in the Conventional greenhouse due to the use of permanent shading screens during the evaluation period. In addition, in the second phase in the Conventional greenhouse I present greater radiation (without shading screens), higher temperature and the leaf area decreased.

Key words: Greenhouses, Control, Manual, Automatic, Microclimate.

1 INTRODUCCIÓN

En el interior del invernadero, los factores radiación, temperatura y composición de la atmosfera son modificados generando un microclima distinto al local. Las modificaciones dependen esencialmente de la naturaleza y propiedades del material de cerramiento, de las condiciones de renovación de aire, de la forma, dimensiones y orientación del invernadero, de la cubierta vegetal presente y de las posibilidades de evaporación del suelo y de la cubierta (Berninger, 1981 citado por Castilla, 2005)

Hoy en día el empleo de ordenadores en el control microclimático de invernaderos es cada vez más usual, independientemente o coordinando con el control de la fertirrigación. Un control digital del microclima en invernadero se compone, de un controlador (el ordenador climático), de unos equipos correctores (calefacción de ventilación,...) y de unos sensores, para medir los parámetros a regular.

Valores elevados de humedad relativa influyen en el desarrollo de enfermedades, se genera condensación de agua en cuyas gotas pueden germinar las esporas de los hongos. Asimismo, la lucha contra las temperaturas elevadas en invernadero para la producción de especies hortícolas es un problema ya que la actividad fotosintética tiene una clara respuesta a la temperatura; muestra un mínimo (sobre 5°C), alcanza un óptimo de 25 a 35°C y disminuye a valores superiores. (Urban, 1997 citado por Castilla, 2005). Finalmente, la dificultad de disponer agua a la planta en invernaderos por falta de datos meteorológicos para el cálculo de la evapotranspiración de cultivo (ETc) provoca un aporte pobre o excesivo, incrementando los problemas anteriormente planteados.

1.1 Justificación

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, sin embargo, 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 y reducir el impacto negativo de las elevadas temperaturas del aire.

Para ello se requiere explorar niveles avanzados de control y automatización de invernaderos que permitan vigilar de cerca la evolución de las variables micrometeorológicas para optimizar la respuesta productiva de los cultivos, tratando de reducir el impacto negativo de extremos que puedan darse en variables como la temperatura o humedad atmosférica, debido al carácter cerrado de la infraestructura de invernaderos.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

Evaluar un sistema de control automatizado de manejo microclimático en relación al manejo tradicional de invernadero en el Centro Experimental Cota Cota en La Paz, Bolivia.

1.2.2 Objetivos específicos

- Evaluar el efecto del control microclimático en dos invernaderos manejados ambos de manera manual comparados con un manejo manual y automático simultáneo.
- Cuantificar el impacto de elevadas temperaturas sobre el rendimiento de hortalizas de producción típicas en la zona de estudio.
- Explorar opciones de manejo automático de invernaderos para reducir los niveles de estrés inducidos por la modificación microclimática.

2 REVISION BIBLIOGRAFICA

2.1 Concepto de invernadero

Un invernadero es una construcción que permite la delimitación de un compartimiento de cultivo, en el cual el clima difiere del existente al aire libre, por las modificaciones que provoca el material de cerramiento en los intercambios entre el suelo, el sustrato y la masa vegetal con el entorno (Villele, 1983).

La norma UNE-EN 13031-1 (2002), (Invernaderos: Proyecto y construcción) define el invernadero como una estructura usada para el cultivo y/o protección de plantas y cosechas, la cual optimiza la transmisión de radiación solar bajo condiciones controladas para mejorar el entorno del cultivo y cuyas dimensiones posibilitan el trabajo de las personas en su interior.

Para FAO (2012), un invernadero es una construcción cuya cubierta o techo es de un material que deja pasar a luz solar facilitando la acumulación de calor durante el día y desprendiendo lentamente durante la noche, cuando las temperaturas descienden drásticamente. De esta manera se evitan las pérdidas de los cultivos ocasionadas por las bajas temperaturas.

2.1.1 Objetivo del cultivo protegido.

El objetivo genérico del cultivo protegido es modificar el entorno natural, mediante técnicas diversas, para alcanzar la óptima productividad de los cultivos, aumentando las producciones, mejorando su calidad, alargando los periodos de recolección y extendiendo las áreas de producción. En algunas regiones son, también, objetivos del cultivo protegido la reducción de la radiación solar, mediante sombreo, o la protección del viento, del granizo o de la lluvia. Con ello se persigue hacer un uso más eficiente del suelo, agua, energía, nutrientes y del espacio, así como de los recursos climáticos de radiación solar, temperatura, humedad ambiental y anhídrido carbónico del aire (Wittwer et al., 1995 citado por Castilla, 2005).

Además para Santos, Obregón-Olivas, & Salamé-Donoso (n.d.) otros objetivos del cultivo protegido son:

- Proteger los cultivos de las bajas temperaturas.
- Reducir la velocidad del viento.
- Limitar el impacto de climas áridos y desérticos.
- Reducir los daños ocasionados por plagas, enfermedades, nematodos, malezas, pájaros y otros predadores.
- Reducir las necesidades de agua.
- Extender las áreas de producción y los ciclos de cultivo.
- Aumentar la producción, mejorar la calidad y preservar los recursos mediante el control climático.
- Garantizar el suministro de productos de alta calidad a los mercados hortícolas.
- Promover la precocidad (adelanto de la cosecha).
- Producir fuera de época.

2.2 Agricultura protegida en el mundo

La técnica del cultivo protegido ha tenido un gran desarrollo a nivel mundial principalmente en las cuatro últimas décadas, con un crecimiento estimado de 20% anual desde 1980 (Cobos y López, 1997 citado por Villagrán, 2016). Actualmente, existe una extensión estimada de 949000 hectáreas de cultivo bajo invernadero, consolidándose en países asiáticos (China, Corea y Japón) y en países europeos principalmente ubicados en la cuenca mediterránea (España, Italia y Francia). La mayor extensión se encuentra en países asiáticos con 700000 ha, lo cual corresponde al 73% del área global. En Europa se encuentran 170000 ha lo cual corresponde al 18% del área global, siendo España e Italia los países con mayor fracción cubierta, con el 31% y 17%, respectivamente. En países como Marruecos, Turquía, Argelia, Egipto y Túnez el área bajo cubierta es aproximadamente de 57000 ha lo cual corresponde a un 6% del área global. En Estados Unidos existe un área de 5000 ha (0.52%), y en Latinoamérica se cuenta aproximadamente con 22000 ha lo que equivale a un 2.3% del área global (Villagrán, 2016).

A nivel global la agricultura protegida se puede dividir en dos grandes grupos:

2.2.1 Invernadero tradicional o convencional

El primero y el más predominante es la agricultura protegida con estructuras de bajo costo, reducido consumo de energía y mínima capacidad de controlar el microclima generado usando como medio de control climático la ventilación natural. En este grupo las estructuras son diversas y pueden variar dependiendo de la disponibilidad de materiales en cada región. En estos invernaderos las plantas deben adaptarse a condiciones ambientales inadecuadas.

2.2.2 Invernaderos automatizados

El segundo tipo y menos predominante corresponde a la agricultura protegida desarrollada dentro de invernaderos altamente tecnificados que tienen la capacidad de ofrecer el microclima óptimo según el tipo de cultivo. Esta tipología de producción es desarrollada principalmente en países del centro y el norte de Europa, cuyo representante más relevante es Holanda (Papadakis et al., 2000).

2.3 Agricultura protegida en Bolivia

Los primeros sistemas de cultivos protegidos o invernaderos se han desarrollado en las regiones alto-andinas de Bolivia, como una opción tecnológica para contrarrestar los efectos de las condiciones climáticas adversas que las caracterizan. La sequía ocurrida durante el ciclo agrícola 1982-83, agudizó la crítica situación de la producción agropecuaria en estas regiones y marcó el nacimiento de muchos proyectos de invernaderos, promovidos por diferentes instituciones de desarrollo rural.

Entre ellas destacan organizaciones de desarrollo no gubernamental como CIPCA (Centro de Investigación y Capacidad del Campesinado), SEMTA (Servicio Múltiples en Tecnología Apropriada), CEDEFOA (Centro de Desarrollo y Fomento a la Auto - Ayuda), YUNTA, PROQUIPO (Proyecto Quinoa - Potosí), IPTK (Instituto Politécnico Tomás Katari) y el instituto de Ecología de la UMSA también algunos organismos gubernamentales de desarrollo como los PAC (Programas de Autodesarrollo

Campesino). Lo propio sucedió con algunas instituciones de carácter religioso como la misión alianza Noruega, la congregación Jesús María, San Gabriel, la Fundación contra el Hambre, Fe Bahai, entre otras. Cada una de las instituciones mencionadas ha implementado diferentes tipos de invernaderos con un grado variable de adaptación técnica y de validación (NOGUB, COSUDE, & ECOTOP, n.d.).

La cantidad de invernaderos de campesinos y de instituciones involucradas en su construcción, creció significativamente desde su inicio durante la década de los 80. La tecnología se adaptó y se difundió. En algunos casos se adoptó y se hizo funcional. En otros casos, desapareció tan rápidamente como apareció, y en otros, hasta llegó a sustituir al sistema tradicional de producción.

Según Kohl (1990) citado por Aviles (1992), los sistemas de cultivos atemperados surgen en el país como respuesta a la frustración de no poder encarar problemas estructurales en el altiplano. Sin embargo aunque los ambientes atemperados no pueden solucionar problemas de fondo, si pueden tener un rol como componente de desarrollo.

Actualmente el panorama de los invernaderos en Bolivia es complejo, no habiendo registro de superficies cubiertas por invernadero por el Ministerio de Desarrollo Rural y Tierras (MDRyT), los más cercano que se encontró es la cuantificación de estas por el Instituto Nacional de Estadística (INE) realizado por el Censo Agropecuario 2013 donde contabilizo que existe 16413 carpa solares y 6278 invernaderos, los departamentos que concentran mayor número de invernaderos se encuentran en Santa Cruz y Potosí y los departamentos que concentran mayor número de carpa solares se encuentran en La Paz y Santa Cruz (INE, 2015).

Asimismo el Instituto Nacional de Estadística (INE) en el Censo Agropecuario realizado el 2013 diferencio "carpa solar" de invernaderos: por el tamaño y nivel tecnológico. Para la norma UNE-EN 13031-1 (2002), (Invernaderos: Proyecto y construcción), la carpa solar es invernadero.

Puesto que no existe una superficie reportada por el MDRyT e INE, se estimó que existe 324 ha de suelo cubierto por invernaderos y carpas solares lo cual corresponde al 0,0003% del área total del país. Estimado mediante un cálculo tomando como parámetro a la menor superficie de carpa solar 25 m² y a la menor superficie de invernadero 450 m² con base a la cuantificación del INE (2015).

2.3.1 Automatización de invernaderos en Bolivia

Según Delgadillo (2016) investigador de Kopia (programa de cooperación coreana en el área de agricultura) entrevistado por el periodo Los tiempos, menciona que en Bolivia existen muy pocas iniciativas privadas de invernaderos automatizados, precisó que en Santa Cruz hay dos con características algo similares a los Sipe Sipe.

Los invernaderos automatizados que se tiene referencia son los de Sipe Sipe en Cochabamba (Delgadillo, 2016) con una superficie de 537 m² y de la empresa “Quinta Manantial” ubicado en el municipio de El Torno en Santa Cruz (INIAF, 2015).

En el cual el invernadero cuenta con extractores de aire, sistema de sombra con mallas y un sistema informático para irradiar agua fría desde afuera del invernadero (Delgadillo, 2016).

2.4 Clima espontáneo en invernaderos

El invernadero modifica las condiciones del clima natural y da origen a un clima derivado o espontáneo. En el interior del invernadero, los factores radiación, temperatura y composición de la atmosfera son modificadas generando un microclima distinto al local. Las modificaciones dependen esencialmente de la naturaleza y propiedades del material de cerramiento, de las condiciones de renovación de aire, de la forma, dimensiones y orientación del invernadero, de la cubierta vegetal presente y de las posibilidades de evaporación del invernadero, de la cubierta vegetal presente y de las posibilidades de evaporación del suelo y de la cubierta (Berninger, 1989).

2.4.1 Efecto invernadero

Para Castilla (2005), el efecto invernadero es el resultado de dos fenómenos distintos:

- 1) Un efecto de abrigo o de confinamiento (efecto convectivo), derivado de la reducción de los intercambios de aire con la atmósfera exterior, y que es perceptible aún en invernaderos muy permeables al aire.
- 2) Un efecto invernadero debido a la existencia de la cubierta, que es una pantalla poco transparente a los rayos infrarrojos largos que emiten el suelo, la vegetación y todos los elementos interiores expuestos a los rayos solares (visible e infrarrojos cortos), a los cuales esta pantalla es muy transparente. Este segundo efecto se designa, a veces, como efecto invernadero radiativo o trampa de calor.

Durante el día, la radiación solar en su mayor parte atraviesa la cubierta plástica de un invernadero y es absorbido por las plantas y el suelo mayoritariamente. Las plantas y el suelo se calientan y reemiten energía, en longitudes de onda dominantes de una 10 micras, abarcando desde 2,5 a 25 micras (rango infrarrojo largo). Esta energía remitida por las plantas y el suelo es interceptada por el material de cubierta (al ser estos materiales, normalmente, opacos a la radiación infrarroja), que se recalienta y reemite a su vez energía hacia el exterior y hacia el interior en proporciones similares. El aire del invernadero se calienta, al estar confinado y no renovarse con aire fresco del exterior.

Estos fenómenos generan un aumento de temperatura muy evidente de día, en relación con el exterior. Este efecto variará según las condiciones concretas de transmisión y absorción de la cubierta a las radiaciones y según las condiciones de ventilación y estanqueidad del invernadero.

De noche, la diferencia de temperatura con el exterior es resultado de un balance complejo en el que influyen, sobre todo, la temperatura del cielo y la temperatura bajo cubierta y los intercambios de aire entre el invernadero y el exterior.

En el pasado, el efecto invernadero radiativo era considerado el responsable del microclima del invernadero, pero hoy día ha quedado clara la importancia del efecto convectivo, debido al confinamiento del aire, por lo que el uso de la expresión efecto

invernadero debe referirse a ambos procesos, radiativo y convectivo (Papadakis et al., 2000).

2.5 Microclima del invernadero

Los parámetros climáticos más importantes dentro de un invernadero son la temperatura del aire, la velocidad del aire, humedad relativa (HR), radiación solar y concentración de dióxido de carbono (Bournet y Boulard, 2010 citado por Thipe, 2014). Estas variables influyen en la fotosíntesis del cultivo, evapotranspiración, La respiración y, en última instancia, el crecimiento, rendimiento y calidad de los cultivos (Van Straten & Van Henten, n.d.).

2.5.1 Radiación solar

La cantidad de radiación solar que es captada por el invernadero es influenciada por factores externos y por especificaciones propias de este. Los factores externos más relevantes son el estado del tiempo, la época del año y la hora del día. Dentro de las especificaciones del invernadero intervienen la localización, la orientación, la geometría, el material y las propiedades ópticas de la cubierta (Montero, 2012 citado por Villagrán, 2016). La radiación incide directamente sobre el microclima del invernadero alterando el comportamiento térmico del aire interno debido principalmente a procesos de transferencia de calor por conducción y convección. Además, la radiación solar cumple un papel primordial en el proceso de fotosíntesis de las plantas. La radiación fotosintéticamente activa (PAR) que es utilizada por las plantas en la fotosíntesis es uno de los principales determinantes de los rendimientos de los cultivos.

Altos niveles de radiación PAR asociados a altas concentraciones de dióxido de carbono (CO₂) y temperaturas óptimas generan un activo crecimiento vegetal (Iglesias y Muñoz, 2007; Fidaros et al., 2010 citado por Villagrán, 2016). La cantidad de radiación incidente en cultivos protegidos es más baja en comparación con cultivos a campo abierto, valores de radiación bajos influenciados principalmente por factores como: geometría de la cubierta, pérdidas debidas a la reflexión y absorción del material de cubierta y de los elementos estructurales que componen el invernadero, (estas

reducciones pueden llegar a ser de alrededor del 30 al 50%). Las propiedades de los materiales de cubierta y del material opaco que estructura el invernadero están definidas por las leyes ópticas de reflexión, absorción y transmisión (Hernández, Escobar, & Castilla, 2001). Adicionalmente la edad y la falta de mantenimiento del material de cubierta van reduciendo progresivamente su capacidad de transmisión de radiación. La suciedad y el acumulamiento de polvo en climas secos y de poca pluviosidad pueden llegar a ocasionar pérdidas de transmisión de radiación de la cubierta cercanas al 30% (Lorenzo, 2012). Este porcentaje puede aumentar progresivamente a medida que transcurre el tiempo y el material de cubierta va perdiendo sus propiedades físicas y ópticas.

2.5.2 Temperatura

2.5.2.1 Temperatura del aire

La temperatura del aire dentro del invernadero es el resultado del balance energético del abrigo (Castilla, 2005). El comportamiento térmico está influenciado por varios factores, varía según la cantidad de radiación solar que este reciba, temperatura del exterior, el tipo de material de cobertura utilizado, su hermeticidad e inercia térmica pero principalmente de la eficiencia del sistema de ventilación. Para Sethi (2007) la forma y la orientación del invernadero también tiene influencia en la temperatura del ambiente del invernadero.

Alpi & Tognoni (1991) indican que la temperatura en el interior de un invernadero dependen en su mayor parte del efecto invernadero que nace, por una parte, de la radiación solar y, por otra de la impermeabilidad de los materiales de recubrimiento a las radiaciones calóricas.

Butrón (2017) describe que en un experimento llevado adelante en carpa solar en la Estación Experimental de Cota Cota de la Facultad de Agronomía de la UMSA, el comportamiento semanal de las temperaturas máximas y mínimas a cielo abierto presenta una amplitud térmica en promedio de 14,2°C, y en ambiente protegido la amplitud térmica promedio es de 29,2°C, (Figura 1). Se determinó entonces que la

ganancia energética dentro de la carpa solar descrita, se relaciona mucho más a la acumulación durante el día (T_{max}) que a la menor pérdida energética durante la noche (T_{min}).

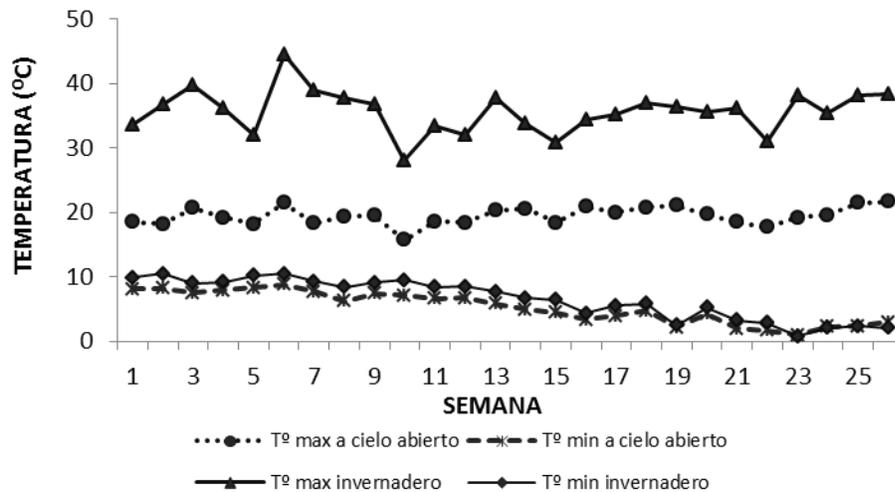


Figura 1. Valores de temperatura máxima y mínima semanal a cielo abierto y bajo condiciones de invernadero, elabora por Butrón (2017).

Las altas temperaturas internas del aire reducen el crecimiento, el rendimiento y la calidad de los cultivos (Shen y Yu, 2002 citado por Thipe, 2014).

2.5.2.2 La temperatura del suelo

En la zona superficial, las temperaturas de suelo siguen una evolución similar a la temperatura del aire, de aspecto sinusoidal y retrasado respecto a la del aire. Los valores extremos se amortiguan con la profundidad. El tipo de riego influye en la temperatura de suelo, de una parte por la propia temperatura del agua y de otra parte por su incidencia en la evaporación de agua del suelo y, por tanto en el balance de energía (Berninger, 1989).

El suelo constituye en almacén de energía y el calor que penetra hacia el interior no lo hace más que hasta una profundidad de 50 cm., donde podemos considerar una temperatura constante. Fundamentalmente la absorción y penetración del calor en el suelo es función del estado higrométrico (Bernat, Andrés, & Martínez, 1987)

2.5.3 Humedad relativa

La humedad relativa indica el contenido de vapor de agua en el aire a una temperatura determinada como porcentaje de la capacidad máxima en la saturación. Esta variable es inversamente proporcional a la temperatura. A mayor temperatura, mayor volumen y mayor capacidad de retener vapor de agua (Razón de humedad) y menor humedad relativa, para una masa constante de aire (Roy y Boulard, 2005 citado por Villagrán, 2016).

Uno de los objetivos del cultivo en invernadero es aumentar la HR, mientras que simultáneamente se reduce el déficit de presión de vapor del aire (Kittas y Bartzanas, 2007 citado por Thipe, 2014).

El control de esta variable es de suma importancia puesto que valores menores al 50% aumentan la tasa de transpiración de los cultivos generando condiciones de estrés hídrico que limitan la productividad final de esos cultivos (Seginer, 2002 citado por Villagrán, 2016). Valores superiores al 90% incrementan el riesgo de incidencia de enfermedades principalmente de hongos al aumentar la posibilidad de que se produzca condensación sobre el cultivo, propician la disminución de la tasa de transpiración, disminución de transporte de iones hacia la zona de crecimiento, desequilibrio hormonal y abortos florales por apelmazamiento de polen. Estas alteraciones pueden incidir en el crecimiento y desarrollo así como provocar morfologías anormales y fisiopatías.

Desde el punto de vista fisiológico es más útil trabajar en términos de déficit de saturación o déficit de presión de vapor (DPV) (Castilla, 2005). El DPV representa la diferencia entre la capacidad de humedad máxima y el contenido real. Cada vez se emplea más este parámetro para los efectos de control climático, sustituyendo a la humedad relativa (Hernández et al., 2001). Debería evitarse superar DPV de 1,1 kPa en invierno y de 2,7 kPa en primavera, como norma general (Berninger, 1989).

La contribución más importante a los intercambios de vapor de agua en un invernadero la efectúa la transpiración del cultivo, aunque también tienen influencia la evaporación de agua desde el suelo húmedo (Day et al., 1999 citado por Castilla, 2005).

2.5.4 Dióxido de carbono (CO₂)

El dióxido de carbono (CO₂) es un elemento presente naturalmente en la atmósfera en un 0,03% aproximadamente (300ppm), esta cantidad puede variar de un 0,02 hasta un 0,04%. La concentración de este gas varía mucho más en el interior de un invernadero que al aire libre (Alpi & Tognoni, 1991).

Su importancia radica por ser un elemento esencial para el proceso de fotosíntesis. En los invernaderos con dificultades de ventilación las concentraciones de CO₂ son muy variables y en ocasiones su valor está por debajo del presente en la atmósfera. Lo anterior se debe principalmente a que invernaderos pasivos que no cuentan con sistemas de enriquecimiento carbónico en horas de alta radiación, el cultivo fija el CO₂ para su proceso de fotosíntesis, con lo cual los niveles de CO₂ descienden a valores inferiores a los presentados en el aire externo, debido principalmente a un pobre intercambio de aire entre el interior y el exterior del invernadero.

Investigaciones han encontrado que un aumento o una disminución de los niveles de CO₂ repercuten sobre la productividad de los cultivos. Bajo condiciones de invernadero, valores de CO₂ atmosférico que maximizan la fotosíntesis foliar están en torno a 1000 ppm (Kimbal, 1986; Hicklenton, 1988 citado por Castilla, 2005). En los últimos años, principalmente en países de la cuenca mediterránea, se ha trabajado en el enriquecimiento carbónico artificial del aire en el interior de los invernaderos. Los resultados de diversos estudios han reportado aumentos de producción entre el 15 y 40% en comparación con cultivos establecidos en invernaderos sin fertilización carbónica (Sánchez-Guerrero, 2009; Alonso, 2011; Lorenzo, 2012 citado por Villagrán, 2016).

2.5.5 Velocidad del viento

La velocidad del viento en el invernadero es un factor importante, ya que la distribución de la temperatura y la humedad relativa sigue el patrón de flujo de aire (Bartzanas, Boulard, & Kittas, 2002). Una distribución no uniforme de la velocidad del aire conduce a una temperatura y HR no uniformes, y en consecuencia, crecimiento, desarrollo y

madurez de cultivos no uniformes (Bailey, 2006 citado por Thipe, 2014). El ideal de las tasas de flujo de aire en el invernadero deben oscilar entre $0,5$ y $0,7\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ y valores de velocidad del aire por encima de $1\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ resultan en altas tasas de transpiración y estrés hídrico (ASHRAE Handbook, 2001).

Castilla (2005) indica que hay que evitar velocidades de aire mayores a $1\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ya que afectan a las plantas.

2.6 Ventilación y refrigeración en invernaderos.

Castilla (2005) menciona que la ventilación es el intercambio de aire entre el invernadero y el exterior. La renovación del aire permite evacuar calor en exceso y reducir la temperatura del aire, modificando la humedad atmosférica, evacuando el aire interior enriquecido de vapor de agua por la transpiración de las plantas y modificar la composición gaseosa de la atmósfera en especial CO_2 . Además de la distribución y uniformidad de temperatura y humedad, uniformidad del crecimiento de las plantas, rendimiento, y producir de calidad (Boulard, Feuilloley, & Kittas, 1997).

2.6.1 Sistemas de ventilación natural

La ventilación natural es el principal método de control del clima del invernadero, ya que requiere menos energía, menos equipos y mantenimiento y es mucho más económico que otros sistemas de climatización.

A continuación se indican una serie de recomendaciones para optimizar la ventilación natural:

- Los invernaderos equipados con ventanas cenitales (Kittas, Boulard, Mermier, & Papadakis, 1996) o ventanas cenitales y laterales son más eficaces desde el punto de vista de la ventilación natural que los invernaderos con ventanas laterales únicamente (Papadakis, Mermier, Meneses, & Boulard, 1996).

- Disponer como mínimo de una superficie de ventilación del 20 al 30% de la superficie de suelo cubierta por el invernadero. Además, es conveniente que la superficie de las

aberturas cenitales suponga al menos 1/3 de la superficie total de ventilación, de forma que se facilite la ventilación por efecto «chimenea» cuando la velocidad del viento es pequeña.

– Es conveniente orientar el invernadero de forma que las ventanas se sitúen perpendicularmente a los vientos dominantes en el periodo estival en el que las necesidades de refrigeración son mayores.

– Evitar la presencia de edificios o árboles que obstaculicen el flujo natural de aire por las ventanas.

– Las ventanas laterales de barlovento producen una mejor ventilación cuando se sitúan cerca del suelo y tienen mayor tamaño que las ventanas cenitales.

– Es importante disponer de ventanas cenitales que abran tanto a barlovento como a sotavento para asegurar una máxima ventilación en diferentes condiciones climáticas.

– Las ventanas deben cerrar herméticamente para asegurar que no se produce infiltración de aire en los periodos fríos.

– No utilizar sistemas de ventilación forzada cuando sea posible una circulación natural del aire exterior.

– Aunque es imprescindible la utilización de mallas anti-insecto desde el punto de vista fitosanitario, deben tener una porosidad superior al 40% para no disminuir en exceso la ventilación natural.

– Es aconsejable un control automatizado de las ventanas en función de las condiciones ambientales dentro del invernadero. Además el sistema debe permitir un cierre automático de las ventanas ante la posibilidad de lluvia o fuertes vientos.

2.6.2 Sistemas de ventilación forzada

El uso de ventiladores puede permitir un control más preciso de la temperatura del invernadero que el que puede lograrse con la ventilación pasiva. Para ello se

recomienda que la tasa de ventilación sea como mínimo de 45 a 60 renovaciones de aire por hora (mínimo $\frac{3}{4}$ a un cambio total de aire por minuto) (ASAE, 1981 citado por Matallana & Montero, 2001).

La ASAE (1981) citado por IDAE (2008) establece una serie de normas para el diseño y control de los sistemas de ventilación forzada:

- Los ventiladores deben hacer circular el caudal de aire previamente calculado a la presión estática de 0,03 kPa.
- La distancia entre dos ventiladores contiguos no debe ser superior a 7,5 m para asegurar la uniformidad en el flujo del aire.
- Siempre que sea posible se deben situar los extractores a sotavento de los vientos dominantes en verano. Si necesariamente es preciso instalarlos a barlovento, se debe aumentar el volumen a ventilar por cada extractor en un 10%.
- Debe haber una distancia mínima sin obstáculos a la salida del aire de 1,5 veces el diámetro del ventilador. Los ventiladores se pueden situar en el techo si hay interferencias en los laterales.
- Para evitar entradas de aire indeseadas cuando los ventiladores no estén en funcionamiento, las aperturas de entrada deben tener rejillas motorizadas que abran hacia fuera y sólo se abrirán cuando los ventiladores entren en funcionamiento. Las rejillas de salida también abrirán hacia fuera movidas por la presión de los ventiladores.
- La superficie de las ventanas de entrada será al menos 1,25 veces el área de los ventiladores.
- Las aspas deben estar protegidas con tela metálica de alambre de 1,5 mm de grosor mínimo y aberturas de 13 mm. Esta especie de pantalla debe estar al menos a 1 m de distancia de cualquier parte móvil para prevenir accidentes.
- Es preferible controlar el volumen de aire renovado en varias fases. Para ello se pueden utilizar motores de frecuencia variable que permitan regular la velocidad de los

ventiladores o conectar distinto número en función de la temperatura del invernadero (IDAE, 2008).

2.7 Sistema de regulación y control

La regulación de un proceso, en un sistema físico, agrupa el conjunto de técnicas y medios materiales que se dedican a conseguir que, sea cual sea la perturbación, la magnitud física a regular iguale un valor deseado que se llama consigna (Urban, 1997 citado por Castilla, 2005).

El principio general de la regulación es el siguiente: 1) Se cuantifica el valor del parámetro que se pretende regular, bien por medida o por cálculo. Por ejemplo, para regular la apertura de la ventana en función de la temperatura del aire del invernadero, se mide la temperatura del aire, que resulta ser de 25°C. 2) Este valor medido se compara con el valor consigna del parámetro, que puede estar predefinido por el usuario o ser resultado del cálculo o de la aplicación de una regla preestablecida. El valor consigna de la temperatura del aire, en el ejemplo, puede estar fijado en 23°C, el cual resulta inferior al valor medido (25°C). 3) Por último, mediante uno o varios accionadores, se ponen en funcionamiento uno o más equipos, para reducir la diferencia entre el valor medido y el valor consigna del parámetro en cuestión. En el ejemplo, se pondría en marcha los motores de apertura de ventanas para ventilar y aproximar la temperatura del aire del invernadero al valor consigna (23°C).

2.8 La gestión climática por ordenador

2.8.1 Controles efectuados por los sistemas de regulación en invernadero

En calefacción, el objetivo principal de los sistemas de regulación es adaptar los aportes de calor a las necesidades del cultivo. El objetivo secundario es deshumidificar el aire.

El objetivo principal de los sistemas de regulación de la ventilación es impedir que la temperatura del aire interior exceda del umbral fijado. Son objetivos secundarios la

deshumidificar y favorecer entrada de CO₂. Intervienen en su manejo los sensores de temperatura, humedad y de CO₂. Pueden limitar la lluvia o el viento.

La función única de los sistemas de regulación del sombreado es reducir radiación, normalmente para reducir temperatura, en momentos de alta radiación.

El aporte de CO₂ sólo se practica de día, interviniendo los sensores de CO₂, radiación y de apertura de ventanas.

La humidificación pretende mantener la higrometría, empleando como sensores los de humedad y temperatura de aire (Castilla, 2005).

2.8.2 Sistema de control digital

Los desarrollos procedentes de la segunda guerra mundial permitieron el desarrollo del control analógico, que empleaba circuitos eléctricos para conseguir «inputs» -entradas (medidas de parámetros ambientales)- y calcular, automáticamente, «outputs» -órdenes para la actuación de diversos mecanismos y maquinaria-. La aparición del control digital y la creciente complejidad del manejo, que encarecía los sistemas de control analógico, han hecho prevalecer los sistemas de control digital.

Un sistema de control digital se compone, básicamente de: 1) Controlador, es decir, el ordenador climático. 2) Equipos correctores (calefacción, ventilación, etc.). 3) Sensores, para medida de los diversos parámetros a regular (Castilla, 2005).

2.9 El ordenador de gestión climática

Castilla (2005) menciona que un ordenador climático controla diversos procesos para regular, principalmente, temperatura, humedad, luz, CO₂ y circulación del aire. Sus funciones son medir diversos parámetros, calcular con los datos medidos y los programas que posee y dar órdenes de actuación a los equipos que regula, para mantener los parámetros en regulación dentro los valores deseados (consignas).

Las medidas de los sensores son efectuadas en forma analógica y, para ser interpretados por el ordenador, deben convertirse en información digital. Para ello se

emplea un convertidor analógico-digital (ADC, del inglés, «Analogue-Digital-Converter»), Cuando un sensor genera una señal de medida que no es interpretable por el ADC, se utiliza un interfaz que adecua la señal para que sea legible por el ADC. Por ejemplo, un sensor de radiación solar genera una diferencia de potencial, que es proporcional a la radiación incidente, en forma de señal analógica que debe ser convertida a señal digital por el convertidor ADC para ser interpretada por el ordenador.

Las ordenes de actuación del ordenador o señales de salida, a baja tensión (24voltios), accionan relés que manejan los diversos equipos correctores (Castilla, 2005).

3 LOCALIZACION

3.1 Ubicación geográfica

Los ensayos se llevaron a cabo en el Centro Experimental Cota Cota, dependiente de la Facultad de Agronomía de la Universidad Mayor de San Andrés (UMSA), que se encuentra ubicada en la zona de Cota Cota, Municipio Nuestra Señora de La Paz (Provincia Murillo, departamento de La Paz, Bolivia). Su situación geográfica es $16^{\circ}32'09''$ latitud sur y $68^{\circ}03'48,7''$ longitud oeste, a una altitud de 3447 m s.n.m. (Butrón, 2017).

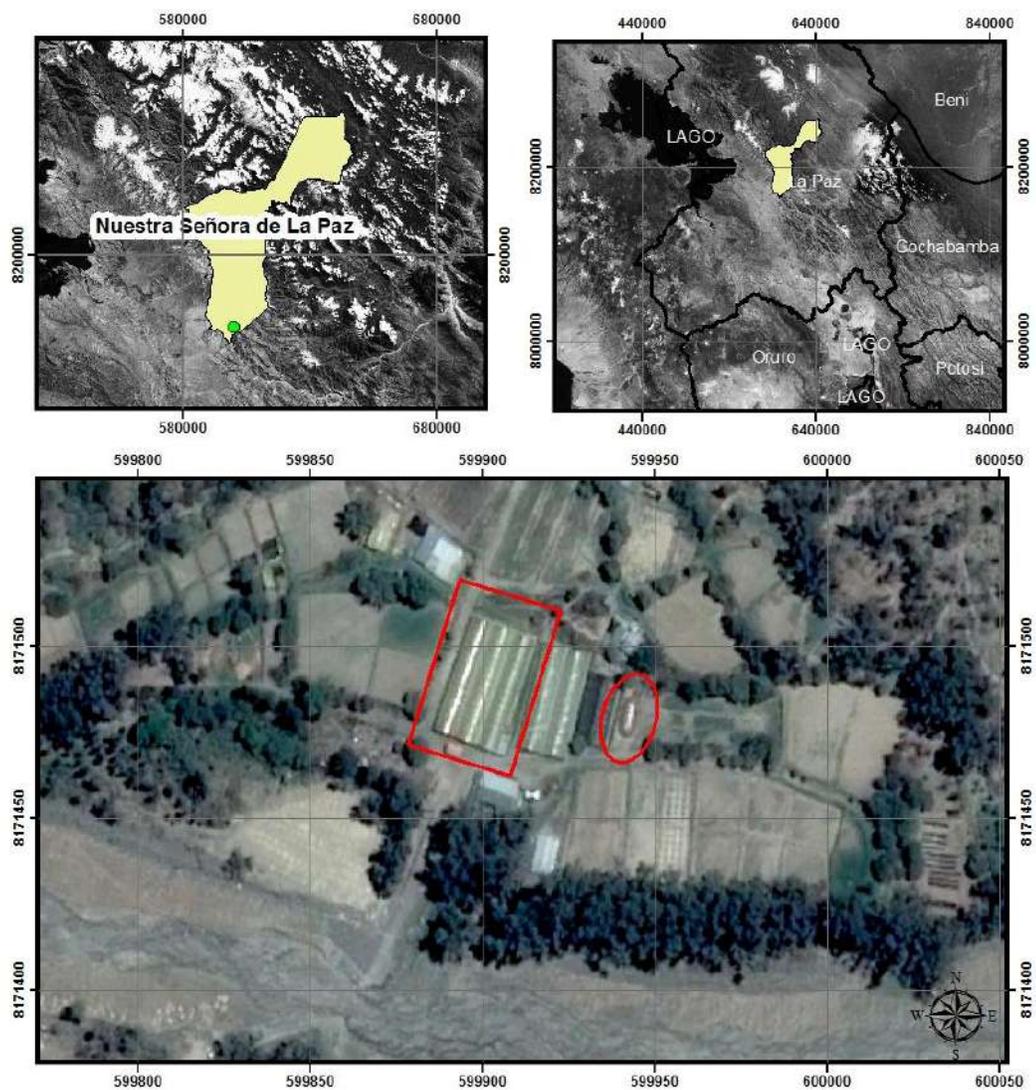


Figura 2. Ubicación del Centro Experimental Cota Cota. (Fuente: Elaboración propia).

3.2 Fisiografía y características edáficas

La zona de estudio se caracteriza por ser cabecera de valle, presenta una topografía accidentada, suelos aluviales debido a la sedimentación del material arrastrado por los ríos (Butrón, 2017).

3.3 Característica climática

Presenta un clima templado, la temperatura máxima promedio es de 21,5°C, la temperatura media oscila entre 11,5°C, la temperatura mínima promedio 1°C. Presenta una precipitación media anual de 488 mm y una humedad relativa promedio de 50% (Butrón, 2017).

3.4 Vegetación

En los alrededores comprende arboles como ser eucalipto (*Eucalyptus globulus*), pinos (*Pinus radiata*), cipres (*Cupressus macrocarpa*), acacia (*Acacia retinodes*), retama (*Spartium junceum*), chilca (*Bacharis rubricaulis*) y arbustos entre otros. La producción agrícola se realiza a campo abierto mediante la rotación de cultivos y comprende: maíz (*Zea mays*), papa (*Solanum tuberosum*), haba (*Vicia faba*), arveja (*Pisum sativum*), cebolla (*Allium cepa*), beterraga (*Beta vulgaris*) entre otros. En ambientes protegidos (invernaderos) la producción es hortofrutícola: tomate (*Solanum lycopersicum*), lechuga (*Lactuca sativa*), frutilla (*Fragaria vesca*) y otros (Butrón, 2017).

4 MATERIALES Y METODOS

4.1 Materiales

4.1.1 Invernaderos

Los ensayos se realizaron bajo condiciones ambientales de dos invernaderos (invernadero Convencional e invernadero móvil Pachamama), con forma, estructura, material de cobertura y dimensiones diferentes, que ostentaron la base del inicio de la comparación microclimática y agronómica. Ambos invernaderos cuyas características se detallan a continuación:

4.1.1.1 Invernadero Convencional

Consiste en un invernadero multitúnel (trimodular), orientado longitudinalmente nornoreste-sursuroeste (NNE-SSW). Cada módulo exhibe una anchura de 7 m, longitud 33 m, una altura de canal de 2,50 m y de cumbrera 4m. La superficie de cada módulo es 231 m², siendo la superficie total del invernadero 693 m², presenta una estructura con la mayor parte metálica, están fabricados en su totalidad con tubos, arcos y canalones de acero galvanizado, excepto las vigas y columnas que soportan el primer y último arco que son de madera, las columnas o tubos metálicos de 6 cm de diámetro están fijadas en cimientos de hormigón separadas entre sí 2 m en sentido longitudinal y 7 m en sentido transversal.

Las aberturas de las ventanas laterales son de 1,2 m por 31,2 m situados en los lados este-sureste, oeste-noroeste y nornoreste (ESE, WNW y NNE) y la ventana posterior de 1,2 m por 20,0 m, a 1,25 m sobre el nivel del suelo.

La cubierta del invernadero es una lámina flexible fabricada con polietileno de baja densidad (PEBD) con un espesor de 250 µm.

4.1.1.2 Invernadero móvil “PACHAMAMA”

Es un producto entre sus varias líneas de la empresa CONDOR SRL. (Compañía internacional de franquicias), Este invernadero es totalmente cerrado y cuenta con

puertas, ventanas laterales y escotillas superiores. El tipo de invernadero móvil “Pachamama” empleado fue INV-E3 de 59,72 m² (de superficie ovalo) de placas rígidas, fabricado con resina de poliéster y reforzado con fibra de vidrio, espesor promedio 4000 µm, es totalmente lisa y no necesita una estructura adicional, cuya geometría de la cubierta es túnel, presenta un altura de 2,4 m; la semiesfera 2,7 m de radio y cada accesorio que permite su ampliación es 1,50 m, presentando 4 accesorios siendo un total de longitud 6 m. La escotilla o ventana cenital tiene un diámetro de 0,60 m, siendo un total de 5 ventanas cenitales y 2 ventanas laterales de dimensiones 0,51 m por 0,33 m a una altura sobre el nivel del suelo de 1,30 m, el invernadero está orientado longitudinalmente nornoreste-sursuroeste (NNE-SSW). y la abertura de las ventanas noreste y suroeste (NE y SW).

4.1.2 Equipos de recolección de información

4.1.2.1 Estación meteorológica

Se emplearon tres estaciones meteorológicas “VANTAGE PRO2”, producto desarrollado por la compañía de manufactura privada DAVIS, modelo utilizado es 6152 (inalámbrica) que compone de un conjunto integrado de sensores (ISS) y sensor de radiación solar 6450. El módulo de sensores transmite los paquetes de datos a la consola que presenta un Datalogger para el almacenamiento de datos con un intervalo de archivo configurable desde 1 hasta 120 minutos y el software WeatherLink propio de DAVIS que permite el análisis y graficar los registros.

4.1.2.2 Estación de temperatura y humedad del suelo

Se empleó dos estaciones inalámbricas de temperatura y humedad de suelo modelo 6345 marca DAVIS, cada estación tubo incorporado —una sonda de temperatura para el suelo modelo 6470 configurado en unidades grados Celsius y —dos sensores de humedad del suelo modelo 6440 rango de medida de 0-200 centibares.

4.1.3 Mecanismo electromecánico automatizado

4.1.3.1 Mecanismo de piñón y cadena «Ventanas cenitales»

Este sistema consta de cadenas sin fin (cerrada), cuyos eslabones engranan con las ruedas dentadas (piñones), que están unidas a los ejes del mecanismo conductor y conducido, en el cual se tiene un piñón de 14 dientes y cada ventana cenital esta acoplada a una corona de 28 dientes por lo que se tiene la velocidad de apertura y cierre de las ventanas cenitales exactamente a la velocidad del motor la cual es 6 rpm.

El motor que entrega la potencia al sistema es un motor de corriente continua de 95 Watt de potencia con un consumo de corriente de 12 amperios a plena carga y una tensión de 12 V. A este motor se le acopló un sistema de reducción de velocidad e incremento de torque, el motor entrega un torque de 1.72 kgm a 60 rpm lo cual no es suficiente para elevar todas las chimeneas por lo cual después de instalar el sistema de reducción entrega un torque de 10 kgm a una velocidad de 6 rpm con lo cual las 5 ventanas cenitales se pueden abrir y cerrar sin ningún problema.

Además cuenta con finales de carrera tanto cuando la ventana cenital está abierta como cuando está cerrada de tal manera que cuando la ventana cenital llegue a la posición deseada se corte la energía eléctrica al motor.

4.1.3.2 Mecanismo Biela-manivela «Ventanas laterales»

El mecanismo de biela-manivela es un mecanismo que transforma un movimiento circular en un movimiento de traslación, o viceversa. En forma esquemática, este mecanismo se crea con dos barras unidas por una unión de revoluta. El extremo que rota de la barra (la manivela) se encuentra unido a un punto fijo, el centro de giro, y el otro extremo se encuentra unido a la biela.

Este mecanismo es accionado por un motor de corriente continua que funciona a 12 V, va acoplado a un pequeño sistema de reducción de velocidad de tal manera que la apertura y cierre de las ventanas laterales no sea tan brusco, asimismo cuenta con

finales de carrera tanto cuando la ventana laterales está abierta como cuando está cerrada de tal manera que cuando la ventana laterales llegue a la posición deseada se corte la energía eléctrica al motor.

4.1.3.3 Ventilador

El tipo de Ventilador axial empleado fue el FZY-2E400 de una potencia de 280W con una tensión 220V, caudal de fluido $5830 \text{ m}^3\text{h}^{-1}$ y con una velocidad 1410 rpm. Instalado en la posición noroeste (dirección del viento en base al promedio mensual y anual registrado desde el año 2004 a 2013 de la estación meteorológica más cercana “Achumani” (SENAMHI, 2017)), a una altura de 1,30 m sobre el nivel del suelo.

4.1.3.4 Extractor

Es un ventilador axial puesto en invernadero al revés, tipo SF3-4R de 180W de potencia y una tensión de 220V, caudal de fluido $2000 \text{ m}^3\text{h}^{-1}$ y con una velocidad de 2400 rpm. Instalado en la posición sureste (opuesta al ventilador), a una altura de 1,30 m sobre el nivel del suelo.

4.1.3.5 Ordenador de gestión climática

Es un sistema electrónico donde comanda la programación realizada en base a la temperatura del ambiente (automático) y donde es conectado todos los sistemas electromecánicos.

4.1.4 Material vegetal

La especie vegetal utilizada para el control ha sido el Rábano (*Raphanus sativus* L. cv. Crimson Giant), lote número 321003D003.3; marca Bonanza; procedencia USA; con 99,90% de pureza; 0,10% inerte; 85% de germinación. Gracias a su corto ciclo y gran desarrollo foliar y radicular de la especie, el rábano permite evaluar la influencia del estrés térmico e hídrico, proporcionando gran ventaja en la facilidad de obtención de datos como en el peso seco de plantas completas y las dimensiones del aparato

asimilatorio (área foliar), además esta variedad soporta el calor mejor que la mayoría de las variedades (temperatura óptima 25 – 35°C).

4.1.5 Material Sistema de riego

Cintas de goteo, tubos PVC y de polietileno, accesorios de unión, válvula manual de agua y electroválvula de 24V, motobomba de 1,5 HP, tanque de 500 L.

4.2 Metodología

El trabajo se realizó en dos fases, en la primera de las cuales se evaluó comparativamente en ambos invernaderos, el control microclimático en forma manual únicamente (18 marzo a 22 de abril de 2017). 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). Durante el mismo periodo se estableció el cultivo de rábano en los dos invernaderos en las dos fases.

4.2.1 Evaluación del efecto de control microclimático en dos invernaderos manejados ambos de manera manual

4.2.1.1 Invernadero móvil Pachamama

Se trabajó en la forma habitual o tradicional, es decir que 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.

4.2.1.2 Invernadero Convencional

También se trabajó en la forma tradicional en la apertura de las ventanas laterales, 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 este tipo invernaderos (invernaderos Convencionales) en el Centro Experimental Cota Cota, emplean pantallas de sombreo en la estación de verano, por lo cual se mantuvo su uso y se evaluó los parámetros microclimáticos bajo esas condiciones de manejo.

4.2.1.3 Instalación de estación meteorológica

Se contó con la información meteorológica de tres estaciones, ubicadas a una altura de 1,5m de la superficie. La primera estación meteorológica se instaló en el invernadero móvil Pachamama, la segunda estación meteorológica se encuentra en el invernadero Convencional y la tercera estación meteorológica a cielo abierto, a fin de evaluar el efecto de control microclimático

Las estaciones meteorológicas instaladas, miden los parámetros climáticos de Radiación solar (Rs), velocidad del viento (u), temperatura (T), y humedad relativa (HR).

4.2.1.4 Instalación de estaciones de temperatura y humedad de suelo

Se instalaron dos estaciones de temperatura y humedad de suelo, la primera estación se instaló en el invernadero móvil Pachamama y la segunda estación en el invernadero Convencional. En esta fase se activó solo la sonda de temperatura de suelo, estacionado a una profundidad de 0,10m en los dos invernaderos.

4.2.1.5 Recolección de datos meteorológicos y de suelo

Los datos meteorológicos y de suelo fueron almacenados en un Dataloger presente en la consola, en un intervalo de 00 h 15 min durante las 24 horas del día. La descarga de los datos meteorológicos y de suelo se realizó en un ordenador portátil a través de software WeatherLink 6.03 con un intervalo de descarga de datos de 7 días.

4.2.1.6 Variables meteorológicas evaluadas

Se evaluaron los parámetros de radiación solar; temperatura de aire máxima, mínima y promedio; humedad relativa promedio y velocidad del viento promedio. Medidas obtenidos mediante la estación meteorológica y evaluada diariamente. Además de que la presión de saturación de vapor [$e^o(T)$] está en función de la temperatura y se calcula mediante la ecuación:

$$e^o(T) = 0,6108 * e^{\left(\frac{17,27 * T}{T + 237,3}\right)}$$

En cambio, la presión real de vapor se determina indirectamente por medio de la humedad relativa y $e^o(T)$ mediante la ecuación:

$$ea = \frac{e^o(T)}{HR} \times 100$$

También se evaluó la Temperatura de suelo, su evaluación es diaria, medida directamente por la estación de suelo en un intervalo 00 h 15 min.

4.2.2 Evaluación del efecto de control microclimático en dos invernaderos manejados ambos de manera manual y automática

4.2.2.1 Invernadero móvil Pachamama

En este invernadero se instaló el mecanismo electromecánico automatizado de control climático, 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 activa la orden de apertura de ventanas laterales, cenitales, inicio del extractor y ventilador para reducir la temperatura.

Tabla 1.
Limite térmico pre-establecido para apertura y cierre de mecanismos de control de altas temperaturas.

MECANISMO DE CONTROL DE ALTAS TEMPERATURAS	TEMPERATURA DE APERTURA (°C)	TEMPERATURA DE CIERRE (°C)
Ventanas laterales	32	30
Ventanas cenitales	35	30
Extractor	37	35
Ventilador	40	37

El riego se aplicó en base al contenido de agua del suelo mediante un controlador automático que funciona en base a la información provista por los sensores de humedad del suelo.

Tabla 2.
Limite pre-establecidos de humedad del suelo para riego.

MECANISMO DE RIEGO	HUMEDAD DE ENCENDIDO (%) PMP	HUMEDAD DE APAGADO (%) CC
Electrovalvula	20,6	36,4

Nota. Los valores se obtuvieron en base a la textura del suelo y mediante la aplicación del software Soil Wáter Characteristics.

4.2.2.2 Invernadero Convencional

Con fines comparativos en este invernadero se trabajó de forma tradicional, lo que significa que la apertura de ventanas se realizó por percepción térmica y disponibilidad del personal aproximadamente abriendo a las 10 h 00 min y cerrando a las 17 h 00 min. Asimismo en el Centro Experimental Cota Cota en invierno y primavera no emplean pantallas de sombreado por lo cual no se empleó en el invernadero Convencional. Del mismo modo que la primera fase, la activación del riego fue manual.

4.2.2.3 Instalación de la estación de temperatura y humedad de suelo

La Instalación de estación de suelo se realizó con la misma metodología de la primera fase, explicado anteriormente en el apartado 4.2.1.4. Asimismo se activó los sensores de humedad del suelo estacionado a una profundidad de 0,10 m en los dos invernaderos.

4.2.2.4 Variables meteorológicas evaluadas

Todas las variables microclimáticas y de suelo se siguieron de acuerdo a la misma metodología utilizada en la primera fase. Adicionando en esta segunda fase la variable humedad de suelo, evaluado en general diariamente pero medida con la estación con una frecuencia de 00 h 15 min.

4.2.3 Cuantificación del impacto de elevadas temperaturas sobre el rendimiento de hortalizas de producción típicas en la zona de estudio

El impacto de las elevadas temperaturas fue medido a través del rendimiento y las variables agronómicas del cultivo, de acuerdo al siguiente detalle.

Se evaluaron en dos fases las variables agronómicas.

4.2.3.1 Primera fase (en fecha 2017-03-18 a 2017-04-22).

4.2.3.1.1 Manejo de cultivo

Suelo

Con el fin de controlar el efecto de variación de la fertilidad del suelo en el cultivo de Rábano (*Raphanus sativus* L. cv. Crimson Giant), se procedió a homogenizar el suelo, extrayendo un volumen consecuente de una superficie de 3m x 3m x 0,30m, 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, se tomó una muestra de 1 Kg de suelo para efectuar el análisis de parámetros físicos los cuales se hicieron en el Laboratorio de Suelos y Aguas de la Facultad de Agronomía de la UMSA.

Fertilización orgánica

Se aplicó similar cantidad de compost con activador Yogurt en una tasa de 1Kg m⁻² (total de 9 Kg por invernadero).

Siembra

La siembra en ambos invernaderos se hizo de manera directa, en surcos y por golpe, a una densidad de planta de 11,1 kg/ha, marco de plantación 15x10 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.

Riego

En ambos invernaderos, el sistema de riego usado fue el goteo localizado, con un caudal de $0,71 \text{ L h}^{-1}$, distribuido entre cinta de goteo $0,30 \text{ m}$ y entre emisor $0,30 \text{ m}$ con un tiempo de riego de $00 \text{ h } 40 \text{ min}$ e intervalo entre riegos días lunes, martes y viernes; esta es la distancia estándar, tiempo e intervalo de riego de trabajo en el Centro Experimental Cota Cota, la cual ha dado buenos resultados productivos y poca pérdida de agua, por lo que se mantuvo su uso (riego manual).

El agua empleada para el riego proviene del pozo, construido para la provisión de agua a todo el sistema de riego del Centro Experimental Cota Cota. Su composición química expresada en mg L^{-1} es:

Tabla 3.
Propiedades químicas del agua de tanque (agua de pozo).

Na^+ mg L^{-1}	K^+ mg L^{-1}	Ca^{++} mg L^{-1}	Mg^{++} mg L^{-1}	Cl^- mg L^{-1}	CO_3^{2-} mg L^{-1}	HCO_3^- mg L^{-1}	SO_4^{2-} mg L^{-1}	CE μScm^{-1}	PH	RAS_{aj} mEq L^{-1}
142,15	2,18	51,06	26,03	41,50	9,25	369,50	118,00	929,50	8,30	4,78

Presentando un grado de restricción, de uso ligero o moderado, con respecto a potenciales problemas de salinización y la velocidad relativa de infiltración del agua de suelo (Ayers y Westcont, 1985 citado por Olías, Cerón, & Fernández, 2005). Según la norma Riverside se trata de un agua C3-S1 (salinidad alta, con bajo contenido de sodio apta para riego de suelos con buen drenaje).

Plagas y enfermedades

No se presentaron problemas de plagas y enfermedades debido a prácticas preventivas como remoción y mezcla de suelos, empleo de compost desinfectado y semilla certificada por Bonanza y corroborado por el Instituto Nacional de Innovación Agropecuaria y Forestal (INIAF).

4.2.3.2 Variables agronómicas

Medición del porcentaje de emergencia

En la realización de esta variable se hizo conteos diarios de las plántulas emergidas de toda el área experimental (9 m²), durante catorce días desde el momento de la siembra (600 semillas sembradas). Determinando así, el porcentaje de emergencia diaria.

Medición de la Altura de planta

La altura de planta se evaluó al final del ciclo del cultivo, 9 plantas representativas, las medidas fueron tomadas desde la base del tallo de la planta hasta el ápice superior de la hoja, con una regla métrica graduado en centímetros (grado de incertidumbre de 0,1 cm)

Medición de la cobertura vegetal

La cobertura vegetal se evaluó durante el ciclo del cultivo, cada 3 días, a partir de la siembra hasta la cosecha, las medidas fueron obtenidas a partir de fotografías tomadas a una altura de 2m (resolución de 16,1 Mega pixeles (MP)), de 4 muestras aleatorias de 1m² de superficie cada una. Se estimó la cobertura mediante un proceso digital de imágenes con el software Cobcal 2.

Medición del Área foliar

Para determinar área foliar, en cada invernadero se evaluó a 9 plantas representativas de toda el área experimental después de la cosecha, inmediatamente se procedió a desojar toda la planta y se derivó a tomar la fotografía a las todas las hojas por planta junto a un calibre de área conocida (monedad de 1 Bs) a una altura de 0,50 m (resolución 16 MP). Se calculó el área foliar mediante un proceso digital de imágenes con el software Sigma Scan Pro 5.0 previamente haciendo una limpieza de la imagen con Photoshop Adobe CS5.

Índice de Área foliar (IAF)

A partir del valor obtenido del área foliar por planta ($\text{cm}^2 \text{ planta}^{-1}$) se consiguió calcular el área foliar de una superficie de 1m^2 , utilizando la densidad de siembra. Esta operación permitió determinar la relación entre el área foliar y el área del suelo cubierta por la planta (IAF) (Palma, 2007 citado por Segales, Rodríguez, Miranda, Trigo, & Bosque, 2013).

$$IAF = \frac{\text{Área foliar}}{\text{Área del suelo}} = \frac{\text{m}^2}{\text{m}^2}$$

Peso de raíz y rendimiento

El peso de la raíz se evaluó una vez cosechado de 9 plantas representativas, con un corte se las separó la parte subterránea (raíz) y la parte aérea (hojas) las medidas fueron tomadas con una balanza analítica de precisión 1g, para el rendimiento se transformaron el peso promedio de raíces a t ha^{-1} utilizando la densidad de siembra y porcentaje de emergencia.

$$\text{Rendimiento} = \frac{\text{Peso de raíz (t)}}{\text{Superficie (ha)}}$$

Peso de hojas y rendimiento

El peso de las hojas se evaluó una vez cosechado de 9 plantas representativas, las medidas fueron tomadas con una balanza analítica de precisión 1g, para el rendimiento se transformaron el peso promedio de hojas a t ha^{-1} utilizando la densidad de siembra y porcentaje de emergencia.

$$\text{Rendimiento} = \frac{\text{Peso de hoja (t)}}{\text{Superficie (ha)}}$$

Medición del porcentaje de Materia seca

Las plantas fueron divididas en hojas y raíz y pesadas en su estado natural (húmedo). Para acelerar el secado de la raíz del rábano se procedió a cortarlos en rodajas 3 mm

de espesor. Cada órgano se pesó por separado después de haber permanecido en una estufa a 65°C durante aproximadamente 72 horas hasta obtener peso constante.

4.2.3.3 Segunda fase (en fecha 2017-09-08 a 2017-10-10).

4.2.3.3.1 Manejo de cultivo

Suelo

Una vez concluida la primera 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, con el fin de empezar la segunda fase con la misma cantidad de nutrientes. Para esto se realizó el muestreo de suelo operando en zigzag en toda la parcela tomando 20 muestras individuales las mismas que se juntaron y cuartearon para formar una muestra compuesta representativa. Se tomó dos muestras de 1Kg de suelo en cada invernadero para efectuar el análisis de parámetros químicos en el Laboratorio de Suelos y Aguas de la Facultad de Agronomía UMSA y en el Laboratorio de Calidad Ambiental (LCA) del Instituto de Ecología dependiente de la Facultad de Ciencias Puras y Naturales de la UMSA.

Fertilización orgánica

Para determinar la dosis de fertilizante orgánico se tomó una muestra de 1Kg de compost con activador Yogurt (el mismo empleado en la primera fase), se determinó los parámetros físico y químico en el Laboratorio de Calidad Ambiental (LCA).

Siembra

La siembra se realizó con la misma metodología de la primera fase, explicado anteriormente en el apartado 4.2.3.1.1.

Riego

En el invernadero móvil Pachamama el riego difiere de la metodología de la primera fase en el tiempo e intervalo de riego y disponibilidad del personal. En esta fase el riego es aplicado en base al contenido de agua del suelo, activado y desactivado automáticamente la válvula eléctrica por medio de un controlador que funciona en base a la información provista por los sensores de humedad del suelo.

En el invernadero Convencional se repitió la metodología de la primera fase, explicada anteriormente en el apartado 4.2.3.1.1.

Plagas y enfermedades

En el invernadero móvil Pachamama no se presentaron problemas de plagas y enfermedades pero si en el invernadero Convencional, donde se observaron pulgones que afectaron a las plántulas emergidas. Para su control se empleó insecticida Cypertrin 250 EC 0.4 ml/1L (insecticida empleado para el control de plagas en la Centro Experimental Cota Cota), aplicado el día 10 del ciclo de cultivo (se aplicó una sola vez).

4.2.3.3.2 Variables agronómicas

Para la segunda fase se midieron las mismas variables agronómicas y con la misma metodología de primera fase (apartado 4.2.3.1.2).

4.2.4 Análisis estadístico

4.2.4.1 Evaluación del efecto de control microclimático en dos invernaderos manejados ambos de manera manual comparados con un manejo manual y automático simultaneo

Para evaluar este objetivo se recurrió a la estadística descriptiva, utilizando parámetros estadísticos como la media aritmética (promedio), desviación estándar, rango, valor máximo y mínimo.

4.2.4.2 Cuantificación del impacto de elevadas temperaturas sobre el rendimiento de hortalizas de producción típicas en la zona de estudio

Para evaluar este objetivo se recurrió a la estadística inferencial prueba t de Student con el fin de determinar si difieren entre sí de manera significativa respecto a sus medias en cada variable a una significancia de 0,05%.

5 RESULTADOS Y DISCUSION

5.1 Evaluación del efecto de control microclimático en dos invernaderos manejados ambos de manera manual

5.1.1 Radiación solar

La radiación solar transmitida al invernadero móvil Pachamama en promedio es de 25,9% ($8,04 \text{ MJ m}^{-2}\text{dia}^{-1}$) superior a la radiación solar que atraviesa la cubierta del invernadero Convencional (transmisividad) de 17,7% ($5,51 \text{ MJ m}^{-2}\text{dia}^{-1}$) en comparación a cielo abierto $31,08 \text{ MJ m}^{-2}\text{dia}^{-1}$. Similarmente en un estudio análogo en el Centro Experimental Cota Cota (CECC), Butrón (2017) determinó la radiación solar diaria recibida al interior del invernadero (invernadero Convencional) resultando en promedio un 60,7% más baja que la recibida en el ambiente externo del invernadero, es decir el invernadero solo recibió 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 (Figura 3) se debe al empleo de pantallas de sombreado, método que es empleado en esos periodos por el Centro Experimental Cota Cota para evitar quemaduras de plantas.

Sin embargo la presencia de nubes reduce la radiación solar directa, lo cual se observa una variabilidad de la curva de radiación solar promedio diario a cielo abierto (Figura 3), afectando en las mismas proporciones en los invernaderos, al respecto Castilla (2005) indica que la nubosidad, la turbidez y transparencia de la atmosfera tienen una gran influencia en las proporciones de radiación solar directa y difusa.

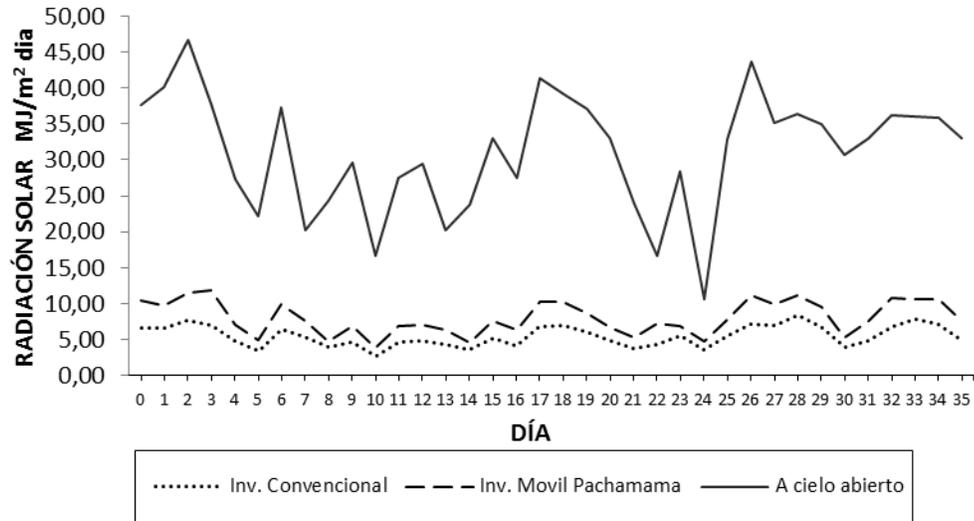


Figura 3. Comportamiento de la radiación solar en el invernadero Convencional, invernadero móvil Pachamama y a cielo abierto, desde 18 de marzo hasta 22 de abril de 2017 (Primera fase).

La evolución de la intensidad de radiación solar en el invernadero Convencional, invernadero móvil Pachamama y a cielo abierto, durante el transcurso de un día muestra que las máximas diferencias se producen en horas de máxima insolación (Figura 4). Castilla (2005) indica: La primera alteración que genera el invernadero sobre los parámetros microclimáticos es una reducción de la radiación solar.

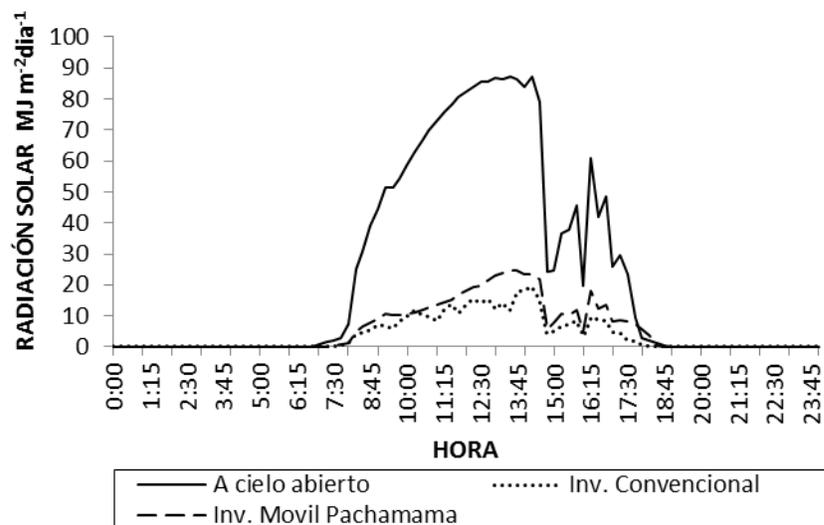


Figura 4. Evolución de la intensidad de radiación solar horaria en el invernadero Convencional, invernadero móvil Pachamama y a cielo abierto, día 20 de marzo de 2017 (Primera fase).

En la Figura 4, se observa que la nubosidad afecta drásticamente al paso de la radiación solar, reduciendo la intensidad solar a cielo abierto a partir de las 15 h 00 min, como también reduciendo en la misma magnitud en el invernadero móvil Pachamama y en el invernadero Convencional.

5.1.2 Temperatura de aire

La evolución de la temperatura del aire varía con la evolución de la radiación solar como se observa en la Figura 5, generando un aumento de temperatura en los invernaderos, muy evidente de día, en relación a cielo abierto. Se observa que la temperatura de aire del invernadero móvil Pachamama es superior a la del invernadero Convencional. Por otra parte, se puede observar que las curvas de los invernaderos presentan un comportamiento irregular a diferencia a cielo abierto que es regular. 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 observa 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 sucede 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. Por otra parte se observa 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).

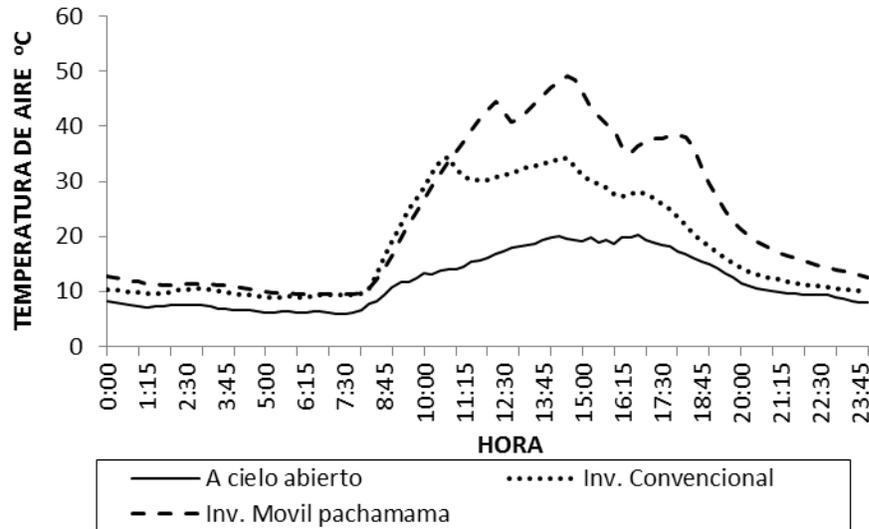


Figura 5. Evolución horaria de la temperatura de aire en el invernadero Convencional, invernadero móvil Pachamama y a cielo abierto, día 20 de marzo de 2017 (Primera fase).

Estos comportamientos se observan durante casi todo el periodo de evaluación como se muestra en la Figura 6, habiendo registrado en promedio la temperatura máxima en el invernadero móvil Pachamama de 43,55°C mientras que en el invernadero Convencional se observó 33,45°C y a cielo abierto 19,14°C. Asimismo se observa en la Figura 6, en algunos días generalmente en los días domingos la temperatura máxima registrada alcanzó 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 es 25,00°C. Nuevamente se comprueba que el control microclimático de altas temperaturas de manera tradicional o manual es ineficiente e insuficiente por no estar presente diariamente el personal en los invernaderos.

En relación a las temperaturas mínimas promedio durante el ciclo de cultivo se observa que no hay diferencias significativas en los invernaderos, siendo prácticamente iguales (invernadero móvil Pachamama 10,10°C e invernadero Convencional 9,55°C), en ambos casos las temperaturas mínimas son superior a la temperaturas mínimas promedio a cielo abierto registrado 7,03°C (más información ver Anexo 10).

En definitiva los valores medios de temperatura de aire durante el ciclo de cultivo en el invernadero móvil Pachamama fueron de $26,83^{\circ}\text{C}$ con una amplitud térmica de $33,45^{\circ}\text{C}$, en el invernadero Convencional la temperatura promedio fue de $21,50^{\circ}\text{C}$, con una amplitud térmica de $23,89^{\circ}\text{C}$ y en promedio la temperatura a cielo abierto fue de $13,09^{\circ}\text{C}$ con una amplitud térmica de $12,12^{\circ}\text{C}$ como se muestra la Figura 6. Siendo superior en promedio entorno a cielo abierto el invernadero móvil Pachamama en $105,0\%$ y el invernadero Convencional en $64,3\%$. Como menciona Castilla (2005) la temperatura del aire dentro del invernadero es el resultado del balance energético del abrigo. Por otra parte Alpi & Tognoni (1991) indican que la temperatura de un invernadero dependen en su mayor parte del efecto invernadero que nace, por una parte, de la radiación solar y, por otra de la impermeabilidad de los materiales de recubrimiento a las radiaciones calóricas. Asimismo Castilla (2005) menciona que la renovación del aire permite evacuar calor en exceso y reducir la temperatura del aire. Por tanto la elevada temperatura del invernadero móvil Pachamama se debe a la cantidad de radiación solar que es transmitida (mayor al invernadero Convencional), a la impermeabilidad e inercia del material de cubierta (resina reforzado con fibra de vidrio) y a la menor superficie de ventilación natural ($2,93\%$).

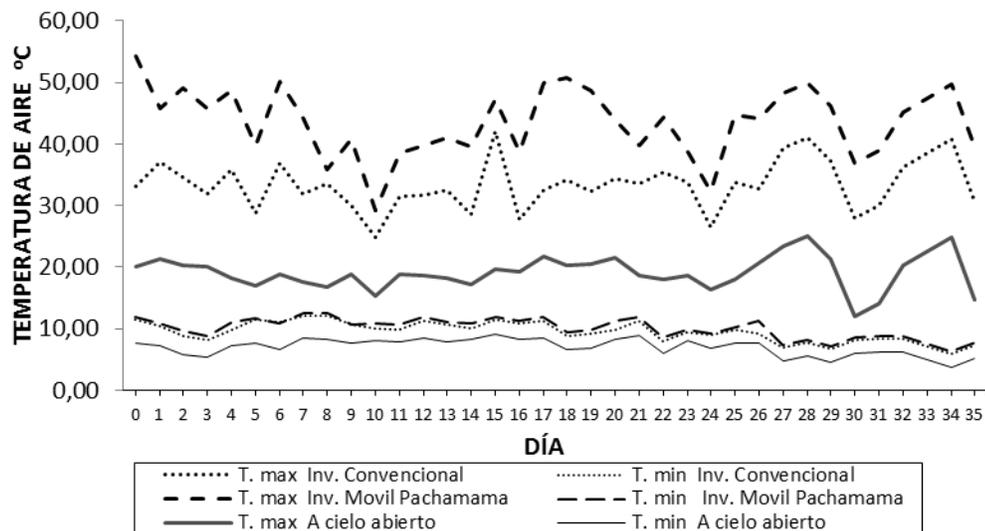


Figura 6. Comportamiento diarios de las temperaturas de aire máximas y mínimas, en el invernadero Convencional, invernadero móvil Pachamama y a cielo abierto, desde 18 de marzo hasta 22 de abril de 2017 (Primera fase).

5.1.3 Viento

La velocidad del viento determinada a cielo abierto en promedio durante todo el ciclo de cultivo fue de $0,1\text{ms}^{-1}$ (Figura 7), valor que representa a una localidad con muy baja velocidad del viento y $0,0\text{ms}^{-1}$ en el invernadero móvil Pachamama tanto como en el invernadero Convencional.

Al respecto Butrón (2017) recomienda, para tomar en cuenta el término aerodinámico en invernaderos para el cálculo de la ETo emplear $0,01\text{ms}^{-1}$ (valor estimado) como velocidad del viento debido a que su medición directa prevé resultados de cero, incluso asevera con una estimación del valor del viento de $0,1\text{ms}^{-1}$, no produce un error práctico de magnitud. 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 Thipe (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 (Figura 7) 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 las elevadas temperaturas del invernadero, escapa del interior del invernadero hacia el exterior, por medio de una abertura (ventanas laterales).

Por otra parte Papadakis et al.(1996) menciona que las ventanas cenitales y laterales son más eficaces que con solo ventanas laterales. Igualmente IDAE (2008) recomienda disponer como mínimo una superficie de ventilación del 20 al 30% de la superficie de suelo cubierta por el invernadero, destinando 1/3 de la superficie total de ventilación a

las ventanas cenitales, de forma que facilite la ventilación por efecto «chimenea» cuando la velocidad del viento es pequeña.

Al respecto, en el invernadero móvil Pachamama se cuenta con un porcentaje de superficie de ventilación del 2,37% en las ventanas cenitales y 0,56% en las ventanas laterales, siendo insuficiente para permitir evacuar el calor en exceso (Figura 6) y reducir la temperatura, mientras en el invernadero Convencional presenta 14,27% en las ventanas laterales.

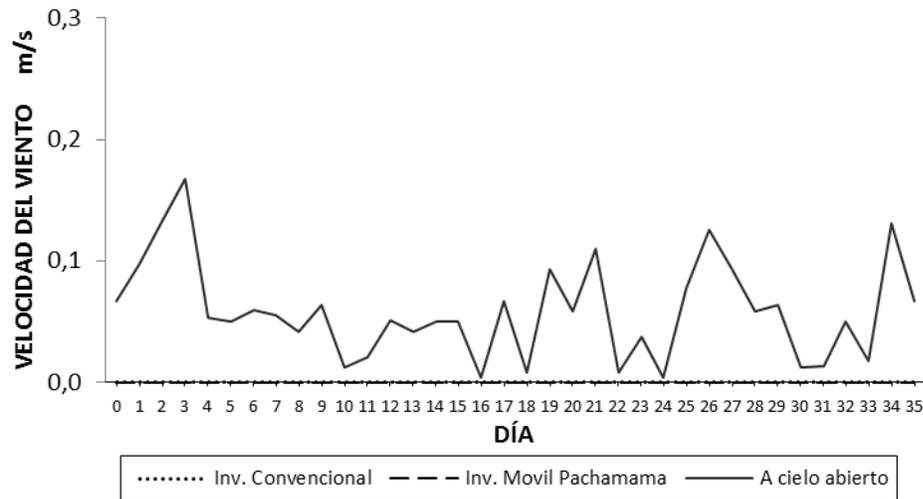


Figura 7. Comportamiento diarios de velocidad del viento, en el invernadero Convencional, invernadero móvil Pachamama y a cielo abierto, desde 18 de marzo hasta 22 de abril de 2017 (Primera fase).

5.1.4 Humedad relativa (HR)

La evolución de la humedad relativa (HR) es inversamente proporcional a la temperatura del aire, como se observa en la Figura 8, generando una reducción de la HR de manera logarítmica a partir de las 08 h 30 min en el invernadero móvil Pachamama y a las 09 h 30 min en el invernadero Convencional, Asimismo la HR mínima ocurre a las 12 h 15 min en el invernadero móvil Pachamama manteniéndose hasta las 16 h 15 min, de igual manera en el invernadero Convencional la HR mínima ocurre a las 12 h 15 min hasta las 15 h 00 min. Siendo este desfase producto de la inercia a la emisión de la radiación terrestre por medio del material de cubierta (altas temperaturas), cuyo efecto se observar que la curva de la HR del invernadero móvil

Pachamama sea inferior a la curva de HR del invernadero Convencional y ambos mucho menor a cielo abierto (Figura 8).

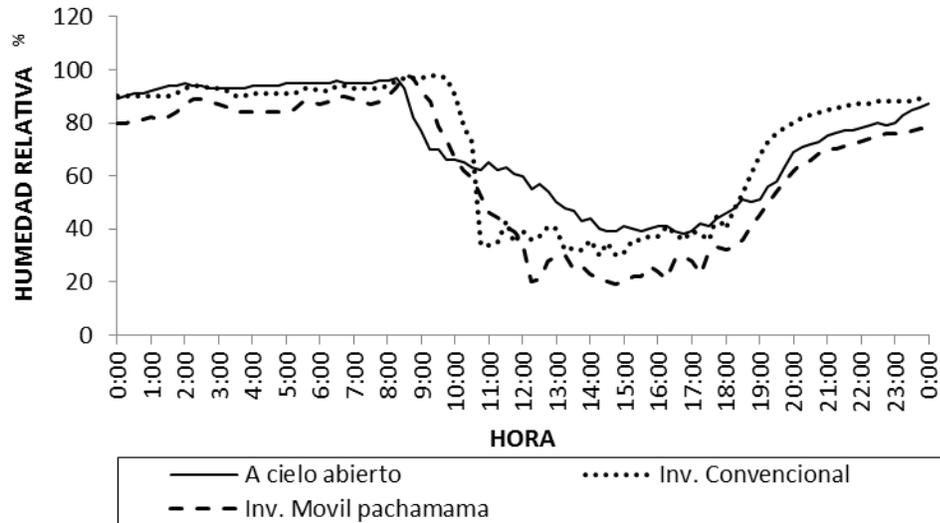


Figura 8. Evolución horaria de la humedad relativa del aire en el invernadero Convencional, invernadero móvil Pachamama y a cielo abierto, día 20 de marzo de 2017 (Primera fase).

Estos comportamientos (Figura 8) se observan durante todo el periodo de evaluación (Figura 9), habiendo registrado en promedio la HR mínima en el invernadero móvil Pachamama de 30,4% mientras que en el invernadero Convencional fue 37,0% y a cielo abierto 46,8% (ver anexo 12), además la variabilidad de la curva de HR mínima a cielo abierto es causado por la oferta de agua por parte de la atmosfera (precipitación), afectando de manera proporcional a la HR mínima de los invernaderos.

Asimismo se observa en la Figura 9, las HR máximas, no habiendo diferencias significativas en los invernaderos y a cielo abierto (invernadero móvil Pachamama 98,7%, invernadero Convencional 97,7% y a cielo abierto de 95,4%). La FAO (2002) bajo las investigaciones realizadas señala que conforme la temperatura decrece en el invernadero la HR aumenta y puede alcanzar valores próximos a la saturación, de este modo durante la noche la evapotranspiración tiene poca importancia debido a que la transpiración queda reducida por causa del cierre de estomas y la evaporación del suelo es insignificante porque el déficit de presión de vapor es pequeño.

Al respecto de los valores medios de la HR durante el ciclo de cultivo en el invernadero móvil Pachamama fueron de 64,6%, mientras invernadero Convencional la HR promedio fue de 67,4% y a cielo abierto 71,1%. Para Seginer (2002) citado por Villagrán (2016) indica que valores menores al 50% aumenta la tasa de transpiración de los cultivos generando condiciones de estrés hídrico y valores superiores al 90% incrementa el riesgo de incidencia de enfermedades principalmente hongos al aumentar la posibilidad de que se produzca condensación sobre el cultivo. Por otro lado Kittas y Bartzanas (2007) citado por Thipe (2014) señala que uno de los objetivos del cultivo en invernadero es aumentar la HR.

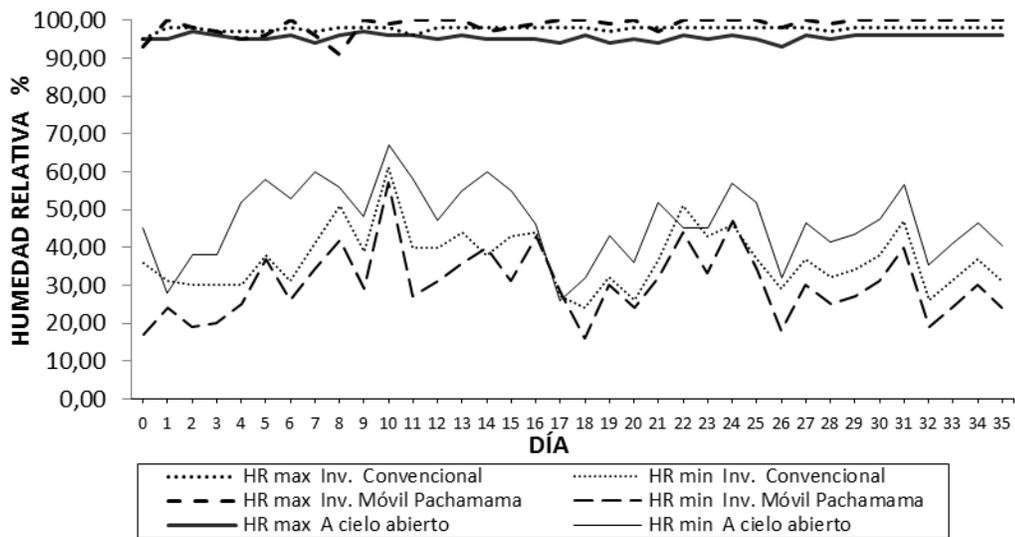


Figura 9. Comportamiento diarios de la humedad relativa máximas y mínimas, en el invernadero Convencional, invernadero móvil Pachamama y a cielo abierto, desde 18 de marzo hasta 22 de abril de 2017 (Primera fase).

5.1.5 Presión de saturación y presión real de vapor

La presión de saturación de vapor promedio durante el ciclo de cultivo en el invernadero móvil Pachamama es de 5,22KPa una presión mayor al invernadero Convencional 3,23KPa y a cielo abierto es 1,62KPa (Figura 10), debido a las altas temperaturas que se registra. 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 HR puede disminuir con el aumento de la temperatura.

Así, bajo estos escenarios la presión real de vapor promedio en el invernadero móvil Pachamama es de 3,33KPa, mayor al invernadero Convencional presentando 2,17KPa y a cielo abierto se registró 1,15KPa (Figura 10). 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 para 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 1,89KPa a diferencia del invernadero Convencional su DVP es 1,06KPa y a cielo abierto 0,47KPa de DVP (más información ver Anexo 13).

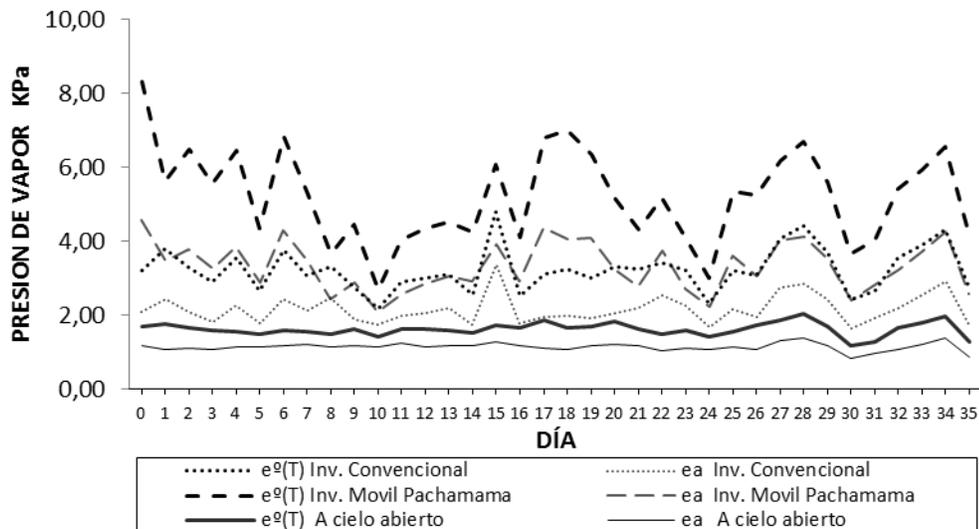


Figura 10. Comportamiento diario de presión de saturación de vapor $e^o(T)$ y presión real de vapor (ea), en el invernadero Convencional, invernadero móvil Pachamama y a cielo abierto, desde 18 de marzo hasta 22 de abril de 2017 (Primera fase).

5.1.6 Temperatura del suelo

La temperatura promedio del suelo determinado en invernadero móvil Pachamama (18,71°C) fue superior al invernadero Convencional (16,87°C) como se observa en el Anexo14 y Figura 11. Esta diferencia se debe a la transmisión de calor de las altas temperaturas del aire hacia el suelo, según Porta, López-Acevedo, & Roquero (1994) el calor puede ser transmitido de un compartimiento a otro del suelo o intercambiando con la atmosfera. Asimismo otro factor importante se debería a la evaporación del suelo, ya que en el invernadero móvil Pachamama se tiene mayor humedad absoluta como indica la presión real de vapor (Figura 10) Además los procesos más importantes de transmisión de calor en el suelo son la conducción, la convección, la radiación, la evaporación y la condensación (Porta et al., 1994).

En la Figura 11 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.

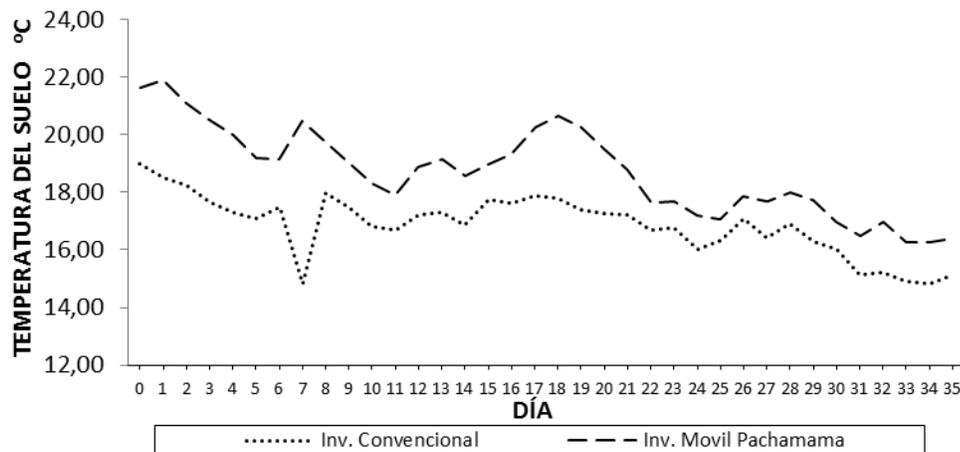


Figura 11. Comportamiento diario de la temperatura del suelo en el invernadero Convencional, invernadero móvil Pachamama y a cielo abierto, desde 18 de marzo hasta 22 de abril de 2017 (Primera fase).

5.2 Evaluación del efecto de control microclimático en dos invernaderos manejados ambos de manera manual y automática

5.2.1 Radiación solar

En esta segunda fase la radiación solar transmitida al invernadero móvil Pachamama en promedio es de 22,5% ($8,50 \text{ MJ m}^{-2}\text{día}^{-1}$) no tan diferente a la primera fase 25,9% ($8,04 \text{ MJ m}^{-2}\text{día}^{-1}$), 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 es 45,5% ($17,22 \text{ MJ m}^{-2}\text{día}^{-1}$), demostrando que al emplear pantallas de sombreo en el invernadero Convencional reduce la intensidad de radiación de un $17,22 \text{ MJ m}^{-2}\text{día}^{-1}$ (45,5% radiación que es transmitida por la cubierta de polietileno de baja densidad) a $5,51 \text{ MJ m}^{-2}\text{día}^{-1}$ (17,7% radiación que es transmitida por la pantallas de sombreo), 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 $37,73 \text{ MJ m}^{-2}\text{día}^{-1}$ superior a la radiación solar de la primera fase ($31,08 \text{ MJ m}^{-2}\text{día}^{-1}$) (Figura 13).

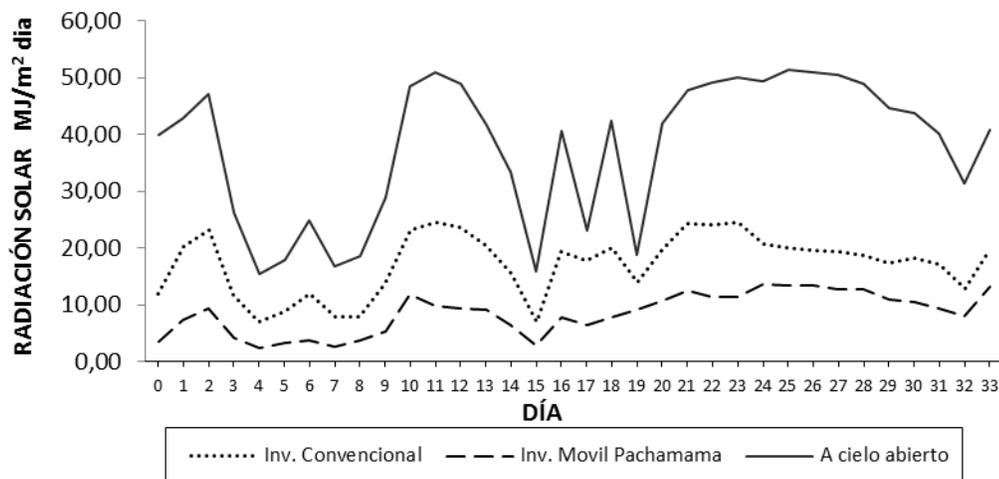


Figura 12. Comportamiento de la radiación solar en el invernadero Convencional, invernadero móvil Pachamama y a cielo abierto, desde 8 de septiembre hasta 10 de octubre de 2017 (Segunda fase)

Sin embargo se observa una variabilidad de la curva de radiación solar promedio diario a cielo abierto (Figura 12), debido a la presencia de nubes, afectando en las mismas proporciones en los invernaderos, al respecto Castilla (2005) indica que las proporciones de radiación solar directa y difusa está relacionada con la nubosidad, la turbidez y transparencia de la atmosfera.

Vista la evolución de la intensidad de la radiación solar durante el transcurso de un día en el invernadero Convencional, invernadero móvil Pachamama y a cielo abierto, muestra que las máximas diferencias se producen en horas de máxima insolación (Figura 13). Además se observa que no hubo nubosidad el día 20 de septiembre que interfiera al paso de la radiación solar, pero las irregularidades de la curva de transmisión de radiación solar en el invernadero Convencional se debe a la estructura de soporte del invernadero, mientras en el invernadero móvil Pachamama la curva de transmisión de radiación solar es perfecta debido a que este invernadero no presenta estructura de soporte del invernadero.

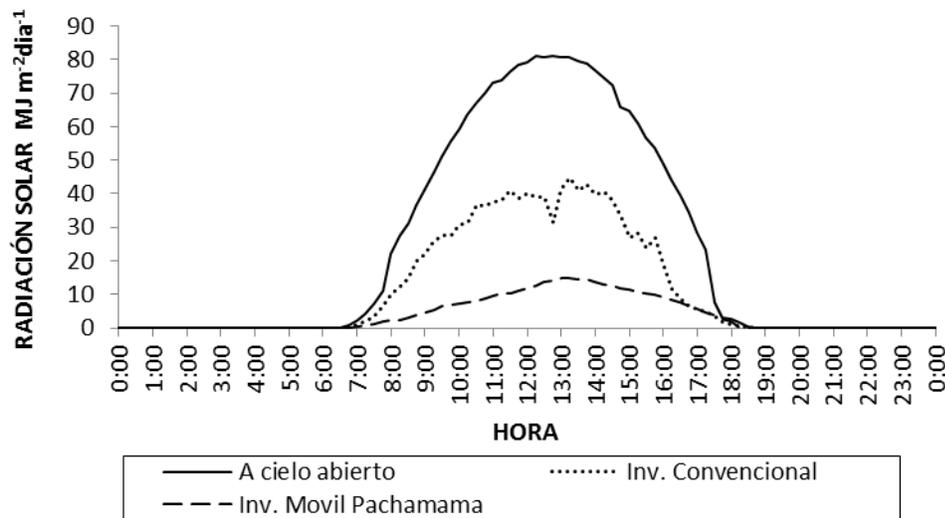


Figura 13. Evolución de la intensidad de radiación solar horaria en el invernadero Convencional, invernadero móvil Pachamama y a cielo abierto, día 20 de septiembre de 2017 (Segunda fase).

5.2.2 Temperatura de aire

En esta fase la temperatura del invernadero móvil Pachamama es inferior a la temperatura del invernadero Convencional, además se observar en la Figura 14, que

las curvas de las temperaturas de los invernaderos presentan un comportamiento irregular a diferencia a cielo abierto que es regular. 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 un 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 como se observa en la Figura 14, 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.

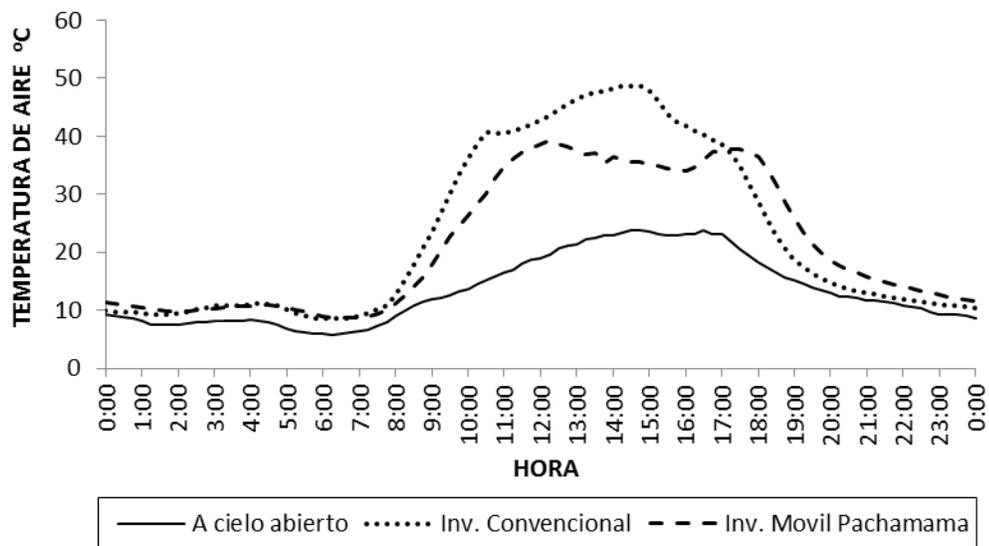


Figura 14. Evolución horaria de la temperatura de aire en el invernadero Convencional, invernadero móvil Pachamama y a cielo abierto, día 20 de septiembre de 2017 (Segunda fase).

Estos comportamientos se observan durante todo el periodo de evaluación como se muestra en la Figura 14, habiendo registrado en promedio la temperatura máxima en el invernadero móvil Pachamama 37,61°C menor a la primera fase (43,55°C) y menor al invernadero Convencional 39,71°C, asimismo a cielo abierto la temperatura máxima promedio es 20,16°C superior en 1,02°C en la primera fase.

Del mismo modo se observa en la Figura 15, 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) aclarando que en esta segunda fase la radiación solar recibida a cielo abierto ($37,73 \text{ MJ m}^{-2}\text{dia}^{-1}$) es mucho mayor a la primera fase ($31,08 \text{ MJ m}^{-2}\text{dia}^{-1}$) por ende tendría que ser mucho mayor la temperatura del aire en el invernadero móvil Pachamama ya que está en función de la intensidad de radiación y propiedades radiométricas del material de cubierta, mostrando es si un manejo eficiente de altas temperaturas.

Mientras en el invernadero Convencional se registran en algunos días generalmente domingos temperaturas máximas de 56,40°C superior en 14,40°C a la primera fase y lo máximo registrado a cielo abierto es 26,40°C superior a la primera fase en 1,40°C. Nuevamente se comprueba que el control microclimático de altas temperaturas de manera tradicional o manual es ineficiente e insuficiente por no estar presente diariamente el personal en los invernaderos.

Nuevamente revisando sus temperaturas mínimas promedio de aire durante el ciclo de cultivo se observa que no hay 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 son superior a la temperaturas mínimas promedio a cielo abierto 5,22°C que es inferior a la primera fase a cielo abierto (más información ver Anexo 16).

En definitiva los valores medios de temperatura de aire durante el ciclo de cultivo en el invernadero móvil Pachamama es 22,65°C con una amplitud térmica de 29,93°C, en el invernadero Convencional temperatura promedio es 23,55°C, amplitud térmica 32,32°C

y en último la temperatura promedio a cielo abierto es 12,69°C con una amplitud térmica de 14,95°C como se muestra la Figura 15. Siendo superior en promedio entorno a cielo abierto el invernadero móvil Pachamama en 78,5% y el invernadero Convencional en 85,6%.

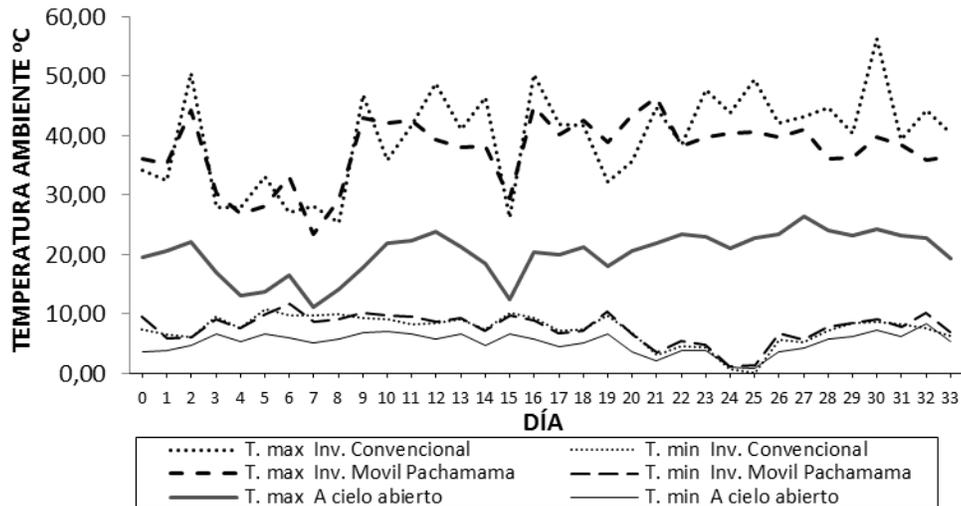


Figura 15. Comportamiento diarios de las temperaturas de aire máximas y mínimas, en el invernadero Convencional, invernadero móvil Pachamama y a cielo abierto, desde 8 de septiembre hasta 10 de octubre de 2017 (Segunda fase).

5.2.3 Viento

La velocidad del viento determinado a cielo abierto en promedio durante todo el ciclo de cultivo es $0,1\text{ms}^{-1}$, permaneciendo igual que en la primera fase y $0,0\text{ms}^{-1}$ en los invernaderos (ver Anexo 18). Asimismo se observa en la Figura 16, que hubo un máximo viento el día 23, con una velocidad de viento de $0,3\text{ms}^{-1}$ a cielo abierto y con una influencia en el invernadero móvil Pachamama de $0,2\text{ms}^{-1}$ y $0,0\text{ms}^{-1}$ en el invernadero Convencional. Este efecto solo al invernadero móvil Pachamama se debe a que en ese día (Domingo) las ventanas estuvieron abiertas permitiendo el ingreso del viento, mientras en el invernadero Convencional el personal no abrió las ventanas, comprobando esto por las elevadas temperaturas que presentó ese día ($47,7^{\circ}\text{C}$).

De la misma forma no se registró el efecto del ventilador (ventilación forzada) en el invernadero móvil Pachamama por la estación meteorológica, debido al menor alcance de flujo de aire provocado por el ventilador, ya que la distancia de separación del

ventilador y la estación meteorológica estuvo a 5,1 m y su alcance solo fue 4,5 m. Por lo tanto la ASAE (1981) citado por IDAE (2008) establece una serie de normas para el diseño y control de los sistemas de ventilación forzada, lo cual indica que la distancia entre dos ventiladores contiguos no debe ser superior a 7,5 m para asegurar la uniformidad en el flujo del aire.

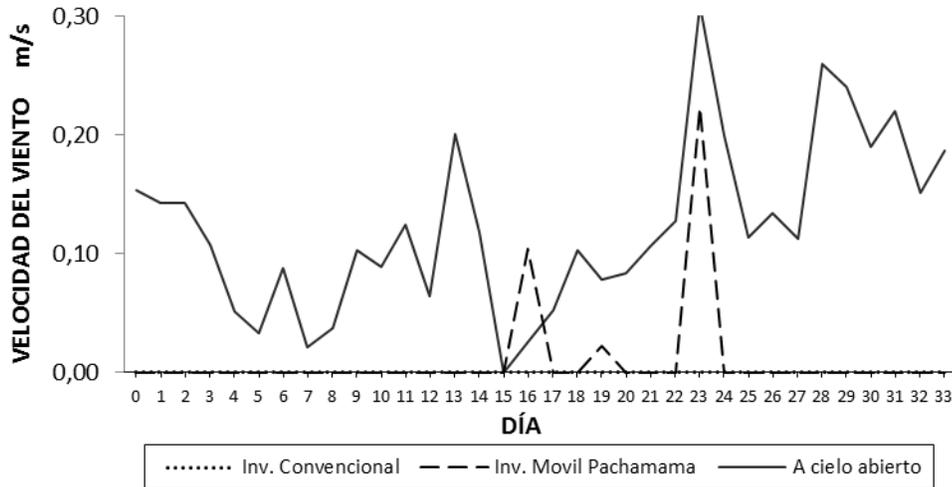


Figura 16. Comportamiento diarios de velocidad del viento, en el invernadero Convencional, invernadero móvil Pachamama y a cielo abierto, desde 8 de septiembre hasta 10 de octubre de 2017 (Segunda fase).

5.2.4 Humedad relativa (HR)

En la Figura 17, se observa que se genera una reducción de la HR de manera logarítmica a partir de las 07 h 45 min en el invernadero móvil Pachamama y a las 09 h 00 min en el invernadero Convencional, Asimismo la HR mínima ocurre a las 12 h 15 min en el invernadero móvil Pachamama manteniéndose hasta las 16 h 45 min y posteriormente asciende de manera exponencial, de igual manera en el invernadero Convencional la HR mínima ocurre a las 12 h 00 min hasta las 17 h 45 min y posteriormente asciende de manera exponencial. Ocurren nuevamente el desfase producto de la inercia a la emisión de la radiación terrestre por medio del material de cubierta y la variación de la HR se produce porque la presión de saturación de vapor depende de la temperatura del aire. Como la temperatura del aire cambia durante el día, la HR también cambia substancialmente (Allen, Pereira, Raes, & Smith, 2006).

Además, la curva de la HR del invernadero Convencional, a partir desde las 11 h 30 min hasta 18 h 00 min presenta un comportamiento semejante a la curva de la HR a cielo abierto, ya que la cantidad de moléculas de agua que se pueden almacenar en el aire depende de la temperatura, cuanto más alta es la temperatura más alta es la capacidad de almacenar vapor de agua (Allen et al., 2006). Esclareciendo que la capacidad de almacenar vapor de agua es distinta en el invernadero Convencional y a cielo abierto (diferentes temperaturas). Por otro lado la FAO (2002) indica que las plantas tienen que transpirar para refrigerarse, entonces el vapor de agua ofertada a la atmósfera interior del invernadero Convencional es debido al aporte de la evapotranspiración del cultivo, explicando la semejanza de HR en ese periodo.

Bajo las mismas condiciones la curva de la HR del invernadero móvil Pachamama es inferior a la curva de HR del invernadero Convencional y a cielo abierto (Figura 17), siendo su temperatura a la vez inferior al invernadero Convencional. Este comportamiento se debe al efecto del extractor de aire, que permitió evacuar el vapor de agua, como definen Allen et al. (2006) a la HR como el cociente entre la cantidad de agua que el aire realmente contiene a una determinada temperatura y a la cantidad que podría contener si estuviera saturado a la misma temperatura.

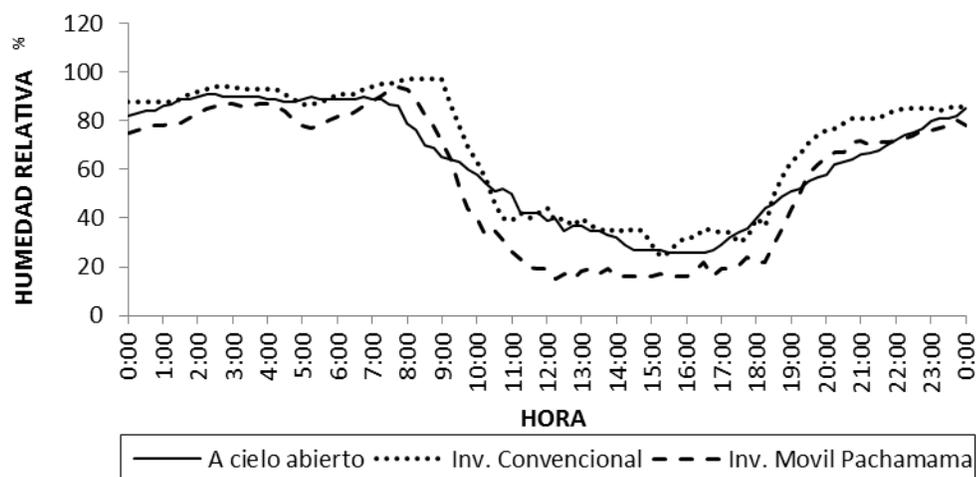


Figura 17. Evolución horaria de la humedad relativa del aire en el invernadero Convencional, invernadero móvil Pachamama y a cielo abierto, día 20 de septiembre de 2017 (Segunda fase).

Estos comportamientos (Figura 17) se observan durante todo el periodo de evaluación (Figura 18), habiendo registrado en promedio la HR mínima en el invernadero móvil

Pachamama de 17,8% mientras que en el invernadero Convencional fue 27,7% y a cielo abierto 29,9% (ver Anexo 12). Asimismo se observa en la Figura 18, las HR máximas promedio, siendo en el invernadero móvil Pachamama de 92,9%, invernadero Convencional 96,9% y a cielo abierto de 88,9%. De manera que los valores medios de la HR durante el ciclo de cultivo en el invernadero móvil Pachamama fueron de 55,4%, mientras invernadero Convencional la HR promedio fue de 62,3% y a cielo abierto 59,4% (ver Anexo 19).

Estas bajas HR en los invernaderos en comparación con la primera fase se ve afectado por la HR baja a cielo abierto, en esta época en la zona, se caracteriza por días poco lluviosos lo cual proporciona esta baja humedad en la atmosfera. Según los registros de precipitación de la estación en el CECC muestra en marzo 93,6 mm y en abril 30,4 mm, valores superiores al mes de septiembre 35,8 mm y octubre 44,2 mm, de igual manera en base al promedio mensual y anual registrado desde el año 2004 a 2013 de la estación meteorológica más cercana "Achumani" SENAMHI (2017) tiene registros en marzo de 62,5 mm y abril de 23,7 mm mayor a septiembre 19,8 mm y octubre de 43,1 mm, corroborando la baja HR en la segunda fase.

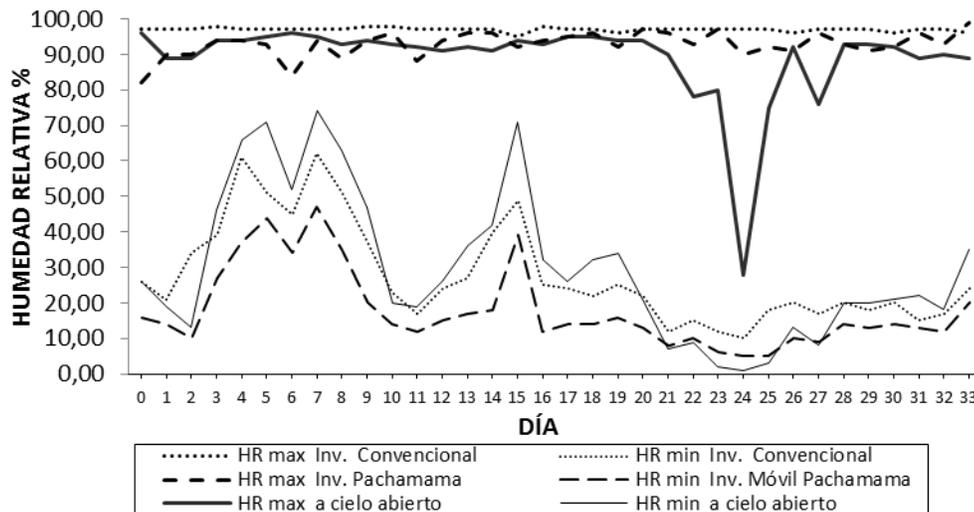


Figura 18. Comportamiento diarios de la humedad relativa máximas y mínimas, en el invernadero Convencional, invernadero móvil Pachamama y a cielo abierto, desde 8 de septiembre hasta 10 de octubre de 2017 (Segunda fase).

5.2.5 Presión de saturación y presión real de vapor

La presión de saturación de vapor promedio durante la segunda fase en el invernadero móvil Pachamama es de 3,89KPa inferior a la primera fase y menor al invernadero Convencional 4,43KPa, siendo esta presión mayor que la primera fase en el invernadero Convencional debido al incremento de la temperatura por efecto de no utilizar pantallas de sombreado, asimismo a cielo abierto presenta una presión de saturación de vapor promedio de 1,65KPa valor superior a la primera fase como se muestra en la Figura 19. Allen, Pereira, Raes, & Smith (2006) mencionan que cuanto más alta es la temperatura del aire, más alta es la capacidad de almacenar vapor de agua y más alta es la presión de saturación de vapor. Comparando las temperaturas con de la segunda fase con la primera fase, claramente se observa la diferencia.

Bajo estos mismos escenarios la presión real de vapor promedio en el invernadero móvil Pachamama es de 2,12KPa menor a la primera fase, también menor al invernadero Convencional presentando 2,71KPa y a cielo abierto se registró 0,96KPa menor a la primera fase (Figura 10). Esta baja presión real de vapor en el invernadero móvil Pachamama se debe al funcionamiento del extractor y al manejo oportuno del mecanismo electromecánico automatizado (ventanas laterales, ventanas cenitales y ventilador) que permitió evacuar el aire interior, esta aseveración se confirma con lo expuesto por Boulard et al. (1997) lo cual menciona que la renovación del aire permite modificar la humedad atmosférica, evacuando el aire interior del invernadero.

Por tanto en el invernadero móvil Pachamama existe en promedio mayor déficit de presión de vapor (DVP) 1,77KPa a comparación del invernadero Convencional su DVP es 1,72KPa, y a cielo abierto 0,69KPa, siendo superior en el invernadero móvil Pachamama en comparación a la primera fase, esta vez ya no por sus elevadas temperaturas sino por la renovación constante del aire dentro del invernadero.

Siendo así la curva de la presión de saturación de vapor del invernadero móvil pachamama (Figura 19) se ve afectada igual a la curva de la temperatura máxima de la Figura 15 por la ventilación forzada ya que ambas variables esta relacionadas.

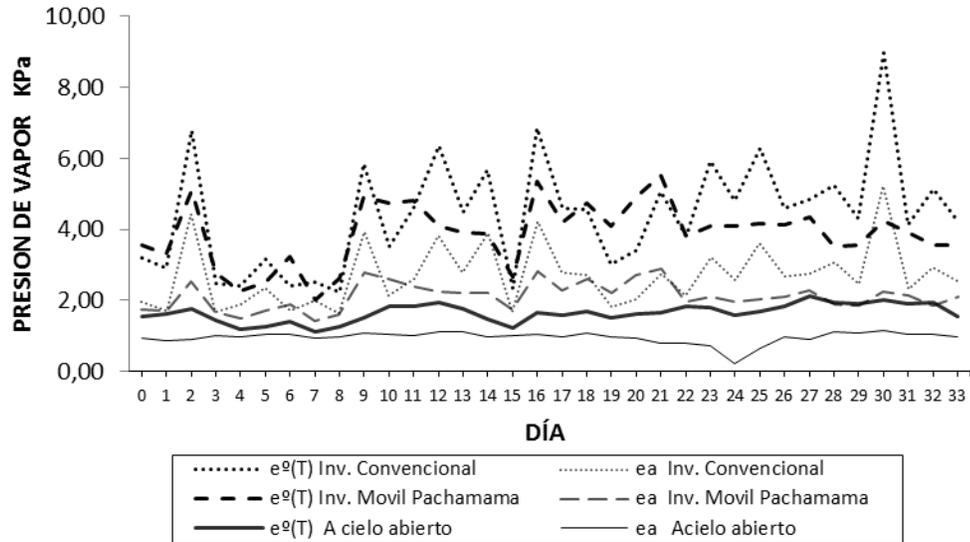


Figura 19. Comportamiento diario de presión de saturación de vapor $e^o(T)$ y presión real de vapor (ea), en el invernadero Convencional, invernadero móvil Pachamama y a cielo abierto desde 8 de septiembre hasta 10 de octubre de 2017 (Segunda fase).

5.2.6 Temperatura del suelo

La temperatura de suelo determinado en invernadero móvil Pachamama fue inferior al invernadero Convencional como se observa en la Figura 20, obteniendo en promedio durante el ciclo de cultivo $16,66^{\circ}\text{C}$ (menor que la primera fase), mientras el invernadero Convencional alcanzó un promedio $18,45^{\circ}\text{C}$ (mayor que la primera fase). Comprobando que la temperatura del suelo es proporcional a la temperatura del aire como indica Alpi & Tognoni (1991) que la temperatura de un invernadero depende del efecto invernadero que nace y Castilla (2005) muestra que es el resultado del balance energético del abrigo. Por tanto a mayor temperatura en el aire del invernadero mayor será la temperatura en el suelo.

En la figura 20, se observa como la temperatura del suelo va aumentando levemente durante los días, esto debido a la etapa de transición del solsticio de invierno a equinoccio de primavera ya que la duración del día en solsticio de invierno es menor a la de la noche y en los equinoccios (primavera) la duración del día iguala a la de la noche (Castilla, 2005). Como aconteció en la primera fase, pero en ese caso la curva tuvo una pendiente negativa, disminuyendo la temperatura de suelo ya que en el solsticio de verano la duración del día es mayor a la de la noche (Figura 11).

Nuevamente la amplitud térmica del suelo o rango en ambos invernaderos es baja a comparación de la amplitud térmica del aire de los invernaderos al igual que la primera fase, siendo comprobado que el suelo actúa como volante de inercia térmico, calentándose y enfriándose mucho más despacio que el aire circundante (Castilla, 2005)

En cuanto a las irregularidades de las curvas de las temperaturas del suelo de la Figura 20 es causado por la presencia de nubes que limitan el paso de la radiación solar como se explicó en anteriores apartados de temperatura de aire, humedad relativa, Induciendo las pendientes positivas y negativas de la curva.

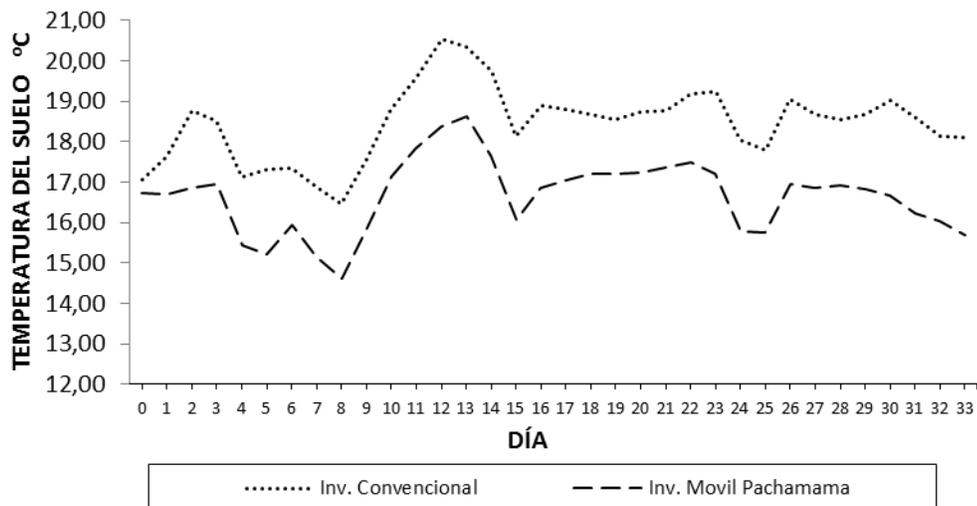


Figura 20. Comportamiento diario de la temperatura del suelo en el invernadero convencional, invernadero móvil Pachamama y a cielo abierto desde 8 de septiembre hasta 10 de octubre de 2017 (Segunda fase).

5.2.7 Humedad del suelo

En la Figura 21, se observa el comportamiento diario de la humedad del suelo, bajo un manejo de riego automático en el invernadero móvil Pachamama y un manejo de riego manual en el invernadero Convencional, durante el ciclo de cultivo del *Raphanus sativus* L. cv. Crimson Giant. La irregularidad de la curva durante los días, muestran exactamente que rápidamente o lentamente la humedad del suelo se está agotando (pendiente positivas) y los vértices inferiores, algunas pendientes negativas muestran el aporte de agua mediante riego

El contenido hídrico del suelo del invernadero móvil Pachamama se observa que esta adecuadamente mojado, no sobrepasando el rango usual de déficit hídrico de mayor a 100 centibares para suelos pesados (IRROMETER, 2017), manteniendo esta humedad menor a 100 centibares como se observa en la Figura 21, sin embargo Castilla, (2005) recomienda los intervalos de tensión de agua en el suelo de textura fina entre 20 y 40 centibares, siendo por mucho inferior a lo expuesto por IRROMETER (2017), además el sistema de riego automatizado se programó para que empiece a regar cuando la humedad llegue a PMP (20,6%) y detenga el riego cuando llegue a CC (36,4%) lo cual concuerda en los parámetros establecidos por IRROMETER (2017).

Simultáneamente el contenido hídrico del suelo del invernadero Convencional se observa que esta adecuadamente mojada hasta el día 13 (Jueves) y no el día 14 (Viernes), pero el cronograma de riego en CECC es tres días a la semana (Lunes, Miércoles y Viernes) y en la Figura 21, justamente el día viernes sobrepaso el límite de 100 centibares, este mismo comportamiento se ve reflejado el día 17 (lunes) regando al día siguiente. Por otro lado también se observa el día 24 (lunes) no se rego con el suficiente volumen de agua, ya que el día siguiente (Martes) la tensión sobrepaso los 150 centibares 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 CECC ya que se comprobó que están adecuadamente calculados a los intervalos de riego requerido, sino por no respetar en algunos días esos intervalos cronogramados y el tiempo de riego (volumen de agua).

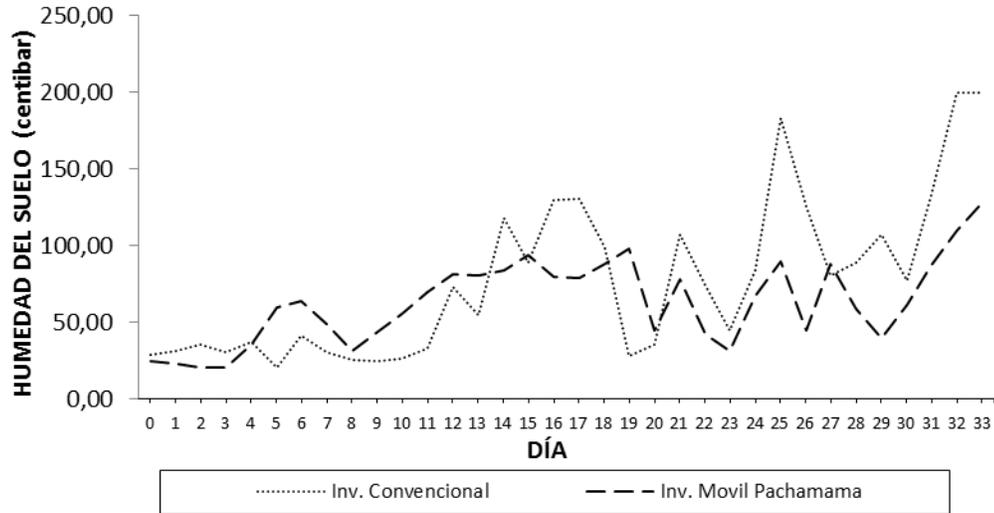


Figura 21. Comportamiento diario de la humedad del suelo bajo riego, mediante dos sistemas de manejo: automático (invernadero móvil Pachamama) y tradicional o manual (invernadero Convencional), desde 8 de septiembre hasta 10 de octubre de 2017 (Segunda fase).

5.3 Cuantificación del impacto de las elevadas temperaturas sobre el rendimiento de hortalizas de producción típicas en la zona de estudio

5.3.1 Primera fase (en fecha 2017-03-18 a 2017-04-22)

5.3.1.1 Análisis físico del suelo

Las características físicas del suelo (Tabla 4) indican que presenta una textura Franco arcillo limoso (FYL), sustrato de ambos invernadero donde se localizaba el cultivo de rábano.

Tabla 4.
Propiedades físicas del suelo de los invernaderos.

Textura			Clase	Dr	Dap
A (%)	L (%)	Y (%)	Textural	(g cm ⁻¹)	(g cm ⁻¹)
16,1	50,9	33,0	FYL	2,30	1,25

5.3.1.2 Porcentaje de Emergencia

Según el estadístico prueba t de student (Anexo 22) 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.

En la Figura 22, se observa que el invernadero móvil Pachamama ha sido más eficiente en el porcentaje de emergencia del *Raphanus sativus* L. cv. Crimson Giant, obteniendo mayor al 50% de emergencia el día 4 y 94,1% el día 14, a comparación del invernadero Convencional llega a ser mayor al 50% de emergencia el día 6. Y 92,7% el día 14. Similarmente en un estudio realizado por Mamani (2016) en un invernadero de polietileno con ventanas laterales completamente abiertos durante el día y la noche realizado en el Centro Experimental Cota Cota obtuvo el porcentaje de emergencia mayor al 50% el día 10. 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 promedio de 43, 55°C mientras en el invernadero Convencional la temperatura máxima promedio alcanzo los 33,45°C

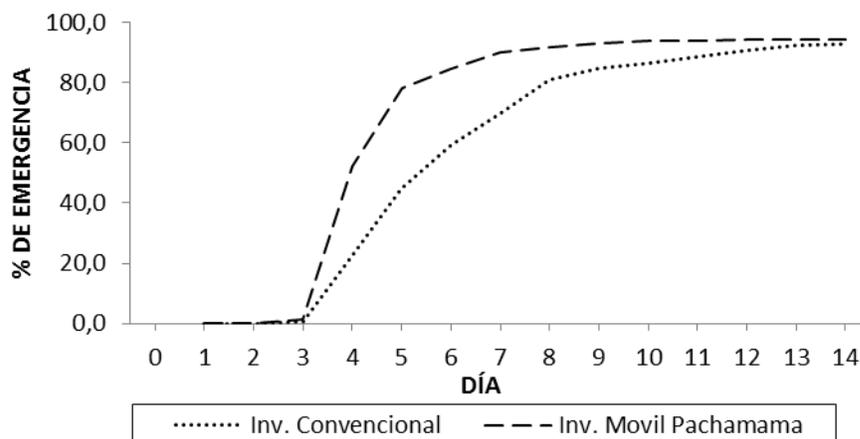


Figura 22. Evolución del Porcentaje de emergencia del *Raphanus sativus* L. cv. Crimson Giant, en el invernadero Convencional y en el invernadero móvil Pachamama evaluados en 14 días (Primera fase).

5.3.1.3 Altura de planta

En la Figura 23, se observa que existen diferencias de altura de planta evaluados al final del trabajo, donde en ambos invernaderos el control microclimático es manual tanto el control de altas temperaturas y el riego a lo largo del ciclo del cultivo.

Sin embargo, el análisis estadístico prueba t de student (Anexo 23) a un nivel de significancia de 0,05 muestra que las diferencias son estadísticamente significativas. Siendo mayor la altura de planta en el invernadero móvil Pachamama en promedio 43,9 cm y en el invernadero Convencional alcanzo una altura promedio de 38,0 cm, Mamani (2016) registro valores de altura de planta de 16,05cm a 21,54cm entre su estudio de tratamiento de concentraciones de biol, siendo inferiores a los valores de altura de planta que se obtuvo. De igual manera en Guayaquil-Ecuador a cielo abierto Cando (2016) en su estudio de fases lunares y fertilizantes registro una altura máxima de 24,42cm. por otro lado Castilla (2005) menciona que bajos niveles de intensidad de radiación en la mayoría de las plantas inducen hojas pequeñas (con mayor índice longitud/anchura), entrenudos más largos, menor concentración de clorofila y menor peso seco.

Las mediciones de radiación solar realizadas corroboran lo expuesto por Castilla, (2005) registrado en el invernadero móvil Pachamama solo el 25,9% de la radiación solar incidente, mientras en el invernadero Convencional fue 17,7%.

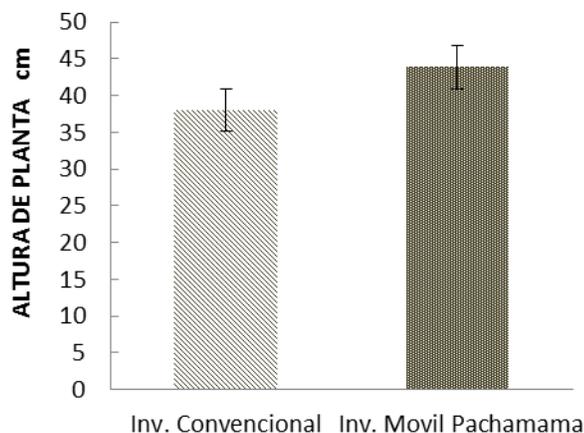


Figura 23. Comparación de altura de planta y su desviación estándar del *Raphanus sativus* L. cv. Crimson Giant, en el invernadero Convencional y en el invernadero móvil Pachamama (Primera fase).

5.3.1.4 Cobertura vegetal

Según el análisis estadístico prueba t de student (Anexo 24) a un nivel de significancia de 0,05 muestra que las diferencias son estadísticamente significativas en todo el periodo del ciclo de cultivo (Figura 24). Siendo superior el porcentaje de cobertura vegetal en el invernadero móvil Pachamama en comparación con el invernadero Convencional, presentando ambas curvas una semejanza a una curva exponencial característica del crecimiento exponencial de la poblacional.

En general se presenta un suelo cubierto en un 50% el día 21 en el invernadero móvil Pachamama y el día 25 en el invernadero Convencional, asimismo al final del trabajo en el invernadero móvil Pachamama el suelo estaba cubierto en total 94.9% y en el invernadero Convencional 82.5%. Castilla (2005) indica que es necesario optimizar la temperatura en los primeros estadios de desarrollo para conseguir un rápido desarrollo foliar. Además menciona en condiciones de poca luz o de sombra, las hojas tienden a colocarse horizontalmente, para interceptar el máximo de radiación solar, cuando la intensidad lumínica es alta las hojas tienden a una posición más vertical. De esta manera un mayor porcentaje de emergencia en el menor tiempo coadyuvo en el invernadero móvil Pachamama a cubrir la superficie en mayores proporciones que el invernadero Convencional, induciendo a una menor evaporación del agua del suelo

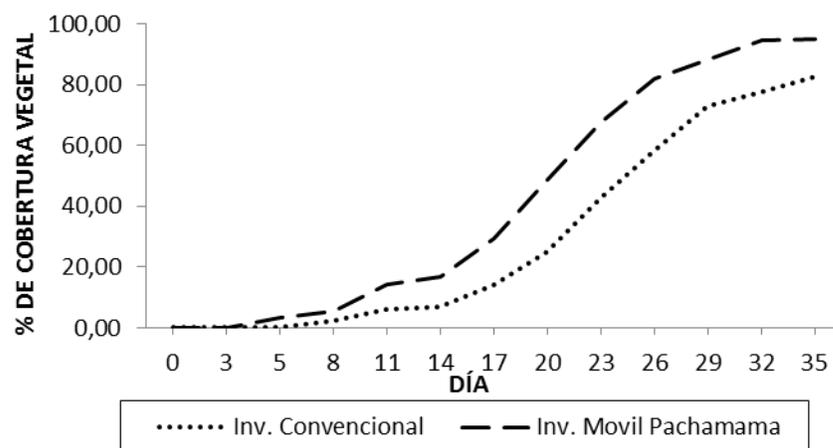


Figura 24. Evolución de la cobertura vegetal del *Raphanus sativus* L. cv. Crimson Giant, en el invernadero Convencional y en el invernadero móvil Pachamama evaluados en 35 días (Primera fase).

5.3.1.5 Área foliar

Según el análisis estadístico prueba t de student (Anexo 25) a un nivel de significancia de 0,05 muestra que las diferencias son estadísticamente significativas en el área foliar medida una vez cosechado. Siendo superior el área foliar en el invernadero Convencional en comparación con el invernadero móvil Pachamama.

En la Figura 25, se observa que el invernadero Convencional alcanzó en promedio una área foliar de 626,0 cm² y el invernadero móvil Pachamama 512,4 cm² de área foliar. Por otro lado en una investigación de densidades de siembra en la sabana de Bogotá en invernadero a una temperatura promedio al interior de 15,6°C y 61% de HR Criollo & García (2009) consiguió mayor área foliar (250 cm²) en densidades bajas y menor área foliar (150 cm²) en densidades altas, lo cual es muy inferior a lo obtenido. 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 (*Raphanus sativus* L. cv. Crimson Giant) si fue influenciado por las humedades altas ya que el invernadero Convencional se obtuvo la mayor HR promedio de 67,4% a comparación en el invernadero móvil Pachamama fue 64,6% de HR, confirmando que mayor HR en el rábano induce mayor área foliar en base a lo expuesto por Bakker, (1991).

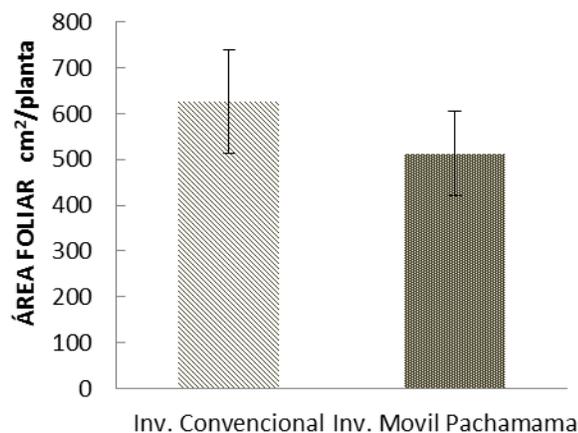


Figura 25. Comparación de área foliar y su desviación estándar del *Raphanus sativus* L. cv. Crimson Giant, en el invernadero Convencional y en el invernadero móvil Pachamama (Primera fase).

5.3.1.6 Índice de área foliar (IAF)

El valor promedio alcanzado de la superficie de hojas por unidad de superficie de suelo (IAF) también conocido como LAI, del inglés «Leaf Area Index» fue superior en el invernadero Convencional registrando al final del ciclo 3,87 y el IAF del invernadero móvil Pachamama 3,21 (Figura 26).

Según Gimenez citado por Castilla (2005) considera necesario un IAF entre 3 y 4, para que la interceptación de radiación sea del 95%, con las densidades de plantación usuales en cultivos herbáceos. Por otro lado Mamani (2014) registro 1,45 de IAF a una densidad de 17 plantas m^{-2} y Criollo & García (2009) muestra en sus estudio de densidades que a mayor densidad de siembra el IAF será mayor, obteniendo en su estudio 3,4 el cual el considera ideal para una planta tipo C3.

Para Castilla (2005) la temperatura tiene una gran influencia en el crecimiento y desarrollo de las hojas, por lo que deberá manejarse la temperatura para conseguir el máximo de IAF en el menor tiempo posible. Evidentemente como se muestra en el estudio, la temperatura influye en el crecimiento y desarrollo de las hojas demostrando máxima expresión de IAF en temperatura de promedio máximas en 33,45°C (invernadero Convencional) cuando la temperatura promedio máxima es superior al anterior valor 43,55°C (invernadero móvil Pachamama) reduce su área foliar consecuentemente su IAF a una misma densidad de siembra.

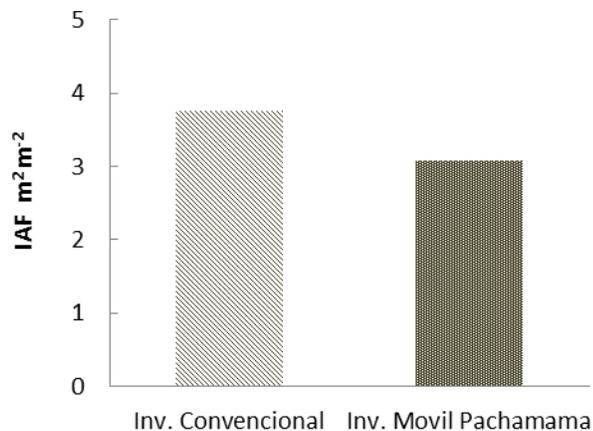


Figura 26. Comparación IAF del *Raphanus sativus* L. cv. Crimson Giant en el invernadero Convencional y en el invernadero móvil Pachamama (Primera fase).

5.3.1.7 Peso de raíz y rendimiento

Realizando un análisis estadístico prueba t de student (Anexo 27) a un nivel de significancia de 0,05 muestra que las diferencias son estadísticamente significativas en el peso de raíz. Siendo superior en el invernadero Convencional registrando en promedio 27,4 g, y en el invernadero móvil Pachamama en promedio 23,1 g como se muestra en la Figura 27, estos resultados superan con lo expuesto por Gonzales (2014) quien afirma obtener mayor masa 13,62 g en fase lunar de cuarto menguante y a lo expuesto por Criollo & García (2009) de las densidades de siembra obteniendo mayor masa de raíz por planta (15 g) cuando menor es la densidad de plantación. Asimismo Gonzales (2014) realizó una pequeña medición de peso de raíz del mercado Irpavi La Paz-Bolivia, obteniendo una medida en promedia de 21 g.

La FAO (2002) menciona 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 a comparación del invernadero Convencional

Expresando los valores promedios en $t\ ha^{-1}$ se consigue en rendimiento de raíz en invernadero Convencional de $16,9\ t\ ha^{-1}$ y en el invernadero móvil Pachamama $14,5\ t\ ha^{-1}$.

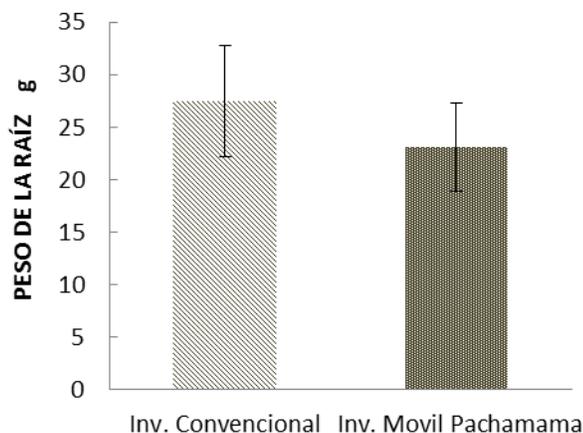


Figura 27. Comparación del peso de la raíz y su desviación estándar del *Raphanus sativus* L. cv. Crimson Giant, en el invernadero Convencional y en el invernadero móvil Pachamama (Primera fase).

5.3.1.8 Peso de hojas y rendimiento

Realizando un análisis estadístico prueba t de student (Anexo 28) a un nivel de significancia de 0,05 muestra que no hay diferencias, estadísticamente no es significativo las diferencias de peso de hoja en el invernadero Convencional registrando en promedio 35,6 g y en el invernadero móvil Pachamama en promedio 39,0 g como se muestra en la Figura 28, estos resultados superan a lo expuesto por Gonzales (2014) donde obtuvo el mayor peso en la fase lunar de luna nueva en promedio 7,50 g y en el cuarto menguante registro 5,62 g.

Por otra parte 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 significativo 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, Castilla (2005) indica en condiciones de poca luz las hojas tienden a colocarse horizontalmente, fundamentando la mayor cobertura en el invernadero móvil Pachamama.

Expresando los valores promedios en $t\ ha^{-1}$ se consigue en rendimiento de hojas en el invernadero Convencional de $22,0\ t\ ha^{-1}$ y en el invernadero móvil Pachamama en $24,5\ t\ ha^{-1}$.

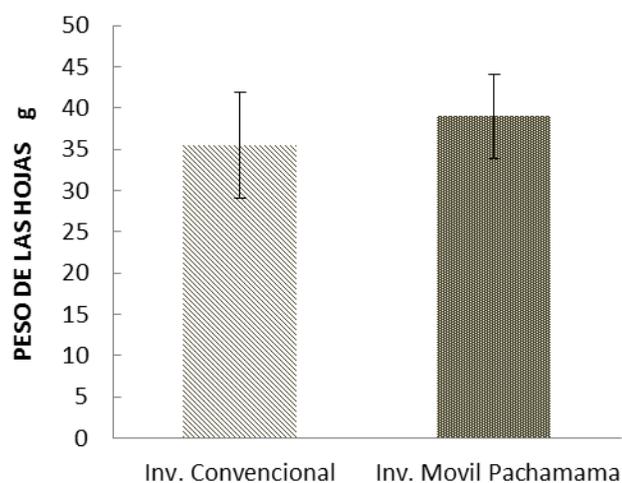


Figura 28. Comparación del peso de las hojas y su desviación estándar del *Raphanus sativus* L. cv. Crimson Giant, en el invernadero Convencional y en el invernadero móvil Pachamama (Primera fase).

5.3.1.9 Materia seca (MS)

Realizando un análisis físico en laboratorio, se determinó el porcentaje de materia seca (%MS) y el porcentaje de humedad en la raíz y en las hojas después de la cosecha, resultando mayor porcentaje de materia seca de raíz en el invernadero móvil Pachamama con 5,0% a diferencia en el invernadero Convencional se registró menor porcentaje de materia seca de 4,1%, existiendo mayor cantidad de agua en la raíz cultivado en el invernadero Convencional (Figura 29).

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 registra menor porcentaje de materia seca de 4,1% (Figura 29).

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

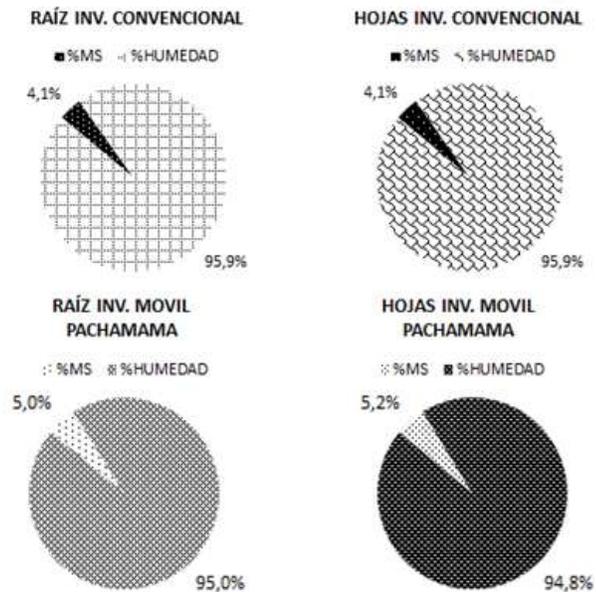


Figura 29. Porcentaje de materia seca y humedad en órganos de la raíz y hojas del *Raphanus sativus* L. cv. Crimson Giant, en el invernadero Convencional y en el invernadero móvil Pachamama (Primera fase).

5.3.2 Segunda fase (en fecha 2017-09-8 a 2017-10-11)

5.4 Análisis químico de suelo

Las características químicas de suelo después de la cosecha de la primera fase indican que se absorbieron en mayor cantidad en el invernadero Convencional (Tabla 6) en comparación del invernadero móvil Pachamama (Tabla 5). Para lo cual hay una variación en los nutrientes en ambos invernaderos, para subsanar esta diferencia y no se vea afectado por esta variable en la segunda fase se calculó la dosis del fertilizante orgánico, previamente realizando una análisis químico del compost con activador de Yogurt (Tabla 7) “fertilizante orgánico” y más el requerimiento del cultivo,

Se determinó la dosis para el invernadero móvil Pachamama que fue 1,427 Kg m⁻² (en total 12,847 Kg por 9 m²) y la dosis para el invernadero Convencional fue 1,433 Kg m⁻² (en total 12,894 Kg por 9 m²).

Tabla 5.
Propiedades químicas del suelo en el invernadero móvil Pachamama.

N total (%)	P disp mg kg ⁻¹	K cmolcKg ⁻¹	Na cmolcKg ⁻¹	Ca cmolcKg ⁻¹	Mg cmolcKg ⁻¹	CE μScm ⁻¹	PH
0,036	9,0	0,61	0,53	9,3	3,8	417	7,86

Tabla 6.
Propiedades químicas del suelo en el invernadero Convencional.

N total (%)	P disp mg kg ⁻¹	K cmolcKg ⁻¹	Na cmolcKg ⁻¹	Ca cmolcKg ⁻¹	Mg cmolcKg ⁻¹	CE μScm ⁻¹	PH
0,028	6,3	0,53	0,25	9,0	4,0	337	7,53

Tabla 7.
Propiedades físico y químico de compost con activador Yogurt.

Humedad (%)	PH	CE mS cm ⁻¹	MO (%)	N total (%)	P total mg kg ⁻¹	K total mg kg ⁻¹
24	8,38	9,72	40	1,7	5114	4673

5.4.1.1 Porcentaje de Emergencia del rábano

Al igual que en la primera fase la emergencia empieza el día 3 en ambos invernaderos, a diferencia de la primera fase, en esta fase hay mayor porcentaje de emergencia como se muestra en la Figura 30, según un análisis estadístico realizado mediante una prueba t, estadísticamente no muestra diferencias significativas desde el día 3 hasta el día 9 en el invernadero móvil Pachamama y el invernadero Convencional, sin embargo estadísticamente despliega diferencias significativas desde el día 10 hasta el día 14 (Anexo 32).

En la Figura 30, se observa diferencias diarias en el porcentaje de emergencia en ambos invernaderos, a pesar de que estadísticamente no habría diferencias hasta el día 9 debido a la amplitud de la desviación estándar dentro de sus unidades experimentales. Siendo así 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. 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). Al final solo se contó con 56,5% de plántulas emergidas en invernadero Convencional y 81,9% 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) citado por Castilla (2005) de que temperaturas inferiores limitan el crecimiento de algunos cultivos.

Igualmente Porta et al., (1994) recalca 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, crecimiento, disponibilidad de agua para la planta, la

actividad microbiana, la nitrificación, descomposición de la materia orgánica. Entonces con lo expuesto no solo se debe retribuir a la temperatura del aire sino también a la temperatura del suelo ya que actúa directamente con la semilla, pues una temperatura de suelo mayor en el invernadero Convencional (18,45°C) permitió acelerar la germinación y por su puesto la emergencia ya que en el invernadero móvil Pachamama el proceso fue más lento por tener una temperatura de 16,66°C.

Asimismo la diferencia de temperaturas de suelo entre los dos invernaderos es de 1,79°C y en la primera fase es de 1,84°C, lo cual permitió esta diferencia de la primera fase ser significativo en el porcentaje de emergencia.

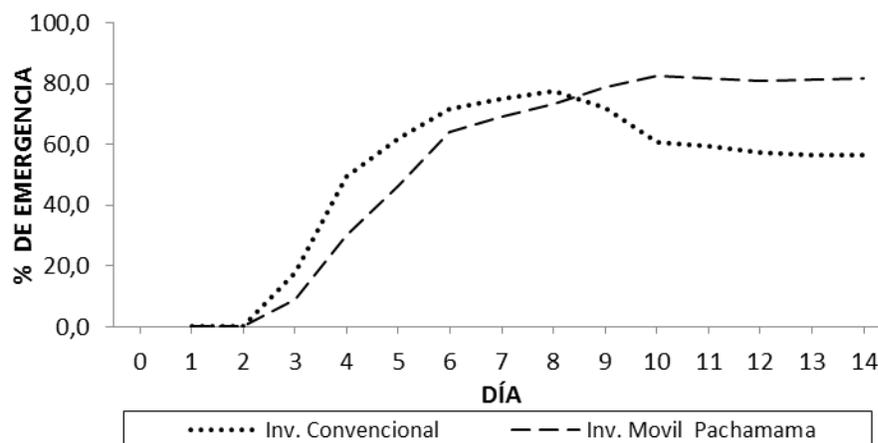


Figura 30. Evolución del Porcentaje de emergencia del *Raphanus sativus* L. cv. Crimson Giant en el invernadero Convencional y en el invernadero móvil Pachamama evaluados en 14 días (Segunda fase).

Si de alguna manera no hubiera presentado la plaga de pulgones en el invernadero Convencional, presentaría aproximadamente en porcentaje de emergencia 94,5% hasta el día 14, este resultado se obtuvo mediante un modelado de la curva de emergencia en base a los datos obtenidos antes de la presencia de pulgones. La ecuación calculada:

$$\%Emergencia = 12,204 * \ln(Días) + 62,323$$

Presenta una correlación alta de 0,98 y es válida para el intervalo de días $5 \leq \text{Día} \leq 14$

5.4.1.2 Altura de planta

Según el análisis estadístico prueba t de student (Anexo 33) a un nivel de significancia de 0,05 muestra que las diferencias son estadísticamente significativas. Siendo mayor la altura de planta en el invernadero móvil Pachamama en promedio 26,1cm y en el invernadero Convencional fue 18,1cm (Figura 30).

Estos resultados coinciden con Mamani (2014) y Cando (2016) en la altura de planta obtenidos en sus estudios citados en la primera fase pero contradiciendo a Castilla (2005) de los bajos niveles de intensidad de radiación que 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 (22,5%) y obtuvo mayor altura de planta mientras en el invernadero Convencional se registró mayor radiación solar (45,5%) y obtuvo la menor altura de planta.

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 la variable 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 de, por lo que el promedio de temperatura máximas fue 39,71°C y en algunos días se registró 56,40°C.

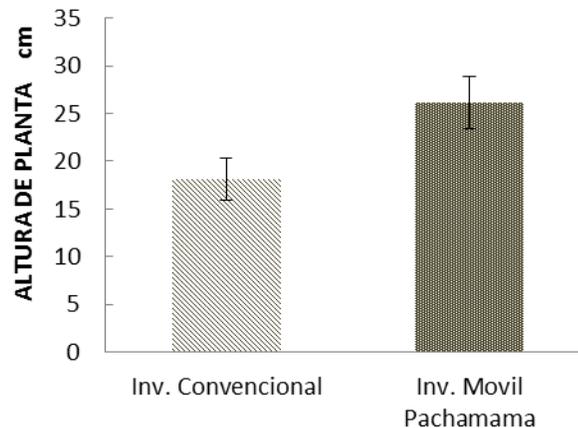


Figura 31. Comparación de altura de planta y su desviación estándar del *Raphanus sativus* L. cv. Crimson Giant, en el invernadero Convencional y en el invernadero móvil Pachamama (Segunda fase).

5.4.1.3 Cobertura vegetal

Según el análisis estadístico prueba t de student (Anexo 34) a un nivel de significancia de 0,05 muestra que hasta el día 8 estadísticamente no hay diferencias, pero a partir del día 11 al 32 estadísticamente existe diferencias significativas en el invernadero móvil Pachamama y el invernadero Convencional. Siendo superior el porcentaje de cobertura vegetal en el invernadero móvil Pachamama, en donde se presentó un suelo cubierto aproximadamente el 50% el día 23 y el día 29 en el invernadero Convencional, asimismo al final del trabajo en el invernadero móvil Pachamama el suelo está cubierto en promedio 89,0% y en el invernadero Convencional en promedio 65,5%.

En vista en la Figura 32, se observa que el día 3 el invernadero convencional cubrió el suelo en un porcentaje de 0,1 a diferencia del invernadero móvil Pachamama que registró 0,0% de suelo cubierto, así este mayor porcentaje de cobertura vegetal en el invernadero Convencional se percibió hasta el día 8, aunque estadísticamente no sea significativo (Anexo 34), pero es un antecedente que demuestra que altas temperaturas influyen en el crecimiento foliar comprobando lo expuesto en la primera fase.

Por otra parte conjuntamente se observa que el invernadero móvil Pachamama exhibe una curva exponencial característica de una población en crecimiento, Asimismo la curva de cobertura vegetal del invernadero Convencional presenta dos anomalías: la

primera anomalía ocurre desde el día 9 hasta el día 11, efecto causado por la plaga de pulgones devastando el 38% de la población, con lo cual la curva se mantuvo lineal con una pendiente de 0 hasta el día 14, a partir de ese día empezó a crecer exponencialmente hasta el día 17 donde ha sido afectado esta vez por las nubosidades y precipitaciones que ocurrió en lugar, registrando 4,4 mm por la estación meteorológica a cielo abierto hasta el día 23, induciendo un lento crecimiento debido a las bajas temperaturas lo cual corresponde a la segunda anomalía de la curva.

El efecto de bajas temperaturas por causa de las nubosidades y precipitación no influyo en gran medida a la curva de cobertura vegetal del invernadero móvil Pachamama debido al cierre automático de las ventanas cuando esta ha sido inferior a los 30°C, manteniendo así la temperatura interior lo cual no ocurrió lo mismo en el invernadero Convencional debido al cierre inoportuno de las ventanas ya que su manejo es manual y depende de la presencia del personal, afectando así lo explicado anteriormente. Concordando con Castilla (2005) que indica que es necesario optimizar la temperatura para conseguir un rápido desarrollo foliar

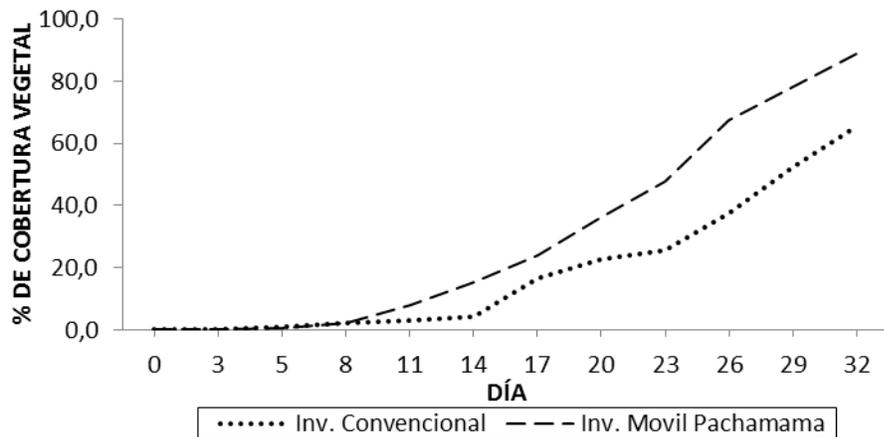


Figura 32. Evolución de la cobertura vegetal del *Raphanus sativus* L. cv. Crimson Giant en el invernadero Convencional y en el invernadero móvil Pachamama evaluados en 32 días (Segunda fase).

5.4.1.4 Área foliar

Según el análisis estadístico prueba t de student (Anexo 35) a un nivel de significancia de 0,05 muestra que las diferencias son significativas en el área foliar medida una vez cosechado. Siendo superior el área foliar en el invernadero móvil Pachamama ($397,7\text{cm}^2$) en comparación con el invernadero Convencional ($294,4\text{cm}^2$). De igual manera estas mediciones se acercan a los valores obtenidos por Criollo & García (2009) en su estudio de densidades citado en la primera fase.

En base a lo expuesto en la primera fase por Bakker (1991) que señala que la humedad del aire influye en el tamaño de hoja. En esta segunda fase se observó que no influye la humedad del aire, pues en el invernadero móvil Pachamama fue la que menor HR se registró (55,4%) y obtuvo mayor área foliar en comparación del invernadero Convencional que fue 62,3% de HR y menor área foliar, negando que mayor HR 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 presento la menor área foliar y su temperatura fue muy superior al invernadero Convencional, en esta segunda fase la temperatura máxima del invernadero móvil Pachamama es menor al invernadero Convencional y obtuvo el mayor área foliar.

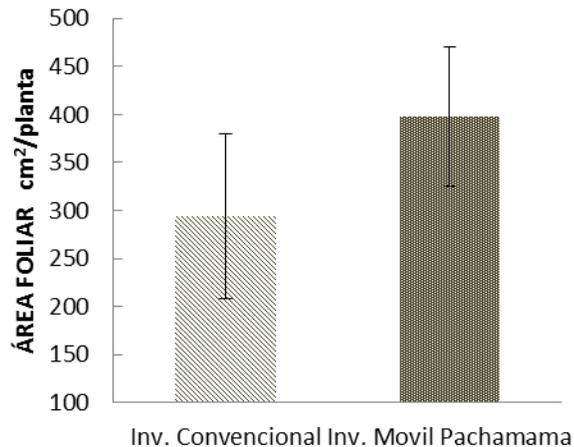


Figura 33. Comparación de área foliar y su desviación estándar del *Raphanus sativus* L. cv. Crimson Giant, en el invernadero Convencional y en el invernadero móvil Pachamama (Segunda fase).

5.4.1.5 Índice de área foliar (IAF)

El valor promedio alcanzado de la superficie de hojas por unidad de superficie de suelo (IAF) fue al final del ciclo 2,17 en el invernadero móvil Pachamama superior al IAF del invernadero Convencional 1,11. Esto bajo la densidad de siembra y el porcentaje de plántulas emergidas (ver Anexo 36).

Sin embargo sino se presentaría problemas de pulgones en el invernadero Convencional esta alcanzaría un IAF de 1,85 dato calculado en base al modelo calculado en el apartado de porcentaje de emergencia. De igual manera presentaría un IAF menor al invernadero móvil Pachamama (Figura 34).

De igual manera es aceptado lo expuesto por Castilla (2005) de que la temperatura tiene una gran influencia en el crecimiento y desarrollo de las hojas, por lo que recomienda que deberá manejarse la temperatura para conseguir el máximo de IAF en el menor tiempo posible. Comprobando la primera fase pues Evidentemente como se muestra en el estudio, la temperatura influye en el crecimiento y desarrollo de las hojas demostrando máxima expresión de IAF en temperatura de promedio máximas en 37,61°C (invernadero móvil Pachamama) cuando la temperatura promedio máxima es superior al anterior valor como 39,71°C (invernadero Convencional) reduce su área foliar consecuentemente su IAF a una misma densidad de siembra.

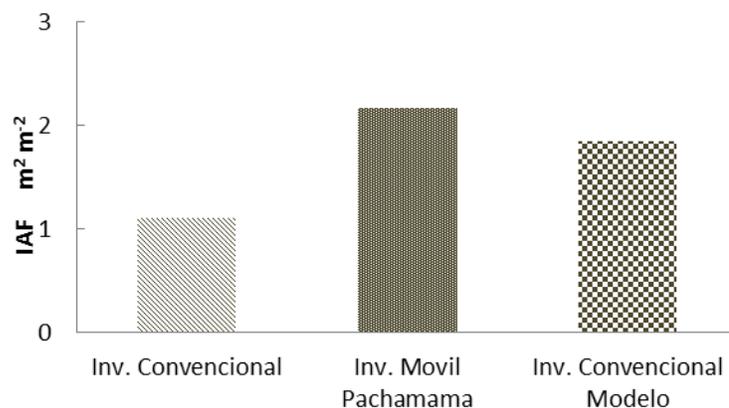


Figura 34. Comparación IAF del *Raphanus sativus* L. cv. Crimson Giant en el invernadero Convencional y en el invernadero móvil Pachamama (Segunda fase).

5.4.1.6 **Peso de la raíz y rendimiento**

Realizando un análisis estadístico prueba t de student (Anexo 37) a un nivel de significancia de 0,05 muestra que no hay diferencias significativas en el peso de raíz, estadísticamente son iguales. Siendo el peso de raíz en promedio en el invernadero móvil Pachamama de 23,3 g y en el invernadero Convencional 21,8 g (Figura 35), nuevamente estos resultados superan a lo expuesto por Gonzales (2014) quien obtuvo una masa de 13,62 g en fase lunar de cuarto menguante y a lo expuesto por Criollo & García (2009) obteniendo mayor masa de raíz (15 g) cuando menor es la densidad de plantación. Asimismo al peso promedio de la raíz del rábano (21 g) del mercado Irpavi La Paz-Bolivia medida por Gonzales (2014).

Basándonos nuevamente en la FAO (2002) lo cual menciona 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 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 presenta 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.

Expresando los valores promedios del peso de la raíz (g) a $t\ ha^{-1}$ en base a la densidad de siembra empleado y al porcentaje de emergencia obtenidos a los 14 días, se consigue en rendimiento de raíz en el invernadero móvil Pachamama de $12,7\ t\ ha^{-1}$ y en el invernadero Convencional de $8,2\ t\ ha^{-1}$. Pero si no se hubiera presentado problemas de pulgones se obtendría en rendimiento en el invernadero Convencional $13,7\ t\ ha^{-1}$, valor mayor al invernadero móvil Pachamama debido al mayor porcentaje de emergencia en el modelo del invernadero Convencional (94,5%) mientras en el invernadero móvil Pachamama su porcentaje de emergencia es 81,9%.

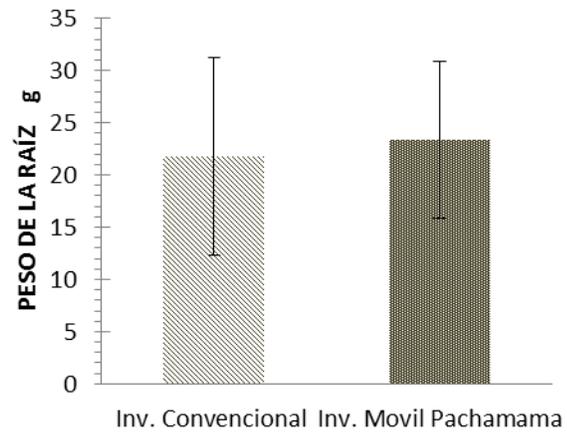


Figura 35. Comparación del peso de la raíz y su desviación estándar del *Raphanus sativus* L. cv. Crimson Giant, en el invernadero Convencional y en el invernadero móvil Pachamama (Segunda fase).

5.4.1.7 Peso de hojas y rendimiento

Realizando un análisis estadístico prueba t de student (Anexo 38) a un nivel de significancia de 0,05 muestra diferencias significativas en el peso de hojas, 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 (Figura 36).

A pesar de ser valores bajos en ambos invernaderos a comparación de la primera fase estos resultados superan a lo expuesto por Gonzales (2014) quien obtuvo 7,50 g en la fase lunar de luna nueva y 5,62 g en cuarto menguante.

Asimismo se ratifica lo afirmado en la primera fase en base a lo expuesto por Aviles (1992) que explica que el mayor crecimiento de la parte aérea en el invernadero es por falta de luz, 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.

Expresando los valores promedios en $t\ ha^{-1}$ se consigue en rendimiento de hojas en el invernadero móvil Pachamama en $12,8\ t\ ha^{-1}$ mucho mayor al invernadero Convencional $4,6\ t\ ha^{-1}$. Pero si no se hubiera presentado problemas de pulgones se obtendría en rendimiento en el invernadero Convencional de $7,7\ t\ ha^{-1}$.

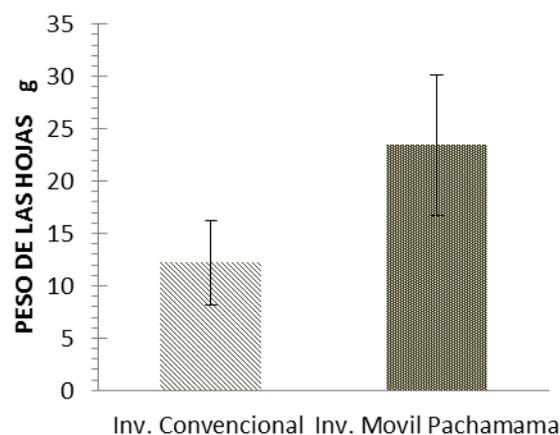


Figura 36. Comparación del peso de las hojas y su desviación estándar del *Raphanus sativus* L. cv. Crimson Giant, en el invernadero Convencional y en el invernadero móvil Pachamama (Segunda fase).

5.4.1.8 Materia seca (MS)

Realizando un análisis físico 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% (Figura 37).

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 presento 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, ya que en la primera fase la temperatura máxima era superior en el invernadero Pachamama y obtuvo mayor %MS, mientras que en la segunda fase se registró menores valores de temperaturas máximas y presento menor %MS.

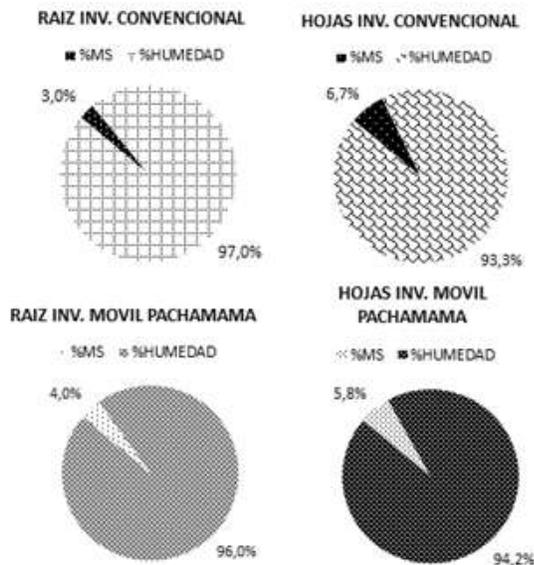


Figura 37. Porcentaje de materia seca y humedad en órganos de la raíz y hojas del *Raphanus sativus* L. cv. Crimson Giant, en el invernadero Convencional y en el invernadero móvil Pachamama (Segunda fase).

6 CONCLUSIONES

De los resultados obtenidos en el presente trabajo y su discusión se llegaron a las siguientes conclusiones:

En 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 y evapotranspiración de referencia durante todo el periodo de evaluación de la primera fase en comparación del invernadero Convencional de control microclimático de manejo manual, excepto en la velocidad del viento que en ambos fue $0,0\text{ms}^{-1}$. Lo cual se debió a la mayor transmisibilidad de radiación solar 25,9% en el invernadero móvil Pachamama cuyo material es de resina reforzado con fibra de vidrio y 17,7% de radiación solar en invernadero Convencional por cuyo material de cubierta es de polietileno de baja densidad con pantallas de sombreo, además de su menor superficie de ventilación (2,9% frente al 14,3% de la superficie invernada).

En el invernadero móvil Pachamama bajo un control microclimático de manejo **automático**, se alcanzaron los valores más bajos de radiación solar, temperatura, déficit de presión de vapor y evapotranspiración de referencia durante todo el periodo de evaluación de la segunda fase en comparación del invernadero Convencional de control microclimático de manejo manual, excepto también en la velocidad del viento que en ambos fue $0,0\text{ms}^{-1}$. Esto se podría deber a la eficiencia de manejo automatizado de las aperturas y cierre de las ventanas cenitales, ventanas laterales, extractor y ventilador manteniendo la temperatura alrededor del óptimo del cultivo (35°C) mientras que en el invernadero Convencional la temperatura desencadenó mayores condiciones de estrés ambiental.

Es factible llevar adelante un manejo de control microclimático automático, 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 exista diferencias estadísticas en el peso de la raíz debido a un factor importante como la intensidad lumínica, se explica esto por qué en el invernadero móvil Pachamama se cuenta con el mayor suelo cubierto pero con menor área foliar lo que se explica que las hojas tienden a colocarse horizontalmente para interceptar mayor luz (es decir hay poca luz) a diferencia del invernadero Convencional, el suelo cubierto es menor pero tiene mayor área foliar, lo que explica que las hojas tienden a una posición vertical explicando que hay mayor intensidad lumínica en el invernadero Convencional lo cual desarrollo mayor peso de raíz en la primera fase.

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.

El manejo automatizado de las pantallas de sombreo es primordial y debe ser manejado de dos maneras: mediante sensores de temperatura que activen el cierre de las pantallas de sombreo cuando las temperaturas sobrepasen los 35°C y la otra manera es mediante un reloj digital que active el cierre de las pantallas de sombreo a las 17 h 00 min y las habrá 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,

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.

7 RECOMENDACIONES

Se recomienda realizar mediciones de coeficientes de reflectividad, transmisividad, absorbividad y emisividad del material de cobertura para determinar el balance de energía en los invernaderos.

Determinar el balance de energía en invernadero que permitirá conocer los parámetros de consumo y la potencia de calefacción o de refrigeración a instalar.

Se recomienda medir la intensidad lumínica transmitida en cada invernadero con y sin pantallas de sombreo.

Se recomienda medir el caudal de riego durante todo el ciclo de cultivo dentro de un manejo manual y automático para determinar el volumen real de riego.

Se recomienda cubrir toda el área de suelo de los invernaderos con vegetación.

8 BIBLIOGRAFIA

- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (2006). Evapotranspiración del cultivo (FAO56 ed.). Roma, Italia.
- Alpi, A., & Tognoni, F. (1991). Cultivo en Invernadero (Mundi-Pren). Madrid, España.
- ASHRAE Handbook. (2001). Fundamental (ASHRAE). Atlanta, USA.
- 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.
- Bernat, C., Andrés, J., & Martínez, J. (1987). Invernaderos construcción manejo rentabilidad (AEDOS). Barcelona, España.
- 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.
- Cando, C. (2016). Evaluación de cuatro variedades de rabano (*Raphanus sativus* L.) cultivados en cuatro fases lunares. Universidad de Guayaquil. Retrieved from

[http://repositorio.ug.edu.ec/bitstream/redug/11544/1/Cando Castro Carolina Cecibel.pdf](http://repositorio.ug.edu.ec/bitstream/redug/11544/1/Cando_Castro_Carolina_Cecibel.pdf)

Castilla, N. (2005). *Invernaderos de plástico tecnología y manejo (Mundi-Pren)*. Almería, España.

Criollo, H., & García, J. (2009). Efecto de la densidad de siembra sobre el crecimiento de plantas de rábano (*Raphanus sativus* L.) bajo invernadero. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, 3(2), 210–222. <https://doi.org/10.17584/rcch.2009v3i2.1214>

Delgadillo, R. (2016). INIAF inaugura invernadero automatizado en Sipe Sipe. 29 de Octubre de 2016. Retrieved from <http://www.lostiempos.com/actualidad/economia/20161029/iniaf-inaugura-invernadero-automatizado-sipe-sipe>

FAO. (2002). *El cultivo protegido en clima mediterráneo*. Roma.

FAO. (2012). *Guía para la construcción de invernaderos o fitotoldos*. Perú-Bolivia.

Gonzales, A. (2014). Diferencia en el crecimiento y desarrollo de *Raphanus sativus* (Brassicaceae) sembrado en cuatro fases lunares. *CienciAgro*, 3, 39–50.

Hernández, J., Escobar, I., & Castilla, N. (2001). La radiación solar en invernaderos mediterráneos. *Revista de Tecnología y Producción Hortícola*, 1–9.

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

INE. (2015). *Censo Agropecuario 2013 BOLIVIA*. La Paz, Bolivia.

INIAF. (2015). *Hortalizas sanas y de calidad , para el exigente mercado cruceño*. Santa Cruz- Bolivia.

IRROMETER. (2017). *Irrometer Soil Moisture Basics*. Retrieved from

%0Awww.irrometer.com/basicssp%0A

- Kittas, C. ., Boulard, T. ., Mermier, M. ., & Papadakis, G. . (1996). Wind Induced Air Exchange Rates in a Greenhouse Tunnel with Continuous Side Openings. *J. Agric. Engng Res*, 65, 37–49.
- Lorenzo, P. (2012). El cultivo en invernadero y su relación con el clima. *Cuadernos De Estudios Agroalimentarios*, 23–44.
- Mamani, T. (2014). Efecto de biol en cultivo asociado de rábano (*Raphanus sativus* L.) y lechuga suiza (*Valerianella locusta*), en ambiente atemperado de Cota Cota-La Paz. Universidad Mayor de San Andrés.
- Matallana, A., & Montero, J. (2001). Invernaderos diseños, construcción y ambientación (Mundi-Pren). Madrid, España.
- NOGUB, COSUDE, & ECOTOP. (n.d.). Invernaderos campesinos en Bolivia. Bolivia.
- Olías, M., Cerón, J. C., & Fernández, I. (2005). Sobre la utilización de la clasificación de las aguas de riego del U.S. Laboratory Salinity (USLS). *GEOGACETA*, 111–113.
- Papadakis, G., Briassoulis, D., Mugnozsa, G. S., Vox, G., Feuilloley, P., & Stoffers, J. A. (2000). Radiometric and Thermal Properties of, and Testing Methods for, Greenhouse Covering Materials. *Journal of Agricultural Engineering Research*.
- Papadakis, G., Mermier, M., Meneses, J. F., & Boulard, T. (1996). Measurement and analysis of air exchange rates in a greenhouse with continuous roof and side openings. *J. Agric. Engng Res.*, 63(3), 219–227.
- Porta, J., López-Acevedo, M., & Roquero, C. (1994). *Edafología para la agricultura y el medio ambiente* (p. 799). Madrid, España.
- Santos, B. M., Obregón-Olivas, H. A., & Salamé-Donoso, T. P. (n.d.). *Producción de Hortalizas en Ambientes Protegidos: Estructuras para la Agricultura Protegida*. Retrieved from

horticulture.ucdavis.edu/sites/g/files/dgvnsk1816/files/extension_material_files/Santos_academic_paper_estructuras_para_la_agricultura_protegida.pdf

- Segales, E., Rodríguez, J. P., Miranda, R., Trigo, R., & Bosque, H. (2013). Estimación del área foliar en campo mediante métodos no destructivos en el cultivo de cañahua (*Chenopodium pallidicaule* Aellen). La Paz-Bolivia.
- SENAMHI. (2017). Base de datos de la estación meteorológica de Achumani. La Paz, Bolivia.
- Sethi, V. P. (2007). On the selection of shape and orientation of a greenhouse for composite climates. In 2nd PALENC Conference and 28th AIVC Conference on Building Low Energy Cooling and Advanced Ventilation Technologies in the 21st Century (Vol. 2, pp. 941–945). Greece.
- Thipe, E. L. (2014). Comparative Analysis of two Greenhouse Microclimates in the Sub-humid Climate of South Africa. University of KwaZulu-Natal.
- UNE-EN 13031-1. (2002). Invernaderos Proyecto y construcción. España.
- Van Straten, G., & Van Henten, E. J. (n.d.). Optimal Greenhouse Cultivation Control: Survey and Perspectives.
- Villagrán, E. A. (2016). Diseño y evaluación climática de un invernadero para condiciones de clima intertropical de montaña. Universidad Nacional de Colombia. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2006.05.034>
- Villele, O. (1983). La serre, agent de modification du climat. Paris: Institut National de la Recherche Agronomique. L'INRA et les cultures sous serre.

ANEXOS

Anexo 1. Primera fase manejo manual: Datos meteorológicos en el invernadero móvil Pachamama.

FECHA	Tmax °C	Tmin °C	T promedio °C	HR max %	HR min %	HR promedio %	Rs promedio MJ m ² día ⁻¹	Viento m s ⁻¹
18/03/2017	54,3	11,9	33,1	93	17	55	10,37	0,0
19/03/2017	45,7	10,9	28,3	100	24	62	9,68	0,0
20/03/2017	49,1	9,6	29,4	98	19	59	11,45	0,0
21/03/2017	45,8	8,9	27,4	97	20	59	11,88	0,0
22/03/2017	48,7	11,1	29,9	95	25	60	7,07	0,0
23/03/2017	39,8	11,7	25,8	96	37	67	4,89	0,0
24/03/2017	50,1	10,8	30,5	100	26	63	9,91	0,0
25/03/2017	44,3	12,6	28,5	96	34	65	7,59	0,0
26/03/2017	35,9	12,5	24,2	91	42	67	4,68	0,0
27/03/2017	40,7	10,7	25,7	100	29	65	6,91	0,0
28/03/2017	29,3	10,9	20,1	99	57	78	3,86	0,0
29/03/2017	38,5	10,6	24,6	100	27	64	6,88	0,0
30/03/2017	39,8	11,9	25,9	100	31	66	7,10	0,0
31/03/2017	40,9	11,0	26,0	100	36	68	6,41	0,0
01/04/2017	39,5	10,9	25,2	97	40	69	4,57	0,0
02/04/2017	47,2	11,9	29,6	98	31	65	7,54	0,0
03/04/2017	38,7	11,3	25,0	99	43	71	6,27	0,0
04/04/2017	49,8	11,9	30,9	100	28	64	10,23	0,0
05/04/2017	50,8	9,5	30,2	100	16	58	10,26	0,0
06/04/2017	48,6	9,9	29,3	99	30	65	8,65	0,0
07/04/2017	43,9	11,2	27,6	100	24	62	6,77	0,0
08/04/2017	39,7	12,0	25,9	97	32	65	5,21	0,0
09/04/2017	44,3	8,7	26,5	100	44	72	7,18	0,0
10/04/2017	38,8	9,9	24,4	100	33	67	6,89	0,0
11/04/2017	32,4	9,3	20,9	100	47	74	4,80	0,0
12/04/2017	44,8	10,2	27,5	100	34	67	7,85	0,0
13/04/2017	44,2	11,2	27,7	98	18	58	11,15	0,0
14/04/2017	48,3	7,4	27,9	100	30	65	9,85	0,0
15/04/2017	49,9	8,2	29,1	99	25	62	11,13	0,0
16/04/2017	46,2	7,2	26,7	100	27	64	9,61	0,0
17/04/2017	36,9	8,6	22,8	100	31	66	5,36	0,0
18/04/2017	38,9	8,8	23,9	100	40	70	7,59	0,0
19/04/2017	45,2	8,8	27,0	100	19	60	10,80	0,0
20/04/2017	47,5	7,6	27,5	100	25	62	10,70	0,0
21/04/2017	49,7	6,4	28,1	100	30	65	10,60	0,0
22/04/2017	39,6	7,7	23,7	100	24	62	7,61	0,0

Anexo 2. Primera fase manejo manual: Datos meteorológicos en el invernadero Convencional.

FECHA	Tmax °C	Tmin °C	T promedio °C	HR max %	HR min %	HR promedio %	Rs promedio MJ m ² dia ⁻¹	Viento m s ⁻¹
18/03/2017	33,1	11,6	22,4	95	36	66	6,59	0,0
19/03/2017	37,1	10,5	23,8	98	31	65	6,61	0,0
20/03/2017	34,5	8,8	21,7	98	30	64	7,77	0,0
21/03/2017	31,8	8,1	20,0	97	30	64	7,01	0,0
22/03/2017	35,9	9,8	22,9	97	30	64	4,85	0,0
23/03/2017	28,8	11,5	20,2	97	38	68	3,44	0,0
24/03/2017	36,9	11,1	24,0	98	31	65	6,51	0,0
25/03/2017	31,9	12,2	22,0	97	41	69	5,40	0,0
26/03/2017	33,6	12,2	22,9	98	51	75	3,94	0,0
27/03/2017	30,1	10,6	20,4	98	39	69	4,73	0,0
28/03/2017	24,9	10,1	17,5	98	61	80	2,63	0,0
29/03/2017	31,5	9,9	20,7	96	40	68	4,67	0,0
30/03/2017	31,7	11,4	21,6	98	40	69	4,79	0,0
31/03/2017	32,6	10,7	21,7	98	44	71	4,38	0,0
01/04/2017	28,6	10,1	19,4	98	38	68	3,60	0,0
02/04/2017	42,0	11,6	26,8	98	43	71	5,13	0,0
03/04/2017	27,8	10,8	19,3	98	44	71	4,20	0,0
04/04/2017	32,6	11,2	21,9	98	27	63	6,79	0,0
05/04/2017	34,1	8,8	21,5	98	24	61	6,99	0,0
06/04/2017	32,3	9,2	20,8	97	32	65	6,05	0,0
07/04/2017	34,4	9,9	22,2	98	26	62	4,76	0,0
08/04/2017	33,5	11,2	22,4	98	37	68	3,76	0,0
09/04/2017	35,4	7,9	21,7	98	51	75	4,36	0,0
10/04/2017	33,8	9,4	21,6	98	43	71	5,63	0,0
11/04/2017	26,6	9,1	17,9	98	46	72	3,56	0,0
12/04/2017	33,7	9,8	21,8	98	37	68	5,61	0,0
13/04/2017	32,8	9,3	21,1	98	29	64	7,07	0,0
14/04/2017	39,4	7,0	23,2	98	37	68	7,03	0,0
15/04/2017	41,0	7,8	24,4	97	32	65	8,31	0,0
16/04/2017	37,3	6,8	22,1	98	34	66	6,79	0,0
17/04/2017	28,0	8,2	18,1	98	38	68	3,91	0,0
18/04/2017	30,0	8,4	19,2	98	47	73	4,77	0,0
19/04/2017	36,3	8,4	22,4	98	26	62	6,80	0,0
20/04/2017	38,6	7,2	22,9	98	32	65	7,88	0,0
21/04/2017	40,8	6,0	23,4	98	37	68	7,22	0,0
22/04/2017	30,7	7,3	19,0	98	31	65	4,79	0,0

Anexo 3. Primera fase: Datos meteorológicos a cielo abierto.

FECHA	Tmax °C	Tmin °C	T promedio °C	HR max %	HR min %	HR promedio %	Rs promedio MJ m ² dia ⁻¹	Viento m s ⁻¹
18/03/2017	20,1	7,7	13,9	95	45	70	37,59	0,1
19/03/2017	21,4	7,2	14,3	95	28	62	40,09	0,1
20/03/2017	20,3	5,9	13,1	97	38	68	46,75	0,1
21/03/2017	20,0	5,3	12,7	96	38	67	37,85	0,2
22/03/2017	18,2	7,2	12,7	95	52	74	27,27	0,1
23/03/2017	16,9	7,7	12,3	95	58	77	22,09	0,1
24/03/2017	18,9	6,7	12,8	96	53	75	37,20	0,1
25/03/2017	17,6	8,6	13,1	94	60	77	20,15	0,1
26/03/2017	16,8	8,2	12,5	96	56	76	24,27	0,0
27/03/2017	18,9	7,7	13,3	97	48	73	29,65	0,1
28/03/2017	15,4	8,1	11,8	96	67	82	16,63	0,0
29/03/2017	18,9	7,9	13,4	96	58	77	27,52	0,0
30/03/2017	18,7	8,5	13,6	95	47	71	29,54	0,1
31/03/2017	18,3	7,9	13,1	96	55	76	20,19	0,0
01/04/2017	17,1	8,2	12,7	95	60	78	23,84	0,0
02/04/2017	19,7	9,1	14,4	95	55	75	33,02	0,1
03/04/2017	19,2	8,3	13,8	95	46	71	27,43	0,0
04/04/2017	21,8	8,6	15,2	94	26	60	41,35	0,1
05/04/2017	20,2	6,7	13,5	96	32	64	39,22	0,0
06/04/2017	20,6	6,8	13,7	94	43	69	37,09	0,1
07/04/2017	21,6	8,3	15,0	95	36	66	33,01	0,1
08/04/2017	18,6	8,9	13,8	94	52	73	23,88	0,1
09/04/2017	18,0	6,1	12,1	96	45	71	16,64	0,0
10/04/2017	18,7	8,0	13,4	95	45	70	28,35	0,0
11/04/2017	16,4	6,9	11,7	96	57	77	10,61	0,0
12/04/2017	18,1	7,6	12,9	95	52	74	32,79	0,1
13/04/2017	20,7	7,6	14,2	93	32	63	43,61	0,1
14/04/2017	23,4	4,8	14,1	96	47	71	35,19	0,1
15/04/2017	25,0	5,6	15,3	95	42	68	36,47	0,1
16/04/2017	21,3	4,6	13,0	96	44	70	34,96	0,1
17/04/2017	12,0	6,0	9,0	96	48	72	30,70	0,0
18/04/2017	14,0	6,2	10,1	96	57	76	32,93	0,0
19/04/2017	20,3	6,2	13,3	96	36	66	36,15	0,1
20/04/2017	22,6	5,0	13,8	96	41	69	36,05	0,0
21/04/2017	24,8	3,8	14,3	96	47	71	35,95	0,1
22/04/2017	14,7	5,1	9,9	96	41	68	32,96	0,1

Anexo 4. Primera fase: Datos de temperatura de suelo en dos invernaderos.

FECHA	Inv. Movil Pachamama		Inv. Convencional	
	T promedio suelo °C	Humedad promedio suelo cbar	T promedio suelo °C	Humedad promedio suelo cbar
18/03/2017	21,6		19,0	
19/03/2017	21,9		18,5	
20/03/2017	21,1		18,2	
21/03/2017	20,5		17,7	
22/03/2017	20,0		17,3	
23/03/2017	19,2		17,1	
24/03/2017	19,1		17,5	
25/03/2017	20,5		14,8	
26/03/2017	19,7		18,0	
27/03/2017	19,0		17,5	
28/03/2017	18,3		16,8	
29/03/2017	17,9		16,7	
30/03/2017	18,9		17,2	
31/03/2017	19,2		17,3	
01/04/2017	18,6		16,8	
02/04/2017	19,0		17,7	
03/04/2017	19,3		17,6	
04/04/2017	20,3		17,9	
05/04/2017	20,6		17,8	
06/04/2017	20,3		17,4	
07/04/2017	19,5		17,3	
08/04/2017	18,8		17,2	
09/04/2017	17,6		16,7	
10/04/2017	17,7		16,8	
11/04/2017	17,2		16,0	
12/04/2017	17,1		16,4	
13/04/2017	17,9		17,1	
14/04/2017	17,7		16,4	
15/04/2017	18,0		16,9	
16/04/2017	17,7		16,3	
17/04/2017	17,0		16,0	
18/04/2017	16,5		15,2	
19/04/2017	17,0		15,2	
20/04/2017	16,2		14,9	
21/04/2017	16,3		14,8	
22/04/2017	16,4		15,1	

Anexo 5. Segunda fase manejo automático: Datos meteorológicos del invernadero móvil Pachamama.

FECHA	Tmax °C	Tmin °C	T promedio °C	HR max %	HR min %	HR promedio %	Rs promedio MJ m ⁻² dia ⁻¹	Viento m s ⁻¹
08/09/2017	36,0	9,6	22,8	82	16	49	3,47	0,0
09/09/2017	35,2	5,9	20,6	90	14	52	7,41	0,0
10/09/2017	44,3	6,1	25,2	90	10	50	9,27	0,0
11/09/2017	30,4	9,2	19,8	94	27	61	4,26	0,0
12/09/2017	26,8	7,6	17,2	94	37	66	2,37	0,0
13/09/2017	28,2	9,9	19,1	93	44	69	3,17	0,0
14/09/2017	33,2	11,7	22,5	84	34	59	3,74	0,0
15/09/2017	23,4	8,8	16,1	94	47	71	2,68	0,0
16/09/2017	29,3	9,1	19,2	89	35	62	3,68	0,0
17/09/2017	42,9	10,2	26,6	94	20	57	5,22	0,0
18/09/2017	42,2	9,7	26,0	96	14	55	11,79	0,0
19/09/2017	42,5	9,6	26,1	88	12	50	9,84	0,0
20/09/2017	39,3	8,6	24,0	94	15	55	9,33	0,0
21/09/2017	38,1	9,3	23,7	96	17	57	9,04	0,0
22/09/2017	38,3	7,3	22,8	96	18	57	6,33	0,0
23/09/2017	29,4	9,8	19,6	92	39	66	2,89	0,0
24/09/2017	44,9	8,9	26,9	94	12	53	7,72	0,1
25/09/2017	40,2	6,7	23,5	95	14	55	6,52	0,0
26/09/2017	42,6	7,3	25,0	96	14	55	7,70	0,0
27/09/2017	38,9	10,4	24,7	92	16	54	9,21	0,0
28/09/2017	43,5	6,6	25,1	97	13	55	10,76	0,0
29/09/2017	46,4	3,5	25,0	96	8	52	12,39	0,0
30/09/2017	38,2	5,4	21,8	93	10	52	11,26	0,0
01/10/2017	39,8	4,9	22,4	97	6	52	11,37	0,2
02/10/2017	40,4	1,1	20,8	90	5	48	13,63	0,0
03/10/2017	40,7	1,3	21,0	92	5	49	13,49	0,0
04/10/2017	39,8	6,8	23,3	91	10	51	13,38	0,0
05/10/2017	41,0	5,8	23,4	96	9	53	12,71	0,0
06/10/2017	36,1	7,8	22,0	93	14	54	12,63	0,0
07/10/2017	36,3	8,4	22,4	91	13	52	10,80	0,0
08/10/2017	39,8	9,1	24,5	92	14	53	10,42	0,0
09/10/2017	38,4	7,8	23,1	96	13	55	9,31	0,0
10/10/2017	35,8	10,2	23,0	93	12	53	8,08	0,0
11/10/2017	36,6	6,9	21,8	99	20	60	13,07	0,0

Anexo 6. Segunda fase manejo manual: Datos meteorológicos del invernadero Convencional.

FECHA	Tmax °C	Tmin °C	T promedio °C	HR max %	HR min %	HR promedio %	Rs promedio MJ m ⁻² dia ⁻¹	Viento m s ⁻¹
08/09/2017	34,2	7,5	20,9	97	26	62	12,02	0,0
09/09/2017	32,4	6,6	19,5	97	21	59	20,25	0,0
10/09/2017	50,5	6,1	28,3	97	34	66	23,21	0,0
11/09/2017	27,9	9,5	18,7	98	39	69	11,79	0,0
12/09/2017	27,9	7,7	17,8	97	61	79	7,01	0,0
13/09/2017	33,0	10,8	21,9	97	51	74	8,85	0,0
14/09/2017	27,1	9,8	18,5	97	45	71	11,94	0,0
15/09/2017	28,1	9,7	18,9	97	62	80	7,92	0,0
16/09/2017	25,3	10,1	17,7	97	51	74	7,89	0,0
17/09/2017	46,8	9,4	28,1	98	37	68	13,80	0,0
18/09/2017	35,8	9,2	22,5	98	23	61	23,18	0,0
19/09/2017	41,8	8,3	25,1	97	17	57	24,58	0,0
20/09/2017	48,7	8,5	28,6	97	24	61	23,53	0,0
21/09/2017	41,1	9,1	25,1	97	27	62	20,46	0,0
22/09/2017	46,5	7,4	27,0	97	40	69	15,56	0,0
23/09/2017	26,2	10,3	18,3	95	49	72	7,01	0,0
24/09/2017	50,3	9,3	29,8	98	25	62	19,30	0,0
25/09/2017	42,0	7,2	24,6	97	24	61	17,82	0,0
26/09/2017	41,8	7,4	24,6	97	22	60	20,11	0,0
27/09/2017	32,2	9,8	21,0	96	25	61	13,93	0,0
28/09/2017	35,7	6,7	21,2	97	22	60	19,67	0,0
29/09/2017	44,6	3,2	23,9	97	12	55	24,19	0,0
30/09/2017	38,4	4,7	21,6	97	15	56	24,09	0,0
01/10/2017	47,7	4,3	26,0	97	12	55	24,42	0,0
02/10/2017	43,8	0,7	22,3	97	10	54	20,60	0,0
03/10/2017	49,4	0,1	24,8	97	18	58	20,01	0,0
04/10/2017	42,2	5,8	24,0	96	20	58	19,45	0,0
05/10/2017	43,3	5,2	24,3	97	17	57	19,30	0,0
06/10/2017	44,7	7,3	26,0	97	20	59	18,63	0,0
07/10/2017	40,3	8,5	24,4	97	18	58	17,29	0,0
08/10/2017	56,4	8,8	32,6	96	20	58	18,15	0,0
09/10/2017	39,4	8,2	23,8	97	15	56	17,05	0,0
10/10/2017	44,2	7,6	25,9	97	17	57	12,93	0,0
11/10/2017	40,4	6,4	23,4	96	24	60	19,54	0,0

Anexo 7. Segunda fase: Datos meteorológicos a cielo abierto.

FECHA	Tmax °C	Tmin °C	T promedio °C	HR max %	HR min %	HR promedio %	Rs promedio MJ m ⁻² día ⁻¹	Viento m s ⁻¹
08/09/2017	19,6	3,7	11,7	96	26	61	40,00	0,2
09/09/2017	20,7	3,9	12,3	89	19	54	42,73	0,1
10/09/2017	22,1	4,7	13,4	89	13	51	47,20	0,1
11/09/2017	17,0	6,7	11,9	94	46	70	26,09	0,1
12/09/2017	13,2	5,3	9,3	94	66	80	15,40	0,1
13/09/2017	13,7	6,7	10,2	95	71	83	17,86	0,0
14/09/2017	16,5	6,1	11,3	96	52	74	24,94	0,1
15/09/2017	11,2	5,1	8,2	95	74	85	16,84	0,0
16/09/2017	14,2	5,9	10,1	93	63	78	18,45	0,0
17/09/2017	17,9	6,9	12,4	94	47	71	28,87	0,1
18/09/2017	22,0	7,1	14,6	93	20	57	48,52	0,1
19/09/2017	22,3	6,6	14,5	92	19	56	50,85	0,1
20/09/2017	23,8	5,8	14,8	91	26	59	48,97	0,1
21/09/2017	21,3	6,7	14,0	92	36	64	41,72	0,2
22/09/2017	18,5	4,8	11,7	91	42	67	33,34	0,1
23/09/2017	12,5	6,6	9,6	94	71	83	15,84	0,0
24/09/2017	20,5	5,7	13,1	93	32	63	40,54	0,0
25/09/2017	20,0	4,5	12,3	95	26	61	22,96	0,1
26/09/2017	21,2	5,2	13,2	95	32	64	42,38	0,1
27/09/2017	18,0	6,6	12,3	94	34	64	18,80	0,1
28/09/2017	20,6	3,6	12,1	94	21	58	41,98	0,1
29/09/2017	21,9	2,2	12,1	90	7	49	47,82	0,1
30/09/2017	23,4	3,8	13,6	78	9	44	49,16	0,1
01/10/2017	23,0	3,8	13,4	80	2	41	50,09	0,3
02/10/2017	21,1	1,0	11,1	28	1	15	49,37	0,2
03/10/2017	22,7	0,9	11,8	75	3	39	51,30	0,1
04/10/2017	23,4	3,7	13,6	92	13	53	50,90	0,1
05/10/2017	26,4	4,4	15,4	76	8	42	50,36	0,1
06/10/2017	24,0	5,8	14,9	93	20	57	48,97	0,3
07/10/2017	23,3	6,3	14,8	93	20	57	44,55	0,2
08/10/2017	24,2	7,4	15,8	92	21	57	43,65	0,2
09/10/2017	23,3	6,2	14,8	89	22	56	40,09	0,2
10/10/2017	22,8	8,4	15,6	90	18	54	31,38	0,2
11/10/2017	19,3	5,3	12,3	89	35	62	40,73	0,2

Anexo 8. Segunda fase manejo automático y manual: Datos de temperatura y humedad del suelo en dos invernaderos.

FECHA	Inv. Movil Pachamama		Inv. Convencional	
	T promedio suelo	Humedad promedio suelo	T promedio suelo	Humedad promedio suelo
	°C	cbar	°C	cbar
08/09/2017	16,7	24,4	17,0	28,3
09/09/2017	16,7	22,5	17,6	30,8
10/09/2017	16,9	20,6	18,8	35,1
11/09/2017	16,9	20,0	18,5	30,0
12/09/2017	15,4	35,7	17,1	37,1
13/09/2017	15,2	60,0	17,3	20,6
14/09/2017	15,9	63,7	17,4	41,2
15/09/2017	15,1	48,7	16,9	30,7
16/09/2017	14,6	30,8	16,5	25,3
17/09/2017	15,8	44,0	17,6	24,8
18/09/2017	17,1	55,6	18,8	26,5
19/09/2017	17,8	69,4	19,6	33,2
20/09/2017	18,4	81,4	20,5	72,7
21/09/2017	18,6	80,4	20,3	54,2
22/09/2017	17,6	83,8	19,7	118,2
23/09/2017	16,1	94,0	18,1	88,6
24/09/2017	16,9	79,5	18,9	129,4
25/09/2017	17,0	78,7	18,8	130,6
26/09/2017	17,2	87,9	18,7	98,5
27/09/2017	17,2	97,8	18,5	27,8
28/09/2017	17,2	44,9	18,7	35,6
29/09/2017	17,4	77,6	18,8	107,0
30/09/2017	17,5	42,0	19,2	73,9
01/10/2017	17,2	31,6	19,2	44,9
02/10/2017	15,8	67,1	18,0	83,4
03/10/2017	15,8	89,5	17,8	182,7
04/10/2017	16,9	44,6	19,0	125,8
05/10/2017	16,8	88,0	18,7	80,7
06/10/2017	16,9	58,7	18,5	88,7
07/10/2017	16,8	39,7	18,7	107,2
08/10/2017	16,7	61,2	19,0	76,9
09/10/2017	16,2	86,9	18,6	132,6
10/10/2017	16,1	109,4	18,1	200,0
11/10/2017	15,7	128,0	18,1	200,0

Anexo 13. Primera fase manejo manual: Análisis descriptivo de la presión de saturación de vapor ($e^0(T)$) y presión real de vapor (ea) en dos invernaderos y a cielo abierto.

	$e^0(T)$ Inv. Movil Pachamama	ea Inv. Movil Pachamama	$e^0(T)$ Inv. Convencional	ea Inv. Convencional	$e^0(T)$ A cielo abierto	ea A cielo abierto
Media (KPa)	5,22	3,33	3,23	2,17	1,63	1,15
Error típico	0,21	0,11	0,10	0,06	0,03	0,02
Mediana (KPa)	5,31	3,24	3,22	2,11	1,63	1,16
Moda (KPa)	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A
Desviación estándar (KPa)	1,26	0,67	0,59	0,39	0,18	0,11
Varianza de la muestra	1,59	0,45	0,35	0,15	0,03	0,01
Curtosis	-0,36	-1,05	0,36	1,41	0,75	2,04
Coefficiente de asimetría	0,16	0,05	0,62	1,11	-0,24	-0,44
Rango (KPa)	5,62	2,47	2,59	1,72	0,87	0,56
Mínimo (KPa)	2,69	2,10	2,19	1,65	1,17	0,84
Máximo (KPa)	8,31	4,57	4,78	3,37	2,04	1,40
Suma (KPa)	187,96	119,84	116,44	78,16	58,55	41,46
Cuenta	36	36	36	36	36	36

Anexo 14. Primera fase manejo manual: Análisis descriptivo de la temperatura promedio de suelo en dos invernaderos.

	Inv. Movil Pachamama	Inv. Convencional
Media (°C)	18,71	16,87
Error típico	0,26	0,18
Mediana (°C)	18,85	17,09
Moda (°C)	#N/A	#N/A
Desviación estándar (°C)	1,55	1,06
Varianza de la muestra	2,39	1,13
Curtosis	-0,77	-0,25
Coefficiente de asimetría	0,20	-0,48
Rango (°C)	5,67	4,17
Mínimo (°C)	16,25	14,81
Máximo (°C)	21,91	18,99
Suma (°C)	673,61	607,22
Cuenta	36,00	36,00

Anexo 19. Segunda fase manejo automático y manual: Análisis descriptivo de la presión de saturación de vapor ($e^o(T)$) y presión real de vapor (ea) en dos invernaderos y a cielo abierto.

	$e^o(T)$ Inv. Movil Pachamama	ea Inv. Movil Pachamama	$e^o(T)$ Inv. Convencional	ea Inv. Convencional	$e^o(T)$ A cielo abierto	ea A cielo abierto
Media (KPa)	3,89	2,12	4,43	2,71	1,65	0,96
Error típico	0,15	0,07	0,27	0,15	0,04	0,03
Mediana (KPa)	4,00	2,11	4,53	2,60	1,67	0,99
Moda (KPa)	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A
Desviación estándar (KPa)	0,87	0,39	1,57	0,89	0,25	0,17
Varianza de la muestra	0,76	0,15	2,48	0,80	0,06	0,03
Curtosis	-0,32	-0,61	0,57	0,59	-0,40	9,98
Coefficiente de asimetría	-0,28	0,30	0,66	1,00	-0,36	-2,68
Rango (KPa)	3,53	1,47	6,75	3,56	1,03	0,91
Mínimo (KPa)	2,01	1,41	2,23	1,65	1,10	0,23
Máximo (KPa)	5,54	2,88	8,98	5,21	2,14	1,14
Suma (KPa)	132,26	72,10	150,70	92,14	56,18	32,59
Cuenta	34	34	34	34	34	34

Anexo 20. Segunda fase manejo automático y manual: Análisis descriptivo de la temperatura promedio de suelo en dos invernaderos.

	Inv. Movil Pachamama	Inv. Convencional
Media (°C)	16,66	18,45
Error típico	0,16	0,16
Mediana (°C)	16,85	18,63
Moda (°C)	#N/A	#N/A
Desviación estándar (°C)	0,91	0,93
Varianza de la muestra	0,82	0,86
Curtosis	-0,04	0,08
Coefficiente de asimetría	-0,15	0,00
Rango (°C)	4,00	4,05
Mínimo (°C)	14,62	16,48
Máximo (°C)	18,62	20,53
Suma (°C)	566,33	627,22
Cuenta	34,00	34,00

Anexo 21. Segunda fase manejo automático y manual: Análisis descriptivo de la Humedad de suelo en dos invernaderos.

	Inv. Movil Pachamama	Inv. Convencional
Media (cbar)	63,17	77,15
Error típico	4,70	8,91
Mediana (cbar)	62,43	73,33
Moda (cbar)	#N/A	200,00
Desviación estándar (cbar)	27,40	51,95
Varianza de la muestra	750,97	2699,32
Curtosis	-0,59	0,14
Coefficiente de asimetría	0,19	0,94
Rango (cbar)	107,98	179,41
Mínimo (cbar)	19,98	20,59
Máximo (cbar)	127,96	200,00
Suma (cbar)	2147,95	2623,02
Cuenta	34,00	34,00

Anexo 22. Prueba "t" de student del porcentaje de emergencia del *Raphanus sativus* L. cv. Crimson Giant en dos invernaderos evaluados en 14 días (Primera fase).

FECHA	DÍA	Inv. Convencional		Inv. Movil Pachamama		Prueba "t" de Students		
		\bar{x} (%)	s (%)	\bar{x} (%)	s (%)	t_c	t_t	significancia
18-mar	0							
19-mar	1	0,0	0,0	0,0	0,0	-	-	-
20-mar	2	0,0	0,0	0,0	0,0	-	-	-
21-mar	3	0,5	0,8	1,2	1,0	1,7	1,7	NS
22-mar	4	22,3	11,0	52,2	6,8	6,9	1,7	*
23-mar	5	44,6	12,5	78,3	5,4	7,4	1,8	*
24-mar	6	59,4	14,4	84,5	6,2	4,8	1,8	*
25-mar	7	69,9	13,8	89,9	4,5	4,1	1,8	*
26-mar	8	81,0	7,7	91,7	3,7	3,8	1,8	*
27-mar	9	84,6	8,1	93,1	3,7	2,9	1,8	*
28-mar	10	86,6	7,3	93,6	3,6	2,6	1,8	*
29-mar	11	88,6	6,6	94,0	3,7	2,1	1,8	*
30-mar	12	90,7	5,5	94,1	3,7	1,6	1,7	NS
31-mar	13	92,2	5,1	94,1	3,7	0,9	1,7	NS
01-abr	14	92,7	4,9	94,1	3,7	0,7	1,7	NS

Anexo 23. Análisis descriptivo y prueba t de student de la altura de planta del *Raphanus sativus* L. cv. Crimson Giant en dos invernaderos (Primera fase).

	<i>Inv. Convencional</i>	<i>Inv. Movil Pachamama</i>
Media (cm)	38,0	43,9
Error típico	1,0	1,0
Mediana (cm)	37,1	44,0
Moda (cm)	#N/A	47,0
Desviación estándar (cm)	2,9	2,9
Varianza de la muestra	8,2	8,6
Curtosis	-2,0	0,0
Coficiente de asimetría	-0,1	-0,7
Rango (cm)	7,0	8,7
Mínimo (cm)	34,3	38,3
Máximo (cm)	41,3	47,0
Suma (cm)	341,8	395,2
Cuenta	9	9

<i>Medidas</i>	<i>Inv. Convencional</i>	<i>Inv. Movil Pachamama</i>
Media (cm)	38,0	43,9
Varianza	8,2	8,6
Observaciones	9	9
Varianza agrupada	8,4	
Diferencia hipotética de las medias	0,0	
Grados de libertad	16	
Estadístico t	4,3	*
P(T<=t) una cola	0,0	
Valor crítico de t (una cola)	1,7	
P(T<=t) dos colas	0,0	
Valor crítico de t (dos colas)	2,1	

Anexo 24. Prueba "t" de student y tabla de frecuencia de la cobertura vegetal del *Raphanus sativus* L. cv. Crimson Giant en dos invernaderos evaluados en 35 días (Primera fase).

FECHA	DÍA	Inv. Convencional			Inv. Movil Pachamama			Prueba "t" de Students		
		\bar{x} (%)	s (%)	n	\bar{x} (%)	s (%)	n	t_c	t_t	significancia
18-mar	0									
21-mar	3	0,0	0,0	4	0,0	0,0	4	-	-	-
23-mar	5	0,1	0,1	4	3,2	0,2	4	30,5	2,1	*
26-mar	8	2,4	1,6	4	5,4	1,0	4	2,8	2,0	*
29-mar	11	6,0	1,1	4	14,2	1,4	4	8,8	1,9	*
01-abr	14	6,7	0,7	4	16,7	1,1	4	14,1	1,9	*
04-abr	17	14,2	2,0	4	29,3	5,3	4	5,2	2,1	*
07-abr	20	25,0	2,1	4	48,6	2,6	4	13,3	1,9	*
10-abr	23	42,7	1,0	4	67,8	0,7	4	36,2	1,9	*
13-abr	26	58,4	0,5	4	82,1	2,5	4	18,8	2,4	*
16-abr	29	73,0	4,3	4	88,1	0,7	4	6,1	2,4	*
19-abr	32	77,8	1,0	4	94,4	0,8	4	23,7	1,9	*
22-abr	35	82,5	1,9	4	94,9	0,8	4	10,6	2,1	*

FECHA	DÍA	FRECUENCIA ACUMULADA		FRECUENCIA ABSOLUTA	
		Inv. Convencional (%)	Inv. Movil Pachamama (%)	Inv. Convencional (%)	Inv. Movil Pachamama (%)
18-mar	0				
21-mar	3	0,0	0,0	0,0	0,0
23-mar	5	0,1	3,2	0,1	3,2
26-mar	8	2,4	5,4	2,3	2,2
29-mar	11	6,0	14,2	3,5	8,8
01-abr	14	6,7	16,7	0,8	2,5
04-abr	17	14,2	29,3	7,5	12,6
07-abr	20	25,0	48,6	10,8	19,3
10-abr	23	42,7	67,8	17,6	19,2
13-abr	26	58,4	82,1	15,8	14,3
16-abr	29	73,0	88,1	14,6	6,0
19-abr	32	77,8	94,4	4,8	6,3
22-abr	35	82,5	94,9	4,7	0,4

Anexo 25. Análisis descriptivo y prueba t de student del área foliar por de planta del *Raphanus sativus* L. cv. Crimson Giant en dos invernaderos (Primera fase).

	<i>Inv. Convencional</i>	<i>Inv. Movil Pachamama</i>
Media (cm ²)	626,0	512,4
Error típico	37,9	30,8
Mediana (cm ²)	573,0	507,4
Moda (cm ²)	#N/A	#N/A
Desviación estándar (cm ²)	113,8	92,3
Varianza de la muestra	12958,8	8517,8
Curtosis	0,1	-1,0
Coefficiente de asimetría	1,2	0,3
Rango (cm ²)	308,4	268,6
Mínimo (cm ²)	524,7	378,4
Máximo (cm ²)	833,1	647,0
Suma (cm ²)	5633,6	4611,6
Cuenta	9	9

	<i>Inv. Convencional</i>	<i>Inv. Movil Pachamama</i>
Media (cm ²)	626,0	512,4
Varianza	12958,8	8517,8
Observaciones	9	9
Varianza agrupada	10738,3	
Diferencia hipotética de las medias	0,0	
Grados de libertad	16	
Estadístico t	2,3	*
P(T<=t) una cola	0,0	
Valor crítico de t (una cola)	1,7	
P(T<=t) dos colas	0,0	
Valor crítico de t (dos colas)	2,1	

Anexo 26. Determinación del índice de área foliar (IAF) en dos invernaderos (Primera fase).

$$IAF = \frac{\text{Área foliar (m}^2\text{)}}{\text{Área del suelo(m}^2\text{)}}$$

$$IAF_{inv. Convencional} = \frac{\frac{200 \text{ plantas}}{3 \text{ m}^2} \times 0,927 \times \frac{626,0 \text{ cm}^2}{1 \text{ plantas}} \times \frac{1 \text{ m}^2}{10000 \text{ cm}^2}}{1 \text{ m}^2} = 3,87$$

$$IAF_{inv. Movil Pachamama} = \frac{\frac{200 \text{ plantas}}{3 \text{ m}^2} \times 0,941 \times \frac{512,4 \text{ cm}^2}{1 \text{ plantas}} \times \frac{1 \text{ m}^2}{10000 \text{ cm}^2}}{1 \text{ m}^2} = 3,21$$

Anexo 27. Análisis descriptivo y prueba t de student del peso de la raíz del *Raphanus sativus* L. cv. Crimson Giant en dos invernaderos (Primera fase).

	<i>Inv. Convencional</i>	<i>Inv. Movil Pachamama</i>
Media (g)	27,4	23,1
Error típico	1,8	1,4
Mediana (g)	25,0	22,0
Moda (g)	23,0	21,0
Desviación estándar (g)	5,3	4,2
Varianza de la muestra	28,3	17,9
Curtosis	-0,3	0,2
Coficiente de asimetría	1,1	0,6
Rango (g)	14,0	14,0
Mínimo (g)	23,0	17,0
Máximo (g)	37,0	31,0
Suma (g)	247,0	208,0
Cuenta	9	9

	<i>Inv. Convencional</i>	<i>Inv. Movil Pachamama</i>
Media (g)	27,4	23,1
Varianza	28,3	17,9
Observaciones	9	9
Varianza agrupada	23,1	
Diferencia hipotética de las medias	0,0	
Grados de libertad	16	
Estadístico t	1,9	*
P(T<=t) una cola	0,0	
Valor crítico de t (una cola)	1,7	
P(T<=t) dos colas	0,1	
Valor crítico de t (dos colas)	2,1	

Anexo 28. Análisis descriptivo y prueba t de student del peso de las hojas del *Raphanus sativus* L. cv. Crimson Giant en dos invernaderos (Primera fase).

	<i>Inv. Convencional</i>	<i>Inv. Movil Pachamama</i>
Media (g)	35,6	39,0
Error típico	2,1	1,7
Mediana (g)	33,0	38,0
Moda (g)	33,0	41,0
Desviación estándar (g)	6,4	5,1
Varianza de la muestra	41,5	25,8
Curtosis	2,8	0,5
Coficiente de asimetría	1,6	0,8
Rango (g)	21,0	16,0
Mínimo (g)	29,0	33,0
Máximo (g)	50,0	49,0
Suma (g)	320,0	351,0
Cuenta	9	9

	<i>Inv. Convencional</i>	<i>Inv. Movil Pachamama</i>
Media (g)	35,6	39,0
Varianza	41,5	25,8
Observaciones	9	9
Varianza agrupada	33,6	
Diferencia hipotética de las medias	0,0	
Grados de libertad	16	
Estadístico t	-1,3	NS
P(T<=t) una cola	0,1	
Valor crítico de t (una cola)	1,7	
P(T<=t) dos colas	0,2	
Valor crítico de t (dos colas)	2,1	

Anexo 29. Análisis químico de suelo del invernadero móvil Pachamama después de la primera fase.

Universidad Mayor de San Andrés
Facultad de Ciencias Puras y Naturales
Instituto de Ecología
Laboratorio de Calidad Ambiental



Informe de Ensayo: S31/17

Página 1 de 3

INFORME DE ENSAYO EN SUELO S31/17

Cliente:	AGRONOMIA -UMSA
Solicitante:	Univ. Javier Ariel Ticoana Pari
Dirección del cliente:	Cota Cota
Procedencia de la muestra:	Centro Experimental Cota Cota Provincia: Murillo Departamento: La Paz
Punto de muestreo:	Invernadero de cota cota
Responsable del muestreo:	Univ. Javier Ariel Ticoana Pari
Fecha de muestreo:	04 de mayo de 2017
Hora de muestreo:	10:00
Fecha de recepción de la muestra:	08 de mayo de 2017
Fecha de ejecución del ensayo:	Del 08 de mayo al 29 de mayo, 2017
Caracterización de la muestra:	Muestra de invernadero con cubierta de resina reforzado con fibra de vidrio
Tipo de muestra:	Compuesta
Envase:	Bolsa Nylon 1kg.
Código LCA:	31-1
Código original de muestra:	ICRF

Resultado de Análisis

Parámetro	Método	Unidad	Límite de determinación	ICRF 31-1
Acidez intercambiable	ISRIC 11	cmolc/kg	0,050	< 0,050
Sodio intercambiable	ISRIC 9	cmolc/kg	0,0008	0,53
Potasio intercambiable	ISRIC 9	cmolc/kg	0,0053	0,61
Calcio intercambiable	ISRIC 9	cmolc/kg	0,016	9,3
Magnesio intercambiable	ISRIC 9	cmolc/kg	0,00083	3,8
Fósforo disponible (P)	ISRIC 14-3	P /mg*kg-1	1,5	9,0
Nitrógeno total	ISRIC 6	%	0,0014	0,035

International Soil Reference and Information Center (ISRIC)
Análisis de Suelos y Plantas tropicales (ASTP)
EPA= Environmental Protection Agency (Sampling and Analysis Methods)

* Los resultados de este informe no deben ser modificados sin la autorización del LCA.
* La difusión de los resultados debe ser en su integridad.

La Paz, mayo 29 de 2017

CC: Archivo
JCh/mra



Campus Universitario: Calle 27 de Cota Cota, La Paz, Telf./Fax: 2772522
Casilla Correo Central 10077, La Paz - Bolivia

Anexo 30. Análisis químico de suelo del invernadero Convencional después de la primera fase.

Universidad Mayor de San Andrés
 Facultad de Ciencias Puras y Naturales
 Instituto de Ecología
 Laboratorio de Calidad Ambiental



Informe de Ensayo: S31/17 Página 2 de 3

INFORME DE ENSAYO EN SUELO S31/17

Cliente: Solicitante: Dirección del cliente: Procedencia de la muestra:	AGRONOMIA -UMSA Univ. Javier Ariel Ticoan Pari Cota Cota Centro Experimental Cota Cota Provincia: Murillo Departamento: La Paz Invernadero cubierta agrofilm
Punto de muestreo: Responsable del muestreo: Fecha de muestreo: Hora de muestreo: Fecha de recepción de la muestra: Fecha de ejecución del ensayo: Caracterización de la muestra: Tipo de muestra: Envase: Código LCA: Código original de muestra:	Univ. Javier Ariel Ticoan Pari 04 de mayo de 2017 10:00 08 de mayo de 2017 Del 08 de mayo al 29 de mayo, 2017 Muestra de invernadero de cubierta de agrofilm Compuesta Bolsa Nylon 1,5kg. 31-2 ICAF

Resultado de Análisis

Parámetro	Método	Unidad	Límite de determinación	ICAF 31-2
Acidez intercambiable	ISRIC 11	cmolc/kg	0,050	< 0,050
Sodio intercambiable	ISRIC 9	cmolc/kg	0,00083	0,25
Potasio intercambiable	ISRIC 9	cmolc/kg	0,0053	0,53
Calcio intercambiable	ISRIC 9	cmolc/kg	0,02	9,0
Magnesio intercambiable	ISRIC 9	cmolc/kg	0,00083	4,0
Fósforo disponible (P)	ISRIC 14-3	P /mg*kg-1	1,50000	6,3
Nitrógeno total	ISRIC 6	%	0,0014	0,028

Análisis de Suelos y Plantas tropicales (ASTP)
 EPA= Environmental Protection Agency (Sampling and Analysis Methods)

* Los resultados de este informe no deben ser modificados sin la autorización del LCA.
 * La difusión de los resultados debe ser en su integridad.

La Paz, mayo 29 de 2017



CC: Archivo
JCH/ta



Campus Universitario: Calle 27 de Cota Cota, La Paz, Telf./Fax: 2772522
 Casilla Correo Central 10077, La Paz - Bolivia

Anexo 31. Análisis químico de compost con activador de Yogurt.

Universidad Mayor de San Andrés
Facultad de Ciencias Puras y Naturales
Instituto de Ecología
Laboratorio de Calidad Ambiental



Informe de Ensayo: MO 05/17

Página 1 de 1

INFORME DE ENSAYO DE COMPOST MO 05/17

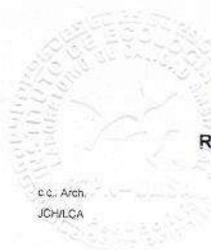
Cliente	AGRONOMIA -UMSA
Solicitantes:	Javier Ariel Ticona Paari
Dirección del cliente:	Cota Cota
Procedencia de la muestra:	Centro Experimental Cota Cota
	Provincia: Murillo
	Departamento: La Paz
Punto de muestreo:	Invernadero Cota Cota
Responsable del muestreo:	Javier Ariel Ticona Paari
Fecha de muestreo:	04 de mayo de 2017
Hora de muestreo:	11.00
Fecha de recepción de la muestra:	08 de mayo de 2017
Fecha de ejecución del ensayo:	Del 08 al 29 de mayo, 2017
Caracterización de la muestra:	Materia organica compost
Tipo de muestra:	Compuesta
Envase:	Bolsa Nylon
Código LCA:	05-2
Código original :	CT

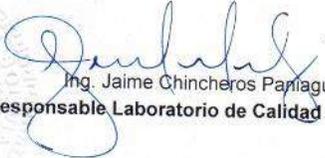
Resultado de Análisis

Parámetro	Método	Unidad	Limite de determinación	CT 05-2
Fósforo total	Metodo calcinación/ASPT 91	mgP/kg	0,40	5114
Nitrógeno total	ASPT-88	%	0,0030	1,7
Potasio total	Microwave Reaction System/EPA 258.1	mg/kg	8,0	4673
Materia Organica	Calcinacion	%	5,0	40

Los resultados de este informe no deben ser modificados sin la autorización del LCA.
La difusión de los resultados debe ser en su integridad.

La Paz, Mayo 29 de 2017




Ing. Jaime Chincheros Paniagua
Responsable Laboratorio de Calidad Ambiental



Campus Universitario: Calle 27 de Cota Cota, La Paz, Telf./Fax: 2772522
Casilla Correo Central 10077, La Paz - Bolivia.

Anexo 32. Prueba "t" de student del porcentaje de emergencia del *Raphanus sativus* L. cv. Crimson Giant en dos invernaderos evaluados en 14 días (Segunda fase).

FECHA	DÍA	Inv. Convencional		Inv. Movil Pachamama		Prueba "t" de Students		
		\bar{x} (%)	s (%)	\bar{x} (%)	s (%)	t_c	t_t	significancia
08-sep	0							
09-sep	1	0,0	0,0	0,0	0,0	-	-	-
10-sep	2	0,0	0,0	0,0	0,0	-	-	-
11-sep	3	17,8	16,9	9,2	10,5	-1,3	1,7	NS
12-sep	4	49,2	17,5	30,2	14,0	-2,5	1,7	NS
13-sep	5	62,0	13,3	46,3	13,7	-2,5	1,7	NS
14-sep	6	71,8	9,1	63,9	13,4	-1,5	1,7	NS
15-sep	7	75,1	6,8	69,2	13,8	-1,2	1,7	NS
16-sep	8	77,6	5,9	73,5	12,4	-0,9	1,7	NS
17-sep	9	72,1	7,9	78,9	11,5	1,5	1,7	NS
18-sep	10	60,7	8,2	82,6	10,4	5,0	1,7	*
19-sep	11	59,3	8,0	81,7	9,2	5,5	1,7	*
20-sep	12	57,4	8,8	81,1	9,3	5,5	1,7	*
21-sep	13	56,7	9,3	81,3	9,4	5,6	1,7	*
22-sep	14	56,5	9,2	81,9	9,8	5,7	1,7	*

Anexo 33. Análisis descriptivo y prueba t de student de la altura de planta del *Raphanus sativus* L. cv. Crimson Giant en dos invernaderos (Segunda fase).

	<i>Inv. Convencional</i>	<i>Inv.Movil Pachamama</i>
Media (cm)	18,1	26,1
Error típico	0,7	0,9
Mediana (cm)	18,7	26,2
Moda (cm)	#N/A	#N/A
Desviación estándar (cm)	2,2	2,7
Varianza de la muestra	5,0	7,2
Curtosis	-1,1	0,3
Coefficiente de asimetría	-0,5	-0,8
Rango (cm)	6,0	8,6
Mínimo (cm)	14,8	21,1
Máximo (cm)	20,8	29,7
Suma (cm)	163,1	235,3
Cuenta	9	9

<i>Medidas</i>	<i>Inv. Convencional</i>	<i>Inv. Movil Pachamama</i>
Media (cm)	18,1	26,1
Varianza	5,0	7,2
Observaciones	9	9
Varianza agrupada	6,1	
Diferencia hipotética de las medias	0,0	
Grados de libertad	16	
Estadístico t	6,9	*
P(T<=t) una cola	0	
Valor crítico de t (una cola)	1,7	
P(T<=t) dos colas	0,0	
Valor crítico de t (dos colas)	2,1	

Anexo 34. Prueba "t" de student y tabla de frecuencia de la cobertura vegetal del *Raphanus sativus* L. cv. Crimson Giant en dos invernaderos evaluados en 32 días (Segunda fase).

FECHA	DÍA	Inv. Convencional			Inv. Movil Pachamama			Prueba "t" de Students		
		\bar{x} (%)	s (%)	n	\bar{x} (%)	s (%)	n	t_c	t_t	significancia
08-sep	0									
11-sep	3	0,1	0,0	4	0,0	0,0	4	-12,2	1,9	NS
13-sep	5	1,1	0,2	4	0,6	0,2	4	-3,3	1,9	NS
16-sep	8	2,3	0,6	4	2,4	0,3	4	0,1	2,1	NS
19-sep	11	3,1	0,6	4	8,1	2,3	4	4,2	2,4	*
22-sep	14	4,1	1,1	4	15,5	3,7	4	6,0	2,1	*
25-sep	17	16,8	3,2	4	24,0	0,5	4	4,5	2,4	*
28-sep	20	22,7	1,6	4	36,2	1,4	4	12,4	1,9	*
01-oct	23	25,5	3,1	4	47,7	1,7	4	12,7	2,0	*
04-oct	26	37,5	3,8	4	67,5	4,6	4	10,1	1,9	*
07-oct	29	52,2	2,0	4	78,0	2,8	4	14,9	1,9	*
10-oct	32	65,6	6,7	4	89,0	2,2	4	6,6	2,1	*

FECHA	DÍA	FRECUENCIA ACUMULADA		FRECUENCIA ABSOLUTA	
		Inv. Convencional (%)	Inv. Movil Pachamama (%)	Inv. Convencional (%)	Inv. Movil Pachamama (%)
08-sep	0				
11-sep	3	0,1	0,0	0,1	0,0
13-sep	5	1,1	0,6	1,1	0,6
16-sep	8	2,3	2,4	1,2	1,7
19-sep	11	3,1	8,1	0,8	5,8
22-sep	14	4,1	15,5	0,9	7,4
25-sep	17	16,8	24,0	12,7	8,5
28-sep	20	22,7	36,2	6,0	12,2
01-oct	23	25,5	47,7	2,8	11,5
04-oct	26	37,5	67,5	12,0	19,7
07-oct	29	52,2	78,0	14,7	10,5
10-oct	32	65,6	89,0	13,4	11,0

Anexo 35. Análisis descriptivo y prueba t de student del área foliar por planta del *Raphanus sativus* L. cv. Crimson Giant en dos invernaderos (Segunda fase).

	<i>Inv. Convencional</i>	<i>Inv. Movil Pachamama</i>
Media (cm ²)	294,4	397,7
Error típico	28,6	24,2
Mediana (cm ²)	297,7	410,4
Moda (cm ²)	#N/A	#N/A
Desviación estándar (cm ²)	85,8	72,7
Varianza de la muestra	7354,4	5284,6
Curtosis	-1,5	-0,7
Coefficiente de asimetría	0,1	-0,4
Rango (cm ²)	223,2	211,1
Mínimo (cm ²)	186,3	285,8
Máximo (cm ²)	409,5	496,8
Suma (cm ²)	2649,5	3579,1
Cuenta	9	9

	<i>Inv. Convencional</i>	<i>Inv. Movil Pachamama</i>
Media (cm ²)	294,4	397,7
Varianza	7354,4	5284,6
Observaciones	9	9
Varianza agrupada	6319,5	
Diferencia hipotética de las medias	0,0	
Grados de libertad	16	
Estadístico t	-2,8	NS
P(T<=t) una cola	0,0	
Valor crítico de t (una cola)	1,7	
P(T<=t) dos colas	0,0141	
Valor crítico de t (dos colas)	2,1	

Anexo 36. Determinación del índice de área foliar (IAF) en dos invernaderos (Segunda fase).

$$IAF = \frac{\text{Área foliar (m}^2\text{)}}{\text{Área del suelo(m}^2\text{)}}$$

$$IAF_{inv. Movil Pachamama} = \frac{\frac{200 \text{ plantas}}{3 \text{ m}^2} \times 0,819 \times \frac{397,7 \text{ cm}^2}{1 \text{ plantas}} \times \frac{1 \text{ m}^2}{10000 \text{ cm}^2}}{1 \text{ m}^2} = 2,17$$

$$IAF_{inv. Convencional} = \frac{\frac{200 \text{ plantas}}{3 \text{ m}^2} \times 0,565 \times \frac{294,4 \text{ cm}^2}{1 \text{ plantas}} \times \frac{1 \text{ m}^2}{10000 \text{ cm}^2}}{1 \text{ m}^2} = 1,11$$

$$IAF_{inv. Convencional modelo} = \frac{\frac{200 \text{ plantas}}{3 \text{ m}^2} \times 0,945 \times \frac{294,4 \text{ cm}^2}{1 \text{ plantas}} \times \frac{1 \text{ m}^2}{10000 \text{ cm}^2}}{1 \text{ m}^2} = 1,85$$

Anexo 37. Análisis descriptivo y prueba t de student del peso de la raíz del *Raphanus sativus* L. cv. Crimson Giant en dos invernaderos (Segunda fase).

	<i>Inv. Convencional</i>	<i>Inv. Movil Pachamama</i>
Media (g)	21,8	23,3
Error típico	3,2	2,5
Mediana (g)	23,0	24,0
Moda (g)	12,0	24,0
Desviación estándar (g)	9,5	7,5
Varianza de la muestra	89,9	56,3
Curtosis	-1,6	2,1
Coefficiente de asimetría	0,2	0,3
Rango (g)	25,0	28,0
Mínimo (g)	11,0	10,0
Máximo (g)	36,0	38,0
Suma (g)	196,0	210,0
Cuenta	9	9

	<i>Inv. Convencional</i>	<i>Inv. Movil Pachamama</i>
Media	21,8	23,3
Varianza	89,9	56,3
Observaciones	9	9
Varianza agrupada	73,1	
Diferencia hipotética de las medias	0,0	
Grados de libertad	16	
Estadístico t	0,4	NS
P(T<=t) una cola	0,4	
Valor crítico de t (una cola)	1,7	
P(T<=t) dos colas	0,7	
Valor crítico de t (dos colas)	2,1	

Anexo 38. Análisis descriptivo y prueba t de student del peso de las hojas del *Raphanus sativus* L. cv. Crimson Giant en dos invernaderos (Segunda fase).

	<i>Inv. Convencional</i>	<i>Inv. Movil Pachamama</i>
Media (g)	12,2	23,4
Error típico	1,4	2,2
Mediana (g)	12,0	22,0
Moda (g)	9,0	22,0
Desviación estándar (g)	4,1	6,7
Varianza de la muestra	16,4	44,5
Curtosis	-1,2	-0,4
Coefficiente de asimetría	0,0	-0,2
Rango (g)	12,0	21,0
Mínimo (g)	6,0	13,0
Máximo (g)	18,0	34,0
Suma (g)	110,0	211,0
Cuenta	9	9

	<i>Inv. Convencional</i>	<i>Inv. Movil Pachamama</i>
Media (g)	12,2	23,4
Varianza	16,4	44,5
Observaciones	9	9
Varianza agrupada	30,5	
Diferencia hipotética de las medias	0,0	
Grados de libertad	16	
Estadístico t	4,3	*
P(T<=t) una cola	0,0	
Valor crítico de t (una cola)	1,7	
P(T<=t) dos colas	0,0	
Valor crítico de t (dos colas)	2,1	

Anexo 39. Galería de fotos del proceso de investigación.



Foto 1. Invernadero Convencional vista exterior



Foto 2. Vista interior del invernadero Convencional con pantallas de sombreo.



Foto 3. Invernadero móvil Pachamama vista exterior.



Foto 4. Vista interior invernadero móvil Pachamama.



Foto 5. Agua de pozo para riego con su sistema de bombeo.



Foto 6. Estación meteorológica DAVIS.



Foto 7. Sensor de humedad de suelo 6440.



Foto 8. Sensor de temperatura de suelo.



Foto 9. Extracción de suelo de una superficie de 9 m² en ambos invernaderos.



Foto 10. Incorporación del suelo homogenizado al área de estudio donde se extrajo.



Foto 11. Riego por goteo en el invernadero Convencional.



Foto 12. Riego por goteo en el invernadero móvil Pachamama.



Foto 13. Vista lateral del invernadero Convencional, ventanas laterales.



Foto 14. Personal abre de forma manual las ventanas laterales del invernadero Convencional.



Foto 16. Invernadero móvil Pachamama instalado el mecanismo electromecánico automatizado de ventanas cenitales.



Foto 17. Transmisión por cadenas



Foto 15. Ventanas cenitales abiertas por el mecanismo de piñón y cadena.



Foto 18. Eje central de transmisión de movimiento.

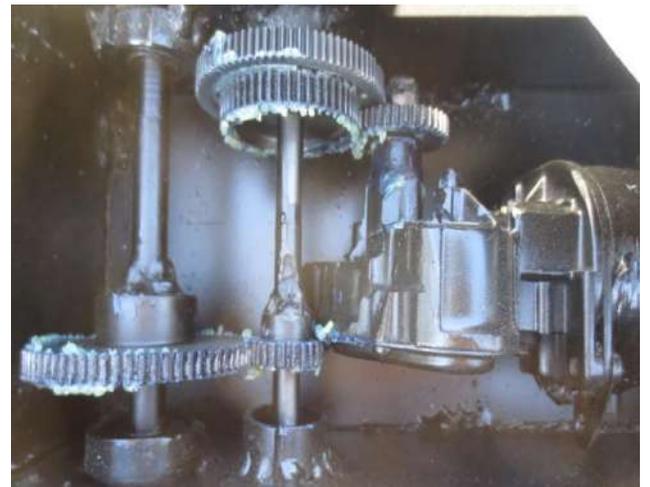


Foto 19. Motor y sistema de engranajes para incrementar el torque.



Foto 20. Ventanas laterales electromecánicas.



Foto 21. Vista superior del mecanismo Biela-manivela ventanas laterales.



Foto 22. Motor de las ventanas laterales.

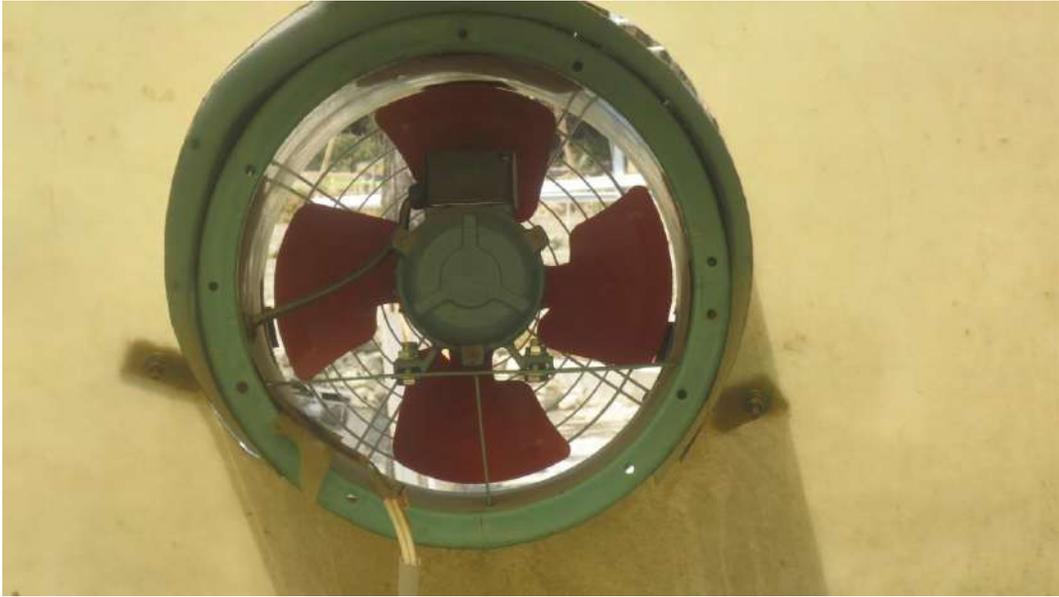


Foto 23. Extractor de aire vista interior invernadero móvil Pachamama.



Foto 24. Vista exterior de extractor de aire.



Foto 25. Ventilador vista interior invernadero móvil Pachamama.



Foto 26. Vista interior del ventilador.

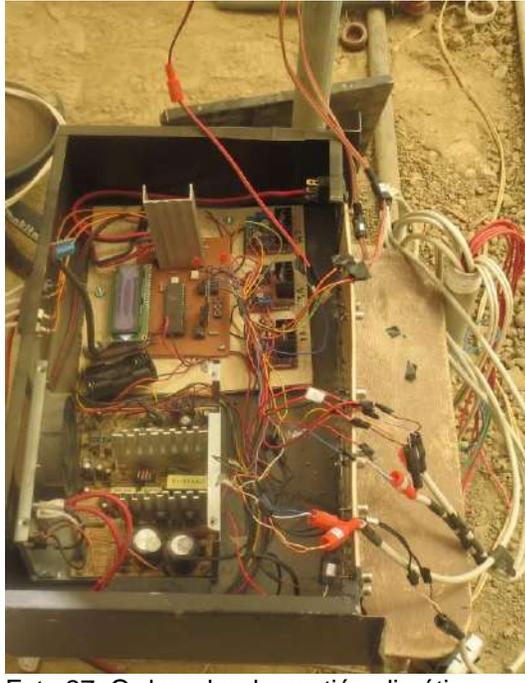


Foto 27. Ordenador de gestión climática



Foto 28. Sistema electrónico de riego automático.



Foto 29. Electroválvulas.



Foto 30. Sistema de riego automático instalado.



Foto 31. Vista interior del invernadero Convencional sin pantallas de sombreo.



Foto 32. Sin pantallas de sombreo en todo el invernadero, finales de invierno y principios de primavera.