

UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS  
FACULTAD DE AGRONOMÍA  
POSTGRADO



TESIS DE MAESTRIA

**CALIBRACIÓN DE LA ECUACIÓN FAO PENMAN-MONTEITH PARA  
CALCULAR LA EVAPOTRANSPIRACIÓN DE REFERENCIA ( $E_{T0}$ ) EN  
CONDICIONES DE INVERNADERO EN EL CENTRO EXPERIMENTAL DE COTA  
COTA**

CLARA BUTRÓN MAMANI

La Paz – Bolivia

2017

UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS  
FACULTAD DE AGRONOMÍA  
POSTGRADO  
MAESTRÍA EN INGENIERIA DE RIEGO

**CALIBRACIÓN DE LA ECUACIÓN FAO PENMAN-MONTEITH PARA  
CALCULAR LA EVAPOTRANSPIRACIÓN DE REFERENCIA (ET<sub>o</sub>) EN  
CONDICIONES DE INVERNADERO EN EL CENTRO EXPERIMENTAL DE COTA  
COTA**

*Tesis de Grado  
Presentada como requisito  
Para optar el Título de  
Master of Science*

CLARA BUTRÓN MAMANI

**ASESOR:**

Ing. Ph. D. Magali García Cárdenas .....

**TRIBUNAL REVISOR:**

Ing. M. Sc. Jonhy Cesar Pánfilo Oliver Cortez .....

Ing. M. Sc. Paulino Ruiz Huanca .....

Ing. M. Sc. Alfredo Ronald Veizaga Medina .....

**Aprobada**

**Presidente Tribunal Examinador** .....

La Paz – Bolivia  
2017

## *DEDICATORIA*

*Con eterno agradecimiento a los seres que más amo:*

*Mis queridos padres Javier Butrón y Julia Mamani, por su apoyo infinito, sus sabios consejos y su amor incondicional, quienes supieron forjar un espíritu de energía, encaminando al conocimiento intelectual en bien de la sociedad y al servicio de Dios.*

*A mis hermanos Iván Butrón y Laura Isabel Butrón por su apoyo, paciencia y cariño.*

*A toda mi familia y amigos que siempre me brindaron su apoyo.*

## AGRADECIMIENTOS

Un sincero agradecimiento a las siguientes instituciones y personas que hicieron posible la culminación del presente trabajo de investigación:

- A Dios nuestro creador, que siempre nos acompaña a cada uno de nosotros con su bendición y por haber guiado mis pasos.
- A la Universidad Mayor de San Andrés, Facultad de Agronomía, por el apoyo económico que me permitió realizar una especialización profesional e hizo posible la realización y conclusión de los estudios de postgrado.
- Agradecer infinitamente a mi asesora: Ing. Ph. D. Magali García Cárdenas por su apoyo durante todo el proceso de investigación y *la elaboración de la tesis*, por sus recomendaciones oportunas, por la paciencia, comprensión y por todo el apoyo recibido para que el trabajo de investigación pueda ser un documento que contribuya al conocimiento.
- Al Centro Experimental de Cota Cota y al Ing. William Murillo, por su apoyo incondicional que hicieron posible la realización del presente trabajo de investigación.
- A mi querida familia, mis padres Javier y Julia, y mis hermanos Iván y Laura, quienes me brindaron su apoyo incondicional sin importar el momento, para mi superación en la vida académica.
- A mis amigos y compañeros de la maestría por haberme brindado su amistad incondicional y haberme permitido compartir momentos de estudio y alegrías en el tiempo de estudios durante el periodo del curso.

## TABLA DE CONTENIDO GENERAL

TABLA DE CONTENIDO .....	II
TABLA DE FIGURAS.....	V
TABLA DE CUADROS.....	VII
LISTA DE SIMBOLOS .....	VIII

## TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN .....	1
1.1 Antecedentes .....	1
1.2 Justificación .....	2
1.3 Objetivos .....	3
1.3.1 Objetivo general .....	3
1.3.2 Objetivos específicos .....	3
2. REVISIÓN DE LITERATURA.....	4
2.1 Las necesidades de agua de los cultivos.....	4
2.2 Importancia de la evapotranspiración de referencia (ET <sub>o</sub> ) .....	4
2.3 Proceso de evapotranspiración.....	6
2.3.1 Evaporación .....	6
2.3.2 Transpiración .....	7
2.3.3 Evapotranspiración (ET).....	7
2.3.3.1 Evapotranspiración de referencia (ET <sub>o</sub> ) .....	8
2.3.3.2 Evapotranspiración de cultivo (ET <sub>c</sub> ) .....	9
2.3.3.3 Coeficiente de cultivo (K <sub>c</sub> ) .....	9
2.4 Factores climáticos que influyen en el consumo de agua en invernadero .....	9
2.5 Factores meteorológicos que determinan la ET.....	10
2.5.1 Radiación solar .....	10
2.5.2 Temperatura del aire .....	10
2.5.3 Humedad del aire.....	11
2.5.4 Velocidad del viento .....	11
2.6 Modelos para determinar la ET <sub>o</sub> caso de un invernadero .....	12
2.6.1 El modelo de tanque evaporímetro Clase A.....	12
2.6.2 El modelo de radiación.....	13
2.7 Determinación de la evapotranspiración de referencia (ET <sub>o</sub> ) .....	13
2.7.1 Métodos de balance de energía y micro climáticos.....	14
2.7.2 Balance de agua en el suelo .....	16
2.7.3 Lisímetros.....	16

2.8	Evapotranspiración calculada con datos meteorológicos .....	18
2.8.1	Ecuación de FAO Penman-Monteith.....	18
2.9	Productividad de agua en la agricultura.....	24
2.10	Invernadero .....	24
3.	MATERIALES Y METODOS .....	26
3.1	Localización .....	26
3.1.1	Fisiografía y características edáficas .....	27
3.1.2	Clima.....	27
3.1.3	Vegetación .....	27
3.2	Materiales .....	27
3.2.1	Material vegetal.....	27
3.2.2	Material de campo.....	27
3.2.3	Equipos de recolección de información climática.....	28
3.3	Métodos .....	28
3.3.1	Establecimiento de investigación .....	28
3.3.2	Instalación de estación meteorológica y de suelo .....	29
3.3.2.1	Recolección de datos meteorológicos .....	29
3.3.3	Medición de la evapotranspiración de referencia (ET <sub>o</sub> ) .....	30
3.3.3.1	Método de micro lisímetro .....	30
3.3.3.2	Método FAO Penman-Monteith .....	31
3.4	Información necesaria para la aplicación de la ecuación FAO Penman-Monteith.....	31
3.4.1	Localización .....	31
3.4.2	Temperatura.....	32
3.4.3	Presión de vapor real .....	32
3.4.4	Radiación neta .....	32
3.4.5	Viento.....	32
3.4.6	Análisis estadístico.....	33
4.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	34
4.1	Análisis físico del suelo.....	34
4.2	Datos meteorológicos al exterior y al interior del invernadero.....	34

4.3 Comportamiento de la ETo y contribución de los términos radiativo y aerodinámico en la ecuación FAO Penman-Monteith dentro del invernadero.....	36
4.3.1 Evaluación de los términos radiativo y aerodinámico en la ecuación FAO Penman-Monteith dentro del invernadero .....	36
4.3.1.1 Dinámica del término radiativo .....	39
4.3.1.2 Dinámica del término aerodinámico .....	43
4.4 Evaluación del consumo de agua del ray grass en lisímetro .....	43
4.4.1 Relación del consumo de agua del ray grass con los factores que determinan los valores de la ETo calculada con la ecuación FAO Penman-Monteith .....	44
4.5 Comportamiento de la ETo a cielo abierto y en invernadero .....	50
4.5.1 Comportamiento mensual de la ETo a cielo abierto y en invernadero ..	53
4.5.2 Comportamiento de la radiación solar medida y la estimada con la ecuación de Hargreaves dentro y fuera del invernadero.....	55
4.5.3 Comportamiento de ETo con datos faltantes de radiación dentro y fuera del invernadero.....	57
4.6 Correcciones sugeridas para el cálculo de la ETo en invernadero .....	59
5. CONCLUSIONES.....	65
6. RECOMENDACIONES .....	66
7. BIBLIOGRAFÍA .....	67

## TABLA DE FIGURAS

Figura 1. Ubicación del Centro Experimental de Cota Cota.....	26
Figura 2. Valores de temperatura máxima y mínima semanal a cielo abierto y bajo condiciones de invernadero. ....	35
Figura 3. Valores calculados de ETo incluyendo solamente el término radiativo e incluyendo ambos términos para condiciones de invernadero. ....	37
Figura 4. Regresión lineal de radiación solar y evapotranspiración de referencia (ETo) en invernadero. ....	40
Figura 5. Correlación y regresión lineal entre la radiación neta y la evapotranspiración de referencia dentro del invernadero. ....	41
Figura 6. Comportamiento de balance de onda corta y el balance de onda larga en invernadero. ....	42
Figura 7. Evapotranspiración de referencia diaria, estimada con la ecuación FAO Penman-Monteith, y la Evapotranspiración medida con lisímetro al interior del invernadero. ....	44
Figura 8. Comportamiento de la Radiación solar a cielo abierto y en invernadero 1. ....	45
Figura 9. Comportamiento de la radiación solar horaria bajo condiciones de cielo abierto, invernadero principal. ....	46
Figura 10. Transmitancia del material del invernadero en situación de día despejado y nublado. ....	47
Figura 11. Intensidad lumínica externa y en la interior del invernadero en el transcurso de un día. ....	48
Figura 12. Regresión lineal entre la radiación solar medida al interior y al exterior del invernadero, entre febrero y julio de 2015. ....	49
Figura 13. Valores diarios de evapotranspiración de referencia (ETo) estimados a través de la ecuación FAO Penman-Monteith, a cielo abierto y en invernadero. ....	50
Figura 14. Regresión lineal de la radiación solar y la evapotranspiración de referencia a cielo abierto. ....	52

Figura 15. Regresión lineal de la ETo a cielo abierto y la ETo en invernadero.....	53
Figura 16. Comportamiento de la Evapotranspiración de referencia mensual a cielo abierto y en invernadero 1 y 2.....	54
Figura 17. Comportamiento de la radiación solar medida con la estación y la estimada con la ecuación de Hargreaves en caso de datos faltantes a cielo abierto.....	55
Figura 18. Comportamiento de la radiación solar medida con la estación y la estimada con la ecuación de Hargreaves en caso de dato faltante en invernadero.....	56
Figura 19. Comportamiento de ETo calculada con la radiación solar medida con la estación meteorológica y la ETo calculada con la radiación solar estimada con la ecuación de Hargreaves a cielo abierto.....	57
Figura 20. Correlación y regresión lineal entre la ETo calculada con la radiación solar medida y la ETo calculada con la radiación solar estimada con la ecuación de Hargreaves y Samani a cielo abierto.....	58
Figura 21. Comportamiento de ETo en invernadero con variables de radiación solar medida y la radiación solar estimada con la ecuación de Hargreaves...	58
Figura 22. Comportamiento horario de la ETo y la radiación solar a cielo abierto para días despejado y nublado.....	59
Figura 23. Comportamiento horario de la ETo y radiación solar al interior del invernadero en un día despejado y otro nublado.....	60
Figura 24. Relación lineal de la radiación solar a cielo abierto estimada con la ecuación de Hargreaves y la radiación solar medida con la estación meteorológica al interior del invernadero.....	62
Figura 25. ETo para condiciones de invernadero ajustada con la radiación solar estimada a cielo abierto con la ecuación de Hargreaves.....	63
Figura 26. Regresión lineal de la ETo calculada con la radiación solar medida al interior del invernadero (a) y la ETo con radiación solar ajustada para condiciones de invernadero (b).....	64

## TABLA DE CUADROS

Cuadro 1. Media mensual de datos climáticos de temperatura, presión real de vapor, radiación solar, velocidad del viento y evapotranspiración de referencia calculada por ecuación FAO Penman-Monteith.....	34
Cuadro 2. Comparación del promedio diario mensual de ETo calculada solo con el termino radiativo y calculada incluyendo también el termino aerodinámico si se asumen dos velocidades de viento.....	38
Cuadro 3. Valores de temperatura, humedad relativa y radiación solar necesarios para el termino energético de la ecuación FAO Penman-Monteith al interior del invernadero. ....	39
Cuadro 4. Valores de temperatura, presión de vapor y velocidad del viento necesarios para el termino aerodinamico de la ecuación FAO Penman-Monteith al interior del invernadero.....	43

## LISTA DE SIMBOLOS

DPV = Déficit de presión de vapor

ET = Evapotranspiración

ET<sub>o</sub> = Evapotranspiración de referencia

G = Flujo de calor del suelo

$\Lambda$ t = Flujo de calor latente

H = Calor sensible

R = Riego

P = Precipitación

ES = Escurrimiento superficial

D = Percolación

C = Capilaridad

SW = Contenido de agua en el suelo

R<sub>n</sub> = Radiación neta

T = Temperatura media del aire

$u_2$  = Velocidad del viento

$e_s$  = Presión de vapor de saturación

$e_a$  = Presión real de vapor

$e_s - e_a$  = Déficit de presión de vapor

$\Delta$  = Pendiente de la curva de presión de vapor

$\gamma$  = Constante psicométrica

$R_a$  = Radiación extraterrestre

$G_{SC}$  = Constante solar

$d_r$  = Distancia relativa inversa Tierra-Sol

$\omega_s$  = Angulo de radiación a la puesta del sol

$\phi$  = Latitud en radianes

$\delta$  = Declinación solar

$R_{ns}$  = Radiación neta solar o de onda corta

$\alpha$  = Albedo o coeficiente de reflexión del cultivo

$R_{nl}$  = Radiación neta de onda larga

$\sigma$  = Constante de Stefan-Boltzmann

$T_{max,K}$  = Temperatura máxima absoluta

$T_{min,K}$  = Temperatura mínima absoluta

$R_{so}$  = Radiación en un día despejado

$R_s$  = Radiación solar

$k_{RS}$  = Coeficiente de ajuste

$P$  = Presión atmosférica media mensual del lugar

$P_o$  = Presión media mensual a nivel del mar

## RESUMEN

La determinación de las necesidades de riego de los cultivos se basa en la estimación precisa de la evapotranspiración de referencia (ET<sub>o</sub>) de cada zona en particular, y a su vez, las posibles alternativas para la estimación están sujetas a la limitación de la información meteorológica existente en cada país. El principal problema para la programación de riego en ambientes controlados, es la insuficiencia de datos de evapotranspiración de referencia dentro de ellos, tomando en cuenta que su valor es un concepto básico en el manejo del agua y la planificación de riego.

La evapotranspiración de referencia se puede calcular mediante fórmulas muy difundidas y validadas como la ecuación de FAO-Penman-Monteith que estiman de forma indirecta la ET<sub>o</sub>. Este método se presenta como el más recomendado para determinar la evapotranspiración de referencia (ET<sub>o</sub>) (Allen *et al.*, 2006) bajo diferentes condiciones climáticas, la presente investigación pretende calibrar la ecuación FAO Penman-Monteith para el cálculo de la evapotranspiración de referencia (ET<sub>o</sub>) en condiciones de invernadero en el Centro Experimental de Cota Cota.

El cálculo de la evapotranspiración de referencia en condiciones de invernadero, se realizó a través de los métodos directo e indirecto; el primero se basa en la entrada y salida de agua en un cultivo específico (ray grass), como son los lisímetros, el segundo denota la ecuación de FAO Penman-Monteith la cual es utilizada para determinar los requerimientos hídricos de los cultivos.

La radiación solar diaria recibida al interior del invernadero de estudio fue en promedio 60,7% más baja que la recibida en el ambiente externo del invernadero, en consecuencia, la ET<sub>o</sub> dentro del entorno protegido es menor en promedio 61,6% a la ET<sub>o</sub> a cielo abierto, esto puede explicarse por la influencia de los principales factores de la demanda evaporativa de la atmosfera, tales como los valores de velocidad del viento inferiores, mayor humedad relativa y menor incidencia de la radiación solar directa en el interior de invernaderos.

La evapotranspiración de referencia (ET<sub>o</sub>) al interior del invernadero está influenciada en gran proporción por la energía radiativa y muy levemente por la energía aerodinámica.

La ecuación lineal puede aplicarse para ajustar la radiación solar calculada con el método de Hargreaves a cielo abierto a la radiación solar para condiciones de invernadero, la ecuación lineal está dada por:

$$R_s(\text{ajustada inv.}) = 0,613 * R_s(\text{est. afuera HG}) - 2,9184$$

La ET<sub>o</sub> en invernadero calculada con la ecuación FAO Penman-Monteith en función a la radiación solar ajustada con la ecuación lineal mencionada anteriormente muestra un coeficiente de correlación de 0,93, indicando que la radiación solar ajustada para condiciones de invernadero presenta resultados similares a los calculados con la ecuación FAO Penman-Monteith en base a los datos reales que se midieron al interior del invernadero.

## ABSTRACT

Determining irrigation needs of crops is based on the accurate estimation of reference evapotranspiration (ET<sub>o</sub>) of each particular area, and in turn, the possible alternatives for the estimation are subject to the limitation of existing weather information in each country. The main problem for scheduling irrigation in controlled environments, is the lack of reference evapotranspiration data within them, considering that the value of reference evapotranspiration is a basic concept in water management and irrigation planning.

It can be calculated by widespread and validated as the equation of FAO-Penman-Monteith indirectly estimate the ET<sub>o</sub> formulas. This method is presented as the most recommended to determine evapotranspiration ET<sub>o</sub> reference (Allen et al., 2006) under different climatic conditions, this research aims to calibrate the FAO Penman-Monteith for calculating reference evapotranspiration (ET) under greenhouse conditions at the Experimental Center of Cota Cota.

The calculation of reference evapotranspiration in greenhouse conditions was conducted through direct and indirect methods; the first is based on the input and output of water in a specific crop, such as micro lysimeter and the second method denotes the equation Penman-Monteith FAO which is used to determine the water requirements of crops.

The daily solar radiation inside the greenhouse study averaged 60.7% lower than that received in the external environment of the greenhouse, thus ET<sub>o</sub> within the protected environment is lower on average 61.6% to ET<sub>o</sub> to the sky, this can be explained by the influence of the main factors of the evaporative demand of the atmosphere, such as the values of lower wind speed, higher humidity and lower incidence of direct solar radiation inside greenhouses.

The reference evapotranspiration (ET<sub>o</sub>) inside the greenhouse is influenced to a large extent by the radiative energy and very slightly by aerodynamic energy.

The linear equation can be applied to adjust the calculated solar radiation Hargreaves open to sunlight for greenhouse conditions, sky-linear equation is given by:

$$R_s (\text{ajustada inv.}) = 0,613 * R_s (\text{est. afuera HG}) - 2,9184$$

ETo greenhouse calculated using FAO Penman-Monteith according to sunlight adjusted with the aforementioned linear equation showing a correlation coefficient of 0.93, indicating that the adjusted solar radiation to greenhouse conditions presented similar results to those calculated with the FAO Penman-Monteith equation based on actual measured data inside the greenhouse.

## 1. INTRODUCCIÓN

El desarrollo y uso de invernaderos es una de las técnicas que se utiliza en la producción agrícola de muchos países ya que estos se adaptan a zonas y a condiciones meteorológicas inadecuadas, donde se logra modificar y controlar las condiciones ambientales dentro del mismo, para un mejor desarrollo del cultivo. Además, el uso de invernaderos es una de las soluciones a la problemática de la escasez de agua a nivel mundial debido a la utilización de sistemas de riego adecuados, los cuales hacen un uso más eficiente de este recurso (Valera, 2013).

Desde hace mucho tiempo, el llegar a conocer los consumos de agua por parte de los cultivos, y especialmente los requerimientos hídricos netos y brutos de riego, es una preocupación de los ingenieros, proyectistas, gestores y agricultores. Los consumos de agua de un cultivo, o necesidades hídricas, se corresponden con su evapotranspiración (ET) en un determinado ambiente y bajo un manejo concreto del mismo; dicha ET es la suma de dos procesos, fundamentalmente, la transpiración de la cubierta vegetal y la evaporación de agua desde el suelo que la soporta (Pereira *et al.*, 2010).

La determinación de las necesidades de riego de los cultivos se basa en la estimación precisa de la evapotranspiración de referencia (ET<sub>o</sub>) de cada zona en particular, y a su vez, las posibles alternativas para la estimación están sujetas a la limitación de la información meteorológica existente en cada país. Por lo tanto, la ET<sub>o</sub> viene a representar un índice climático asociado al área en estudio, lo que la hace útil para la evaluación de las condiciones de humedad de una área determinada, en equilibrio con su clima (Trezza, 2008).

### 1.1 Antecedentes

En la región centro occidental de Venezuela, se estimaron los valores de evapotranspiración del cultivo de referencia, concepto básico en el manejo del agua y la planificación del riego. Se utilizaron los métodos de Penman-Monteith sobre la base de datos climáticos de registro diario y decadal. La estimación con este método en dos periodos (abril-julio y julio-noviembre) presentando una correlación mayor a 75 y 80 % en cada caso respectivo (Lopez y Dennett, 2005).

Trezza (2008), analizó varias metodologías disponibles para realizar estimaciones de evapotranspiración de referencia a nivel mensual a partir de la información de estaciones meteorológicas ubicadas en diferentes regiones de Venezuela, encontró que los procedimientos más aplicables para estas condiciones climáticas son los incluidos en la publicación de la FAO-56, especialmente el método de FAO Penman-Monteith. El método de FAO-Penman-Monteith se considera que ofrece los mejores resultados con el mínimo error posible con relación a un cultivo de referencia (pasto) (Allen *et al.*, 2006).

Existen diferentes metodologías de riego las cuales permiten decidir cuándo y qué cantidad de agua aplicar para suplir las necesidades hídricas del cultivo, sin embargo esta información está disponible más para cultivos a cielo abierto que para el caso de invernaderos. Entre estos estudios se encuentran los realizados en Almería, Cajamar donde adaptaron el modelo de Radiación FAO-56, para estimar los requerimientos hídricos de cultivos en invernadero (Fernandez *et al.*, 2001).

## **1.2 Justificación**

El principal problema para la programación de riego en ambientes controlados, es la insuficiencia de datos de evapotranspiración de referencia dentro de ellos, tomando en cuenta que el valor de evapotranspiración de referencia es un concepto básico en el manejo del agua y la planificación de riego. La evapotranspiración de referencia (ET<sub>o</sub>) ha sido el parámetro menos estudiado debido a la poca disponibilidad de datos meteorológicos de calidad por lo que se conoce muy poco de su comportamiento en condiciones de invernadero.

Es importante tener en cuenta que el recurso agua se hace más escaso para la agricultura, por lo tanto es necesario conocer la ET<sub>o</sub> en invernadero, lo que permitirá realizar un uso más eficiente de este recurso en ambiente protegido. En este marco, se presenta la importancia de evaluar los modelos o métodos para estimar la ET<sub>o</sub> para condiciones climáticas y agronómicas muy diferentes de aquellas condiciones para las que inicialmente fueron desarrolladas.

La evapotranspiración de referencia es una medida muy utilizada ya que permite conocer el consumo hídrico de los cultivos y por tanto otorga con precisión las necesidades hídricas a aportar en forma de riego. Se puede calcular mediante fórmulas muy difundidas y validadas como la ecuación de FAO-Penman-Monteith que lo estiman de forma indirecta. Este método se presenta como el más recomendado para determinar la evapotranspiración de referencia ETo (Allen *et al.*, 2006) bajo diferentes condiciones climáticas.

### **1.3 Objetivos**

#### **1.3.1 Objetivo general**

- Calibrar la ecuación FAO Penman-Monteith para el cálculo de la evapotranspiración de referencia (ETo) en condiciones de invernadero en el Centro Experimental de Cota Cota.

#### **1.3.2 Objetivos específicos**

- Evaluar la dinámica de los términos energético y aerodinámico componentes de la ecuación de la FAO Penman-Monteith bajo condiciones de invernadero en el Centro Experimental de Cota Cota, comparándolo con un cultivo de pasto que simule al cultivo de referencia definido para la ecuación.
- Comparar el comportamiento integrado de la ecuación de la FAO Penman-Monteith en condiciones de invernadero y a cielo abierto en la misma zona y bajo las mismas condiciones meteorológicas.
- Evaluar la factibilidad de proponer factores de corrección para el cálculo de la ecuación de la FAO Penman-Monteith con datos de cielo abierto para agricultura regada en condiciones atemperadas en zonas altas tropicales.

## **2. REVISIÓN DE LITERATURA**

### **2.1 Las necesidades de agua de los cultivos**

La mejora de la gestión de los recursos hídricos es de gran importancia para una agricultura sostenible. La cuantificación de la evapotranspiración de los cultivos es fundamental para un manejo adecuado de los recursos hídricos. El clima tiene una gran influencia sobre la evapotranspiración, esta influencia se representa con la denominada evapotranspiración de referencia (Martinez, s.f.).

Fernández *et al.*, (2001) indican, que cuando los estomas de las hojas están abiertos, para permitir la entrada de CO<sub>2</sub>, se produce la emisión de agua en forma de vapor desde la planta a la atmosfera mediante el proceso de la transpiración. Esta pérdida de agua es un coste que debe pagar el cultivo para producir, y debe ser repuesta por la planta mediante la extracción del agua del suelo por las raíces. Esta cantidad de agua, unida a la que se pierde por evaporación desde la superficie del suelo, constituye lo que se conoce como evapotranspiración.

Para buenos rendimientos, la práctica de riego tiene que ser llevada a cabo determinando la cantidad de agua a aplicar y el momento adecuado con el fin de suministrar el requerimiento de agua del cultivo en forma oportuna y adecuada. Esta cantidad que se aplicará a través del riego tiene como principal parámetro el conocimiento de la evapotranspiración como es definido por Rodrigues *et al.*, (2013) citado por Souza *et al.*, (2014).

### **2.2 Importancia de la evapotranspiración de referencia (ET<sub>o</sub>)**

La evapotranspiración de referencia (ET<sub>o</sub>) se puede definir como la cantidad de agua transpirada en un área grande, con cubierta de hierba de altura uniforme, entre 8 a 15 cm, en crecimiento activo, con el suelo totalmente sombreado y sin déficit hídrico (Alghobari (2000) citado por Souza *et al.*, (2014)).

El método de la FAO-Penman-Monteith para estimar la evapotranspiración de referencia es considerado el método de referencia estándar (Allen *et al.*, 2006). Según Oliveira (2010) citado por Souza *et al.*, (2014) la evapotranspiración de referencia (ET<sub>o</sub>)

se refiere al efecto de la demanda atmosférica sobre los requisitos de agua de los cultivos, siendo estimado a través de las variables meteorológicas.

La evapotranspiración de referencia (ET<sub>o</sub>) es uno de los principales componentes del balance de agua, y muy útil para describir la climatología de una zona. Su valor es de importancia fundamental para el diseño de sistemas de riego y la gestión del agua de riego, que requiere la aprobación de estudios, evaluaciones y ajustes para su uso correcto y definir con precisión las necesidades de agua del cultivo y el momento del riego más adecuado. Sin embargo, es necesaria la adopción de métodos simples para estimar la ET<sub>o</sub> para contribuir a la implementación de prácticas de manejo del riego (Souza *et al.*, 2014).

El conocimiento de los valores de la evapotranspiración es importante por las aplicaciones que pueden derivar. Lopez (1989) y Aguilera y Martinez (1996) citado por Villaman, *et al.*, (2001) indicaron las siguientes aplicaciones: a) Es la base para elaborar calendarios teóricos de riego de cultivos. b) También para determinar el área que puede regarse con un determinado volumen de agua disponible. c) Para estimar los volúmenes de agua que sean necesarios para auxiliar a los cultivos en caso de que la lluvia sea insuficiente para su buen desarrollo.

Molina, (2009) menciona que algunas actividades importantes en relación de la evapotranspiración-demanda de agua de los cultivos en los sistemas de riego son los siguientes:

*Planeación del recurso agua:* La ET<sub>o</sub> además de ser usada para estimar los requerimientos de agua de los cultivos, permite realizar balances de dicho recurso con fines de planeación, para calcular, por ejemplo, la disponibilidad del agua para un ciclo agrícola determinado.

*Uso eficiente del agua:* En muchos sistemas de riego, especialmente los que operan por gravedad (casi todos los países subdesarrollados y en algunos desarrollados ocupan la mayor superficie de riego), el agricultor es el que decide con base a su criterio el momento y la cantidad de riego para sus cultivos.

*Rendimiento de los cultivos:* La subestimación de la evapotranspiración puede reducir el rendimiento de los cultivos, debido a que retrasa la aplicación del riego y se somete a las plantas a estrés hídrico.

### **2.3 Proceso de evapotranspiración**

Se conoce como evapotranspiración (ET) a la combinación de dos procesos separados por los que el agua se pierde a través de la superficie del suelo por evaporación y por otra parte mediante la transpiración del cultivo (Allen *et al.*, 2006).

Esmeral, (2011) señala que, en condiciones de invernadero, la evaporación es baja como consecuencia de la alta proporción de suelo cubierto por el cultivo, por lo general se desprecia y se habla solo de transpiración en vez de ET.

#### **2.3.1 Evaporación**

La evaporación es el proceso por el cual el agua líquida se convierte en vapor de agua (vaporización) y se retira de la superficie evaporante (remoción de vapor).

Para cambiar el estado de las moléculas del agua de líquido a vapor se requiere energía. La radiación solar directa y, en menor grado, la temperatura ambiente del aire, proporcionan esta energía. La fuerza impulsora para retirar el vapor de agua de una superficie evaporante es la diferencia entre la presión del vapor de agua de la atmósfera circundante. El reemplazo del aire saturado por un aire más seco depende grandemente de la velocidad del viento. Por lo tanto, la radiación, la temperatura del aire, la humedad atmosférica y la velocidad del viento son parámetros climatológicos a considerar al evaluar el proceso de la evaporación (Allen *et al.*, 2006).

La velocidad o tasa de evaporación depende del grado de saturación de la atmósfera circundante, por tanto, a medida que el aire se satura esta disminuye hasta el punto de no tener la capacidad de retirar el agua de la superficie evaporante, requiriendo un cambio en las condiciones de humedad de la atmósfera que se genera con una restitución del aire saturado. La velocidad de evaporación también puede llegar a ser nula debido a la limitada disponibilidad de agua en el suelo, tal caso es el que se

presenta en zonas con prolongados intervalos de sequía y riegos poco frecuentes, (Allen et al, 2006).

### **2.3.2 Transpiración**

La transpiración es un proceso vital para las plantas, necesario para enfriar las hojas y transportar agua y nutrientes (Esmeral, 2011), al respecto Allen *et al.*, (2006) indica que la transpiración consiste en la vaporización del agua líquida contenida en los tejidos de la planta y su posterior remoción hacia la atmósfera. Los cultivos pierden agua predominantemente a través de los estomas. La vaporización ocurre dentro de la hoja, en los espacios intercelulares, y el intercambio del vapor con la atmósfera es controlado por la abertura estomática. Casi toda el agua absorbida del suelo se pierde por transpiración y solamente una pequeña fracción se convierte en parte de los tejidos vegetales (Allen *et al.*, 2006).

La transpiración al igual que la evaporación directa, depende del aporte de energía, del gradiente de presión del vapor y de la velocidad del viento. Por lo tanto, la radiación, la temperatura del aire, la humedad atmosférica y el viento también deben ser considerados en su determinación. El contenido de agua del suelo y la capacidad del suelo de conducir el agua a las raíces también determinan la tasa de transpiración, así como la salinidad del suelo y del agua de riego (Allen *et al.*, 2006).

La transpiración, o pérdida de agua en estado de vapor por la planta, es un fenómeno común en todas las plantas (Barcelo *et al.*, 1988) citado por (Mamani, 2007).

### **2.3.3 Evapotranspiración (ET)**

La evaporación y la transpiración ocurren simultáneamente y no hay una manera sencilla de distinguir entre estos dos procesos. Aparte de la disponibilidad de agua en los horizontes superficiales, la evaporación de un suelo cultivado es determinada principalmente por la fracción de radiación solar que llega a la superficie del suelo. Esta fracción disminuye a lo largo del ciclo del cultivo a medida que el dosel del cultivo proyecta más y más sombra sobre el suelo. En las primeras etapas del cultivo, el agua se pierde principalmente por evaporación directa del suelo, pero con el desarrollo del cultivo y finalmente cuando este cubre totalmente el suelo, la transpiración se convierte

en el proceso principal. En el momento de la siembra, casi el 100% de la ET ocurre en forma de evaporación, mientras que cuando la cobertura vegetal es completa, más del 90% de la ET ocurre como transpiración (Allen *et al.*, 2006).

Asimismo Brown, (2000) citado por Esmeral (2011), señala que se emplea el termino ET debido a la dificultad de diferenciar entre los procesos de evaporación y transpiración, los cuales se producen de manera simultánea. El agua que se pierde por transpiración entra a la planta a través de la raíz, pasa al follaje y luego a la atmosfera por medio de la apertura de los estomas. Entre tanto, la perdida de agua a través de la evaporación se presenta por el paso directo del agua disponible en el suelo a la atmósfera.

La velocidad de transpiración (velocidad de transporte de vapor de agua) cambia con la diferencia entre la humedad de la hoja y del ambiente. La apertura de los estomas se ve influenciada por la luz, el gradiente de presión de vapor, dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), la temperatura foliar y disponibilidad de agua. La luz es el factor más importante en el control de los estomas, cuando la luminosidad es alta los estomas estarán abiertos, Esmeral, (2011).

### **2.3.3.1 Evapotranspiración de referencia (ET<sub>o</sub>)**

La tasa de evapotranspiración de una superficie de referencia, que ocurre sin restricciones de agua, se conoce como evapotranspiración del cultivo de referencia y se denomina ET<sub>o</sub>. La superficie de referencia es un cultivo hipotético de pasto, con una altura asumida de 0,12 m, con una resistencia superficial fija de 70 s m<sup>-1</sup> y un albedo de 0.23. Los únicos factores que afectan ET<sub>o</sub> son los parámetros climáticos, por lo tanto puede ser calculada a partir de datos meteorológicos sin considerar las características del cultivo, ni los factores del suelo (Allen *et al.*, 2006).

Calcular la evapotranspiración de referencia (ET<sub>o</sub>) resulta de gran utilidad, al depender solamente de variables meteorológicas se pueden realizar comparaciones entre distintas regiones y localidades independientemente del cultivo (Córdova M, 2013). Por otro lado Fernández, *et al.*, (2010) señala que para la determinación de los

requerimientos de agua de los cultivos utiliza el producto de evapotranspiración de referencia (ET<sub>o</sub>) y el coeficiente de cultivo.

### **2.3.3.2 Evapotranspiración de cultivo (ET<sub>c</sub>)**

Allen *et al.*, (2006) señalan que las necesidades de agua del cultivo se refieren a la cantidad de agua que necesita ser proporcionada al cultivo como riego o precipitación, mientras que la evapotranspiración del cultivo se refiere a la cantidad de agua perdida a través de la evapotranspiración. La relación ET<sub>c</sub>/ET<sub>o</sub> puede ser determinada experimentalmente para diferentes cultivos y es conocida como Coeficiente de Cultivo (K<sub>c</sub>), de manera que  $ET_c = K_c * ET_o$ .

### **2.3.3.3 Coeficiente de cultivo (K<sub>c</sub>)**

Los efectos combinados de la transpiración del cultivo y la evaporación del suelo se integran en el coeficiente de cultivo. El coeficiente K<sub>c</sub> incorpora las características del cultivo y los efectos promedios de la evaporación en el suelo. Para la planificación normal del riego y propósitos de manejo, para la definición de calendarios básicos de riego y para la mayoría de los estudios de balance hídrico, los coeficientes promedios del cultivo son apropiados y más convenientes que los valores de K<sub>c</sub> calculados con base diaria usando coeficientes separados de cultivo y suelo (Allen *et al.*, 2006).

## **2.4 Factores climáticos que influyen en el consumo de agua en invernadero**

Baeza (2000) citado por Fernández, *et al.*, (2001) indica que la evapotranspiración es un fenómeno que tiene como base el paso de agua del estado líquido a gaseoso, por lo que se requiere una fuente de energía que es proporcionada por la radiación. Además, es necesario que haya una diferencia de presión de vapor (déficit de presión de vapor, DPV) entre superficie evaporante y el aire que la rodea. Bajo invernadero, el viento no tiene un efecto directo sobre el consumo de agua, pero si en la ventilación del invernadero. Por tanto, el efecto del viento sobre el consumo de agua de los cultivos puede considerarse casi despreciable.

La temperatura no afecta directamente a la evapotranspiración, pero sí es un indicador de la cantidad de radiación, de tal modo que en los meses en los cuales la radiación es mayor la temperatura también es más alta.

La temperatura y humedad influyen en el DPV. Humedades altas, próximas a saturación, pueden disminuir la ET (Garzoli, (1989) citado por Fernández, *et al.*, (2001)).

## **2.5 Factores meteorológicos que determinan la ET**

Los principales factores meteorológicos que afectan la evapotranspiración según Ludlow (1970) citado por Villaman, *et al.*, (2001), son: radiación solar, temperatura, brillo solar, humedad atmosférica, precipitación y velocidad del viento.

Al respecto Allen *et al.* (2006), indica que los factores meteorológicos que determinan la evapotranspiración son los componentes del tiempo que proporcionan energía para la vaporización y extraen vapor de agua de una superficie evaporante. Los principales parámetros meteorológicos que se deben considerar se presentan a continuación.

### **2.5.1 Radiación solar**

El proceso de evapotranspiración está determinado por la cantidad de energía disponible para evaporar el agua. La radiación solar es la más importante fuente de energía en el planeta y puede cambiar grandes cantidades de agua líquida en vapor de agua. La cantidad potencial de radiación que puede llegar a una superficie evaporante viene determinada por su localización y época del año. Debido a las diferencias en la posición del planeta y a su movimiento alrededor del sol, ésta cantidad potencial de radiación es diferente para cada latitud y para las diversas estaciones del año (Allen, *et al.*, 2006).

### **2.5.2 Temperatura del aire**

La radiación solar absorbida por la atmosfera y el calor emitido por la tierra elevan la temperatura del aire. El calor sensible del aire circundante transfiere energía al cultivo y entonces ejerce un cierto control en la tasa de evapotranspiración. En un día soleado y cálido, la pérdida de agua por evapotranspiración será mayor que en un día nublado y

fresco, por lo tanto a temperaturas altas la ET se incrementa y temperaturas bajas la ET disminuye (Allen, *et al.*, 2006).

### **2.5.3 Humedad del aire**

Allen *et al.*, (2006), mencionan que el aporte de energía del sol y del aire circundante es la fuerza impulsora principal para la evaporación del agua, la diferencia entre la presión de vapor de agua en la superficie evapotranspirante y el aire circundante es el factor determinante para la remoción de vapor.

Áreas bien regadas en regiones áridas secas y calientes, consumen grandes cantidades de agua debido a la gran disponibilidad de energía y al poder de extracción de vapor de la atmósfera. En cambio en regiones húmedas tropicales, a pesar de que el ingreso de energía es elevado, la alta humedad del aire reducirá la demanda de evapotranspiración. En el último caso, como el aire está ya cerca de saturación, puede absorber menos agua adicional y por lo tanto la tasa de evapotranspiración es más baja que en regiones áridas.

Asimismo Esmeral, (2011) indica que la humedad del aire contribuye en el proceso de ET. En condiciones de alta humedad la ET es baja, ya que la diferencia de presión de aire circundante y la superficie evapotranspirante disminuye.

### **2.5.4 Velocidad del viento**

El proceso de remoción de vapor depende en alto grado del viento y de la turbulencia del aire, los cuales transfieren grandes cantidades de aire hacia la superficie evaporante. Con la evaporación del agua, el aire sobre la superficie evaporante se satura gradualmente con vapor. Si este aire no se substituye continuamente por un aire más seco, disminuye la intensidad de remoción de vapor de agua y la tasa de evapotranspiración disminuye.

La demanda evapotranspiratoria es alta bajo condiciones de tiempo caliente y seco debido a la sequedad del aire y de la cantidad de energía disponible como radiación solar directa y calor latente. Bajo estas circunstancias, mucho vapor de agua puede ser almacenado en el aire mientras que el viento puede promover el transporte del agua

permitiendo que se retire mayor cantidad de vapor de agua. Por otra parte, bajo condiciones atmosféricas húmedas, la alta humedad del aire y la presencia de nubes hacen que la tasa de evapotranspiración sea más baja (Allen, *et al.*, 2006).

## **2.6 Modelos para determinar la ETo caso de un invernadero**

Fernández *et al.*, (2001), mencionan que la elección de uno u otro modelo para determinar la ETo, depende de la disponibilidad de datos climáticos y de la precisión de estos modelos en la zona donde se pretenda utilizarlos. Las expresiones combinadas son las más precisas pero requieren datos de temperatura, humedad relativa, radiación y velocidad del viento.

Fazlil, (2009), señala que la evapotranspiración en un invernadero incluye el balance de energía de radiación neta del sol, la transferencia de calor y vapor de un dosel.

En consecuencia Valera, (2013) indica que existen pocos estudios realizados en la estimación de las necesidades hídricas de cultivos bajo invernadero; sin embargo Fernández (2001) y colaboradores, han venido realizando ensayos de diferentes dosis de riego de acuerdo a las exigencias de los cultivos, utilizando diferentes modelos de estimación de ETo, donde cada uno se estudió con precisión. De acuerdo a sus resultados el modelo de radiación mostró una alta precisión en condiciones de cultivo, por ello propusieron un modelo de estimación de la ETo para condiciones de invernadero.

A menudo es preciso aplicar estos modelos en condiciones climáticas y agronómicas muy distintas de aquellas para las que fueron inicialmente desarrolladas. Por tanto, es muy importante evaluar estos modelos, y en algún caso puede ser necesaria la calibración (Fernández *et al.*, 2001).

### **2.6.1 El modelo de tanque evaporímetro Clase A**

El modelo FAO-Tanque resulto la expresión más precisa para estimar la ETo a corto plazo (periodos semanales) bajo condiciones de invernadero, aun sin calibración. Sin embargo, su aplicación presenta dos inconvenientes: por un lado se requieren datos de humedad relativa, velocidad del viento y fetch (distancia a barlovento de la cubierta

verde) en el interior del invernadero para poder calcular los valores correspondientes de  $K_p$  (coeficiente del Tanque). Por otro lado, el fetch, que está perfectamente definido para condiciones al aire libre (Doorenbos y Pruitt, 1977) citado por (Linares, R, s.f.), es mucho más difícil de definir para condiciones de invernadero, donde las paredes del mismo suponen un aislamiento del exterior.

Por ello, se calibró esta expresión para condiciones bajo invernadero en Almería. El valor de  $K_p$  fue constante para toda la estación ( $K_p = 0,79$ ) debido a la escasa variabilidad estacional de la humedad relativa y velocidad del viento en el interior del invernadero. Sin embargo, esto supone la instalación de un tanque evaporímetro, lo cual no es de fácil adquisición ni manejo.

### **2.6.2 El modelo de radiación**

La transpiración de un cultivo bajo invernadero está estrechamente asociada a la radiación solar. Por ello, el modelo de FAO-Radiación mostro una alta precisión en condiciones de cultivo. Sin embargo, este modelo requiere datos medidos dentro de invernadero de temperatura y radiación solar. Una simplificación consistiría en ajustar una relación lineal del tipo  $E_{To} = b x R_s$ , sin embargo, el valor del coeficiente  $b$  varia a lo largo del año.

Fernández, *et al.*, (2001) menciona que en un estudio bajo invernadero en Almería, la evolución de la  $E_{To}$  fue similar a la evolución de la radiación solar, pero la relación entre ambas varió a lo largo del año y estuvo relacionado con la evolución estacional de la temperatura.

### **2.7 Determinación de la evapotranspiración de referencia ( $E_{To}$ )**

La evapotranspiración de referencia ( $E_{To}$ ) es el primer paso para determinar la evapotranspiración del cultivo ( $E_{Tc}$ ). La evapotranspiración de referencia se puede medir o estimar por diferentes métodos, siendo los más usados los micro meteorológicos, los cuales utilizan el transporte de vapor de agua o balance de energía y los métodos hidrológicos que utilizan el balance hídrico y necesitan el uso de

lisímetros, dispositivos que permiten conocer el agua no utilizada por las plantas, por medio de pesada o drenaje (Castañón, 2000 citado por Valera, 2013).

Existen variados métodos para estimar directa o indirectamente la ETo. Los métodos directos se basan en la entrada y salida de agua en un cultivo específico, donde se obtiene la evapotranspiración real o similar, entre ellos se mencionan los lisímetros, microlisímetros, balance de energía de Bowen y sistema de flujos turbulentos (Balbontin C. *et al.*, 2011 citado por Torres y Vásquez, 2013).

Entre los métodos indirectos se denota a Penman Monteith FAO 56 que se utiliza para determinar los requerimientos hídricos de los cultivos, cuando se dispone de sistemas de registros automatizados (Maldonado y Aravena, 2006 citado por Torres y Vásquez, 2013).

Aguilera y Martínez, (1996) citado por Macías R. (2009), indican que la evapotranspiración no es simple de medir. Para determinarla experimentalmente se requieren aparatos específicos y mediciones precisas de varios parámetros físicos o el balance del agua del suelo en lisímetros. Los métodos experimentales de campo son en general caros, exigiendo precisión en las mediciones, y pueden ser completamente realizados y analizados apropiadamente solo por personal de investigación suficientemente preparado. A pesar de que estos procedimientos no son apropiados para mediciones de rutina, siguen siendo importantes para evaluación de las estimaciones de ETo obtenidos con otros métodos indirectos.

### **2.7.1 Métodos de balance de energía y micro climáticos**

La evaporación de agua requiere cantidades relativamente altas de energía, ya sea en forma de calor sensible o de energía radiante. Por ello, el proceso de evapotranspiración es controlado por el intercambio de energía en la superficie de la vegetación y es limitado por la cantidad de energía disponible. Debido a esta limitación, es posible predecir la evapotranspiración aplicando el principio de conservación de energía. La energía que llega a la superficie deber ser igual a la energía que sale de la superficie en el mismo periodo de tiempo Antón (2002) citado por Macías R. (2009).

Todos los flujos de energía deben ser considerados cuando se deriva una ecuación de balance de energía. La ecuación para una superficie de evaporación se puede escribir como:

$$R_n - G - \lambda T - H = 0 \quad (1)$$

Donde,  $R_n$  es la radiación neta,  $H$  es el calor sensible,  $G$  es el flujo de calor del suelo,  $\lambda T$  es el flujo de calor latente.

Los distintos términos pueden ser positivos o negativos. Cuando  $R_n$  es positiva, proporciona energía a la superficie y cuando  $G$ ,  $\lambda T$  y  $H$  son positivos retiran energía de la superficie. El flujo de calor latente ( $\lambda T$ ) representa la fracción de la evapotranspiración que puede ser derivada de la ecuación del balance de energía si todos los otros componentes son conocidos. La radiación neta ( $R_n$ ) y el flujo de calor del suelo ( $G$ ) pueden ser medidos o estimados en función de parámetros climáticos. Por el contrario la medición del calor sensible ( $H$ ) es compleja y sus valores no pueden obtenerse fácilmente. La determinación de  $H$  incluye mediciones precisas de los gradientes de temperatura por encima de la superficie.

Otro método para estimar la evapotranspiración es el método de transferencia de masa. Este enfoque considera los movimientos verticales pequeñas cantidades de aire (remolinos) por encima de una amplia superficie homogénea. Los remolinos transportan la materia (vapor de agua) y la energía (calor, momentum) desde y hacia la superficie de evapotranspiración. Asumiendo condiciones de equilibrio y que los coeficientes de transferencia de los remolinos para el vapor de agua son proporcionales a aquellos para el calor y el momentum, la evapotranspiración puede ser calculada a partir de los gradientes verticales de la temperatura del aire y vapor de agua usando la relación de Bowen. Otros métodos de observaciones directas, utilizan gradientes de velocidad del viento y de vapor de agua. Estos métodos y otros como el de la covarianza de remolinos, requieren medidas precisas de la presión de vapor, y de la temperatura del aire o velocidad del viento a niveles sobre la superficie.

### 2.7.2 Balance de agua en el suelo

Allen, *et al.*, (2006), mencionan que la evapotranspiración también puede determinarse midiendo varios componentes del balance de agua en el suelo. El método consiste en evaluar los flujos de agua que entran y salen de la zona radicular del cultivo dentro de un determinado periodo de tiempo. El riego (R) y la precipitación (P) proporcionan agua a la zona radicular. Parte de R y P pueden perderse por escurrimiento superficial (ES), y percolación profunda (D) la cual eventualmente la capa freática. El agua también puede ser transportada hacia la superficie mediante capilaridad (C) desde la capa freática sub-superficial hacia la zona de raíces.

La evaporación del suelo y la transpiración del cultivo pueden agotar el agua de la zona radicular. Si todos los otros flujos aparte de la evapotranspiración (ET) pueden ser evaluados, la evapotranspiración se puede deducir a partir del cambio en el contenido de agua en el suelo (SW) a lo largo de un periodo de tiempo:

$$ET = R + P - ES - D + C \pm FS \pm SW \quad (2)$$

Algunos flujos como el flujo sub-superficial, la percolación profunda y la capilaridad desde la capa freática son difíciles de medir y pueden no considerarse en periodos cortos de tiempo. El método del balance de agua en el suelo generalmente solo puede dar estimaciones de ET para periodos largos de tiempo del orden de una semana o diez días FAO (2006) citado por Macías (2009).

### 2.7.3 Lisímetros

Si se aísla la zona radicular del cultivo y se controlan los procesos que son difíciles de medir, los diversos términos en la ecuación del balance de agua en el suelo se pueden determinar con apreciable exactitud. Esto se hace en lisímetros que son tanques aislados llenados con suelo disturbado o no disturbado en los que el cultivo crece y se desarrolla. Los lisímetros fueron diseñados para recoger el agua de infiltración, fueron concebidos para el cálculo de la evapotranspiración. En lisímetros de pesaje de precisión, la evapotranspiración se puede obtener con una exactitud de centésimos de

milímetro, donde la pérdida de agua es medida directamente por el cambio de masa y periodos pequeños tales como una hora pueden considerados (Allen *et al.*, 2006).

Los lisímetros pueden ser divididos en dos grandes grupos, los lisímetros de pesada y los de drenaje. El lisímetro de pesada se apoya sobre un sistema hidráulico o una balanza de precisión que mide las variaciones de peso del sustrato con o sin agua. Los lisímetros de drenaje tienen una salida en el fondo, de manera que el agua que se infiltra es recogida en un recipiente que se pueda aforar (Tuñón, (2000) citado por Bochetti (2010)).

Gee y Hillel, 1988) citado por Bochetti (2010), indican que la diferencia entre ambos lisímetros es que los de drenaje miden la evapotranspiración de forma indirecta, resolviendo la ecuación de balance del suelo, mientras en los de pesado la evaporación se mide directamente, y según la exactitud de la balanza puede dar precisiones de hasta 0,1 mm.

Un lisímetro mide en forma directa el consumo de agua por las plantas, y aun cuando no existe un modelo estándar, en general poseen un diámetro mayor a los 1,10 m y una profundidad superior a los 1,30 m; sin embargo, dificultades técnicas y económicas explican que muchos investigadores hayan optado por el uso de lisímetros de menor tamaño los cuales se denominan “microlisímetros”. Dichos microlisímetros son de distintos tamaños y formas, con diámetros menores a 1 m y una profundidad que no excede los 0,70 m (Bremer (2003) citado por Pacheco, *et al.*, (2014)).

Según Anda (1994) citado por Macías (2009), en lisímetros de drenaje, la evapotranspiración es medida por un periodo dado, restando la cantidad de agua de drenaje, recogida en el fondo de los lisímetros, de la cantidad total de agua ingresada. Un requerimiento de los lisímetros es que la vegetación dentro e inmediatamente fuera del lisímetro sea idéntica (la misma altura e índice de área foliar). Este requisito no se ha respetado normalmente en muchos estudios de lisimetría y ha dado lugar a datos seriamente desviados y poco representativos de  $ET_c$  y  $K_c$ .

Como los lisímetros son difíciles de manejar y caros de construir y además su operación y mantenimiento requieren de especial cuidado, su uso se restringe normalmente a trabajos de investigación.

## 2.8 Evapotranspiración calculada con datos meteorológicos

Debido a la dificultad de obtener mediciones de campo precisas, la ET se calcula comúnmente con datos meteorológicos. Una gran cantidad de ecuaciones empíricas o semi empíricas se han desarrollado para determinar la evapotranspiración del cultivo o de referencia utilizando datos meteorológicos. Algunos de los métodos son solamente válidos para condiciones climáticas y agronómicas específicas y no se pueden aplicar bajo condiciones diferentes de las que fueron desarrolladas originalmente. Numerosos investigadores han analizado el funcionamiento de los varios métodos del cálculo para diversas localidades. El método FAO Penman Monteith se recomienda actualmente como el método estándar para la definición y el cálculo de la evapotranspiración de referencia ETo (Macias, 2009).

### 2.8.1 Ecuación de FAO Penman-Monteith

Un panel de expertos recomendó la adopción del método combinado de Penman-Monteith como nuevo método estandarizado para el cálculo de la evapotranspiración de referencia y se aconseja sobre los procedimientos para el cálculo de los varios parámetros que la formula incluye. La ecuación utiliza datos climáticos de radiación solar, temperatura del aire, humedad y velocidad del viento (Allen *et al.*, 2006).

$$ET_o = \frac{0.408 \Delta (R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0.34 u_2)} \quad (3)$$

Dónde, ETo es la Evapotranspiración de referencia ( $\text{mm dia}^{-1}$ ), Rn representa la radiación neta en la superficie del cultivo ( $\text{MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$ ), Ra es la radiación extraterrestre ( $\text{mm dia}^{-1}$ ), G es el flujo del calor de suelo ( $\text{MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$ ), T es la temperatura media del aire a 2 m de altura ( $^{\circ}\text{C}$ ), u2 representa a la velocidad del viento a 2 m de altura ( $\text{m s}^{-1}$ ), ( $e_s$ ) es la presión de vapor de saturación (kPa), ( $e_a$ ) es la presión real de vapor (kPa),

$(e_s - e_a)$  es el déficit de presión de vapor (kPa),  $\Delta$  es la pendiente de la curva de presión de vapor (kPa °C<sup>-1</sup>),  $\gamma$  es la constante psicométrica (kPa °C<sup>-1</sup>).

Esta ecuación determina la evapotranspiración de una superficie hipotética de referencia y proporciona un valor estándar con el cual se puede comparar la evapotranspiración de otros cultivos en diversos periodos del año o en otras regiones. No obstante, esta ecuación requiere de datos meteorológicos que muchas veces no están disponibles para su uso. Por ello se opta por otras metodologías que aunque no son tan precisas presentan una correlación muy grande con la metodología FAO Penman-Monteith (Macias, 2009).

Allen *et al.*, (2006), además mencionan que es probable que instrumentos de precisión, bajo condiciones ambientales y biológicas completamente controladas, demuestren que la ecuación de FAO Penman-Monteith se desvía ocasionalmente de mediciones reales de la ETo del pasto.

### **2.8.2 Temperatura del aire**

Debido a la relación no lineal de la humedad con la temperatura, ambas incluidas en la ecuación FAO Penman-Monteith, la presión de vapor para cierto periodo se debe calcular como la media entre la presión de vapor bajo la temperatura máxima y la presión de vapor bajo la temperatura mínima del aire en un periodo. La temperatura máxima y la temperatura mínima diaria del aire son respectivamente la máxima y la mínima temperatura del aire observado durante un periodo de 24 horas (Allen, *et al.*, 2006).

### **2.8.3 Humedad del aire**

El contenido de agua del aire se puede expresar de diversas maneras. Allen, *et al.*, (2006) señala que en agro meteorología, la presión de vapor, la temperatura del punto de condensación (punto de rocío) y la humedad relativa son expresiones comunes para indicar la humedad del aire.

*Presión de vapor:* El vapor de agua es un gas y su presión contribuye a la presión atmosférica total. Un volumen de aire se encuentra retenido sobre una superficie

evaporante de agua, se alcanza un equilibrio entre las moléculas de agua que se incorporan al aire y las que se vuelven a la fuente de agua. La cantidad de moléculas de agua que se pueden almacenar en el aire depende de la temperatura. Cuánto 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.

La pendiente de la curva cambia y varía levemente con la temperatura. A temperaturas elevadas, la pendiente es mayor. La pendiente de la curva de presión de vapor de saturación ( $\Delta$ ), es un parámetro importante para la descripción de la vaporización y se utiliza en ecuaciones de cálculo de ETo con datos climáticos.

La presión real de vapor ( $e_a$ ) es la presión de vapor ejercida por el vapor de agua en el aire. Cuando el aire no se satura, la presión real de vapor será más baja que la presión de saturación. La diferencia entre la presión de saturación y la presión real de vapor se llama déficit de presión de vapor o déficit de saturación y es un indicador preciso de la real capacidad evaporativa del aire.

*Temperatura del punto de rocío:* La temperatura del punto de rocío o punto de condensación es la temperatura a la cual el aire necesita ser enfriado para saturarse. La presión real de vapor del aire es la presión de saturación de vapor en la temperatura del punto de rocío. Cuanto más seco esté el aire, más grande será la diferencia entre la temperatura del aire y la temperatura del punto de rocío.

*Humedad relativa:* Es el cociente entre la cantidad de agua que el aire realmente contiene a una determinada temperatura y la cantidad que podría contener si estuviera saturado a la misma temperatura. Si bien la presión de vapor puede ser relativamente constante a lo largo del día, la humedad relativa fluctúa entre un máximo al amanecer y un mínimo a primeras horas de la tarde. La variación de la humedad relativa 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 humedad relativa también cambia sustancialmente.

### 2.8.4 Radiación

*Radiación extraterrestre (Ra):* La radiación solar recibida en la parte superior de la atmósfera terrestre sobre una superficie horizontal se conoce como radiación (solar) extraterrestre. Así como las estaciones cambian, la posición del sol, la longitud del día y la radiación extraterrestre también cambian. La radiación extraterrestre es una función de la latitud, la época del año y la hora del día.

Según Allen *et al.*, (2006) la radiación extraterrestre, para cada día del año y para diversas latitudes se puede estimar a partir de la constante solar, la declinación solar y la época del año con la siguiente fórmula:

$$Ra = \frac{24 * 60}{\pi} G_{SC} d_r [\omega_s \sin(\varphi) \sin(\delta) + \cos(\varphi) \cos(\delta) \sin(\omega)] \quad (4)$$

Donde, Ra es la radiación extraterrestre ( $\text{MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ ),  $G_{SC}$  es la constante solar  $0,082$  ( $\text{MJ m}^{-2} \text{ min}^{-1}$ ),  $d_r$  es la distancia relativa inversa Tierra-Sol,  $\omega_s$  es el ángulo de radiación a la puesta del sol (rad),  $\varphi$  representa la latitud (rad) y  $\delta$  es la declinación solar (rad).

*Radiación neta solar o de onda corta (R<sub>ns</sub>):* La radiación neta solar es la fracción de la radiación solar ( $R_s$ ), que no se refleja en la superficie. Allen, *et al.*, (2006) menciona que la radiación neta de onda corta es resultante del equilibrio entre la radiación solar entrante y la reflejada, la cual está dada por:

$$R_{ns} = (1 - \alpha)R_s \quad (5)$$

Donde,  $R_{ns}$  es la radiación neta solar o de onda corta expresada en ( $\text{MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ ),  $\alpha$  representa el albedo o coeficiente de reflexión del cultivo, que es  $0,23$  para el cultivo hipotético de referencia (adimensional),  $R_s$  es la radiación solar entrante en ( $\text{MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ ).

*Radiación neta de onda larga (R<sub>nl</sub>):* La radiación solar absorbida por la tierra se convierte en energía térmica. La tierra pierde esta energía por medio de varios

procesos, entre las cuales se encuentra la emisión de radiación. La radiación de onda larga emitida por el planeta es absorbida por la atmosfera o perdida hacia el espacio. La superficie terrestre emite y recibe radiación de onda larga. La diferencia entre la radiación de onda larga entrante y saliente se llama radiación neta de onda larga. Como la radiación saliente de onda larga es casi siempre mayor que la radiación entrante, representa una pérdida de energía.

Allen, *et al.*, (2006) señala que el vapor de agua, las nubes, el dióxido de carbono y el polvo absorben y emiten radiación de onda larga. Por ello se deben conocer sus concentraciones para determinar el flujo saliente neto. Como la humedad y la nubosidad tienen un papel importante, la ley de Stefan-Boltzmann se corrige por estos dos factores cuando se estima el flujo saliente neto de la radiación de onda larga.

$$R_{nl} = \sigma \left[ \frac{T_{max,K}^4 + T_{min,K}^4}{2} \right] (0,34 - 0,14 \sqrt{e_a}) \left( 1,35 \frac{R_s}{R_{so}} - 0,35 \right) \quad (6)$$

Donde,  $R_{nl}$  es la radiación neta de onda larga expresada en ( $\text{MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ ),  $\sigma$  constante de Stefan-Boltzmann ( $4,903 \times 10^{-9} \text{ MJ K}^{-4} \text{ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ ),  $T_{max,K}$  y  $T_{min,K}$  representan a la temperatura máxima absoluta y mínima absoluta durante un periodo de 24 horas ( $K = \text{°C} + 273,16$ ),  $e_a$  es la presión de vapor real (kPa),  $R_s/R_{so}$  es la radiación relativa de onda corta (valores  $\leq$  a 1),  $R_s$  radiación solar medida o calculada ( $\text{MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ ) y  $R_{so}$  es la radiación en un día despejado ( $\text{MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ ).

Cuanto más pequeña son los términos de corrección, más pequeño es el flujo saliente neto de radiación de onda larga.

*Radiación neta ( $R_n$ ):* La radiación neta, es la diferencia entre la radiación entrante y saliente de longitudes de onda corta y larga. Es el equilibrio entre la energía absorbida, reflejada y emitida por la superficie terrestre o la diferencia de la radiación de onda corta entrante neta ( $R_{ns}$ ) y la radiación de onda larga saliente neta ( $R_{nl}$ ). La radiación neta es normalmente positiva durante el día y negativa durante la noche. El valor diario total para  $R_n$  es casi siempre positivo para 24 horas. La radiación neta está dada por la siguiente ecuación (Allen *et al.*, (2006)).

$$R_n = R_{ns} - R_{nl} \quad (7)$$

Donde,  $R_n$  es la radiación neta ( $\text{MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ ),  $R_{ns}$  es la radiación neta solar o de onda corta ( $\text{MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ ),  $R_{nl}$  es la radiación neta de onda larga expresada en ( $\text{MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ ).

### 2.8.5 Estimación de datos climáticos faltantes

La evaluación de la evapotranspiración de referencia por el método de Penman-Monteith requiere de datos diarios, decadiarios o mensuales de la temperatura máxima y mínima del aire, la presión real de vapor, la radiación neta y la velocidad del viento. Si no se dispone de alguno de los datos climáticos requerido se recomienda la estimación de estos datos con uno de los procedimientos para aplicar en la ecuación FAO Penman-Monteith (Allen, *et al.*, (2006). Sin embargo, estas estimaciones podrían no ser válidas en ambientes de invernadero, por lo que se requiere analizarlas.

#### 2.8.5.1 Estimación de los datos de radiación

A falta de mediciones directas, la radiación de onda larga y la radiación neta pueden ser derivadas de otros parámetros meteorológicos más comunes, horas sol, temperatura del aire y presión de vapor. En casos en que la radiación solar no sea medida se presenta una metodología alternativa para estimar la radiación solar (Allen *et al.*, 2006).

*Radiación solar derivada de las diferencias térmicas:* La ecuación de radiación de Hargreaves, ajustada y validada en varias estaciones meteorológicas en una amplia variedad de condiciones climáticas, está dada por:

$$R_s = k_{RS} \sqrt{(T_{max} - T_{min})} R_a \quad (8)$$

Donde  $R_a$  es la radiación extraterrestre ( $\text{MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ ),  $T_{max}$  es la temperatura máxima del aire ( $^{\circ}\text{C}$ ),  $T_{min}$  es la temperatura mínima del aire ( $^{\circ}\text{C}$ ) y  $k_{RS}$  es el coeficiente de ajuste ( $^{\circ}\text{C}^{-0.5}$ ).

Allen *et al.*, (2006) señalan que la raíz cuadrada de la diferencia de temperaturas está muy relacionada con la radiación solar diaria en una localidad dada. Los coeficientes

de ajuste,  $k_{RS}$ , son empíricos y se diferencian por zonas del interior y las regiones costeras.

Para las localidades “interiores”, en donde la masa de tierra domina y las masas de aire no están influenciadas fuertemente por un cuerpo grande de agua,  $k_{RS} \approx 0,16$ ; para las localizaciones “costeras”, situadas en la costa o cerca de una masa grande de tierra y donde las masas de aire están influenciadas por un cuerpo de agua cercano,  $k_{RS} \approx 0,19$ . Allen (1996) citado por Samani (2000) sugiere utilizar para regiones interiores la siguiente ecuación:

$$k_{RS} = 0,17 (P/Po)^{0,5} \quad (9)$$

Donde P es la presión atmosférica media mensual del lugar (kPa) y Po es la presión media mensual a nivel del mar (kPa).

## **2.9 Productividad de agua en la agricultura**

La producción de nueva biomasa en cualquier cultivo o comunidad vegetal está fuertemente determinada por la cantidad de agua disponible en el suelo. Esto resulta evidente cuando se cuantifica la producción anual (cosecha o biomasa en g ha<sup>-1</sup>) y el agua utilizada (en m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>). Producir un gramo de biomasa supone gastar entre 100 y 1000 g de agua y el valor exacto depende tanto del tipo de planta como de las condiciones ambientales (Macias, 2009).

## **2.10 Invernadero**

Un invernadero es una construcción agrícola con una estructura muy simple, capaz de soportar una cubierta transparente a la luz solar, con altura y ancho suficiente para poder realizar las labores de cultivo y que debe disponer de unos sistemas mínimos de ventilación. Desde el punto de vista de la energía solar podemos considerar el invernadero como el sistema más simple y económico de captar dicha energía para su aprovechamiento por los cultivos (Castañón, 2000) citado por (Valera, 2013).

Así mismo Aldrich y Bartok, (1994) citado por Rojas (2009) mencionan que la producción en invernadero tiene como propósito propiciar y mantener un ambiente en el cual se exprese la óptima o máxima producción del cultivo.

Según Lopez (s.f.), la proliferación del uso de materiales plásticos ha sido espectacular desde hace unos treinta años. Su utilización generalizada ha justificado que llegue a acuñarse un nuevo término, el de plasticultura para referirse a la aplicación de los plásticos en las diversas prácticas agrícolas.

### 3. MATERIALES Y METODOS

#### 3.1 Localización

El presente trabajo de investigación se realizó en invernaderos del Centro Experimental de Cota Cota ubicado en la zona de Cota Cota, provincia Murillo del Departamento de La Paz, distante a 20 km del centro de la ciudad de La Paz, El Centro Experimental está ubicado a  $16^{\circ}32'09''$  latitud Sur, y a  $68^{\circ}03'48.7''$  longitud Oeste, y a una altitud aproximada de 3447 m.s.n.m.

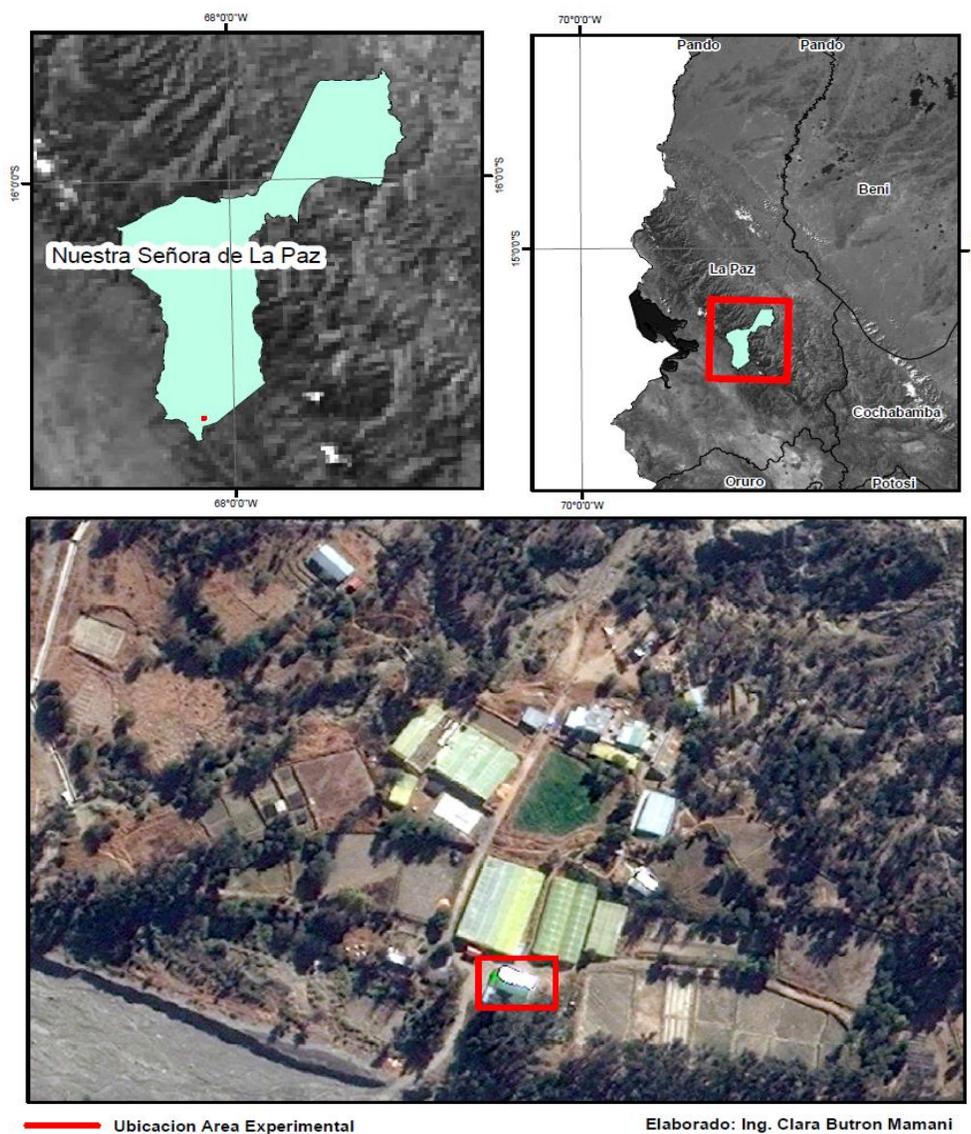


Figura 1. Ubicación del Centro Experimental de Cota Cota.

### **3.1.1 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.

### **3.1.2 Clima**

El Centro Experimental de Cota Cota 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%.

### **3.1.3 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, cebolla (*Allium cepa*), beterraga (*Beta vulgaris*) entre otros. En ambientes protegidos (carpas solares) la producción es hortofrutícola: tomate (, lechuga (*Lactuca sativa*), frutilla (*Fragaria vesca*) y otros.

## **3.2 Materiales**

### **3.2.1 Material vegetal**

Para el presente estudio se utilizó 3 kg de semilla de pasto ray grass (*Lolium perenne*), que representa el cultivo de referencia para la estimación de la evapotranspiración de referencia (ET<sub>o</sub>) en condiciones de invernadero.

### **3.2.2 Material de campo**

El estudio requirió de un sistema de micro riego por nebulización con los accesorios necesarios como: tubería PVC E-40 de 1" y ¾", tubería PEBD 16 mm, válvula bola de ¾", filtro de anilla de ¾", válvula de paso 16 mm, aspensor micro fogger de 4 salidas,

tees, codos, etc.; sustrato comprendido por abono, turba y tierra negra; entre las principales herramientas de campo se utilizaran picotas, palas, rastrillo, etc.

### 3.2.3 Equipos de recolección de información climática

Se recolectó información de tres estaciones meteorológicas automáticas modelo Vantage Pro 2 Davis ubicadas a 3447 m.s.n.m., cada estación cuenta con sus respectivos registradores de datos (Data Logger). Estas estaciones sirvieron para controlar cuidadosamente las condiciones meteorológicas del invernadero principal (1), de un invernadero de control (2) y de las condiciones externas a cielo abierto, así como también las condiciones de humedad de suelo cada 15 minutos. Esta información es de extrema importancia para los objetivos del presente estudio.

## 3.3 Métodos

### 3.3.1 Establecimiento de investigación

- **Construcción de invernadero:** Para el presente trabajo de investigación se construyó un invernadero de 10 m x 6.7 m en el cual se instaló una premisa donde se medía el balance hídrico del suelo de una superficie de pasto verde muy similar al cultivo de referencia.
- **Preparación de sustrato:** El sustrato estaba compuesto por estiércol de oveja 0.10 m de altura, tierra negra 0.10 m de altura, turba 0.15 m de altura y tierra del lugar 0.05 m de altura.
- **Incorporación de sustrato:** El sustrato se incorporó en el invernadero en un área de 35 m<sup>2</sup> para la respectiva evaluación. La desinfección del sustrato se realizó mediante el riego, con la finalidad de que las malezas germinen y se pueda tener un control de malezas.
- **Construcción de lisímetros:** Con el fin de contar con información de respaldo y de verificación de la información obtenida en la premisa principal, se construyó un lisímetro de drenaje de 1 m<sup>2</sup> y una profundidad de 0.40 m, con el propósito de obtener la cantidad de drenaje que se presenta durante la etapa de investigación.

- **Instalación de sistema de micro riego:** En el invernadero principal se instaló el sistema de micro riego por nebulización con el objetivo de que el cultivo de referencia ray grass no tenga limitaciones de agua y se acerque en sus características al cultivo de referencia.
- **Siembra de ray grass:** Se sembró el cultivo de ray grass que simula al cultivo de referencia en un área de 35 m<sup>2</sup> con una densidad de 1 kg para 10 m<sup>2</sup>.
- **Intervalo de riego:** Para garantizar la germinación de el ray grass se realizó el riego con una frecuencia diaria y un tiempo de riego de 30 minutos. Posteriormente el riego se realizó con una frecuencia de tres días.

### 3.3.2 Instalación de estación meteorológica y de suelo

Se instalaron tres estaciones meteorológicas automáticas modelo Vantage Pro 2 Davis, y tres estaciones de suelo con sensores de humedad de suelo y sondas de temperatura de suelo de acero inoxidable. La primera estación meteorológica y suelo se instaló a cielo abierto y, la segunda estación meteorológica y suelo se instaló en el invernadero de seguimiento principal y la tercera en el invernadero de control, para medir parámetros de clima esenciales para el cálculo de la evapotranspiración de referencia (ET<sub>o</sub>) a fin de realizar una comparación del comportamiento dentro y fuera del invernadero.

Las estaciones meteorológicas automáticas instaladas, midieron las variables climáticas: Radiación solar (R<sub>s</sub>), velocidad del viento (U), temperatura (T), y humedad relativa (HR) en plano horizontal a 1.5 m de altura. (Anexo 1)

#### 3.3.2.1 Recolección de datos meteorológicos

Los datos meteorológicos registrados por las estaciones meteorológicas automáticas fueron almacenados en una consola Vantage Pro2 incorporado, con un intervalo de 15 minutos durante 24 horas del día. La descarga de los datos meteorológicos almacenados en la consola Vantage, se realizó en un computador portátil a través del software WeatherLink 5.9 con un intervalo de 15 días para su posterior procesamiento.

### 3.3.3 Medición de la evapotranspiración de referencia (ET<sub>o</sub>)

El cálculo de la evapotranspiración de referencia en condiciones de invernadero, se realizó a través de los métodos directo e indirecto; el primero se basa en la entrada y salida de agua en un cultivo específico, como es el lisímetro, el segundo denota la ecuación de FAO Penman-Monteith el cual es utilizado para determinar los requerimientos hídricos de los cultivos.

En condiciones de cielo abierto, el cálculo de la evapotranspiración de referencia se realizó únicamente por el método indirecto que contempla la aplicación de la ecuación FAO Penman-Monteith a partir de registros de las distintas variables climáticas, pues existen numerosos estudios que ya han validado la mencionada ecuación para condiciones de cielo abierto.

#### 3.3.3.1 Método de micro lisímetro

La micro lisimetría ha sido ampliamente desarrollada para estudios de evaporación del agua a suelo desnudo en los últimos años, sin embargo estos no han sido consistentes en la cuantificación del consumo del agua por las plantas en general Bremer (2005) citado por Pacheco *et al.*, (2014).

La frecuencia de aplicación de agua en el lisímetro fue cada tres días, además se midió el agua drenada (D), y la diferencia de humedad en el suelo ( $\Delta S$ ) que comprende la diferencia de la humedad inicial y la humedad final del suelo. La humedad del suelo se controló durante el periodo de investigación con una sonda de humedad del suelo TDR (Time Domain Reflectometry) punta de varilla que mide el tiempo recorrido de un pulso electromagnético, que varía con el contenido de agua en el suelo a una profundidad de 0,076 m.

La aplicación del balance hídrico de suelo permitió calcular el consumo de agua del ray grass en (mm) en el periodo, lo que equivale la evapotranspiración de referencia (ET<sub>o</sub>) dentro del invernadero. Suponiendo que la percolación profunda neta en el intervalo es despreciable y considerando que la precipitación dentro del invernadero es nula la ecuación se puede simplificar como sigue:

$$ET = R - D - \Delta S \quad (10)$$

Dónde, R es el riego,  $\Delta S$  representa a la diferencia de humedad en el suelo durante el periodo de medición, D es el drenaje.

Esta ecuación fue aplicada con un intervalo promedio de 5 días, para la estimación de ETo en la premisa principal. El periodo de evaluación se llevó entre los meses de febrero a julio del año 2015.

### 3.3.3.2 Método FAO Penman-Monteith

Para estimar la evapotranspiración de referencia (ETo) por el método indirecto, se utilizó el procedimiento más aceptado por la comunidad científica que es el método de la FAO Penman-Monteith, que fue seleccionado como el método por el cual la evapotranspiración de la superficie de referencia puede ser inequívocamente determinada y con el cual se obtienen valores consistentes de ETo en todas las regiones y climas, la cual se representa con la ecuación 3 (Allen *et al.*, 2006).

$$ETo = \frac{0.408 \Delta (R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0.34 u_2)}$$

El cálculo de la evapotranspiración de referencia (ETo) con el método de FAO Penman-Monteith se realizó de manera diaria.

## 3.4 Información necesaria para la aplicación de la ecuación FAO Penman-Monteith

Para llevar adelante los cálculos diarios o mensuales de la evapotranspiración de referencia mediante la ecuación de FAO Penman-Monteith se requiere la localización y datos meteorológicos de la zona de estudio.

### 3.4.1 Localización

La altura sobre el nivel del mar (m), su latitud y longitud deben ser especificados. Estos datos son necesarios para ajustar algunos parámetros climáticos al valor medio local de la presión atmosférica y para calcular la radiación extraterrestre (Ra).

### 3.4.2 Temperatura

Para la aplicación de la fórmula FAO Penman-Monteith, se requiere información de temperatura diaria promedio, máxima y mínima en grados centígrados ( $^{\circ}\text{C}$ ).

### 3.4.3 Presión de vapor real

El valor de la presión real (promedio) diaria de vapor, ( $e_a$ ), en kilopascales (kPa) se requiere como dato de entrada para la aplicación de la ecuación FAO Penman-Monteith. Dado que los valores de presión real de vapor no están disponibles, estos fueron derivados de la humedad relativa máxima y mínima provista por la estación meteorológica.

### 3.4.4 Radiación neta

La radiación neta fue calculada con la ecuación 7, y tiene dos componentes, el primero es la radiación neta de onda corta, calculada con la ecuación 5, que es la diferencia entre la radiación solar que alcanza la superficie y la que es reflejada nuevamente hacia la atmósfera; el segundo es la radiación neta de onda larga (ecuación 6), que es la diferencia entre la radiación de onda larga que llega y la que sale de la superficie, la radiación de onda larga es estimada por la tierra y se refleja en gases que se encuentran en la atmósfera como el  $\text{CO}_2$  y el  $\text{CH}_4$  y en las nubes para regresar nuevamente hacia la superficie (Foken and Nappo (2008) citado por Córdova (2013)).

La radiación neta diaria (promedio) esta expresada en megajoules por metro cuadrado por día ( $\text{MJ m}^2 \text{ día}^{-1}$ ).

### 3.4.5 Viento

Para la aplicación de la ecuación FAO Penman-Monteith se requiere contar con la velocidad del viento (promedio) diaria en metros por segundo ( $\text{m s}^{-1}$ ) medida a 2 m de altura sobre el nivel del suelo.

### 3.4.6 Análisis estadístico

El análisis de la información correspondiente a los valores de ETo se hizo mediante una regresión simple entre los valores calculados por la ecuación de FAO Penman Monteith y las variables climáticas que la influyen.

### 3.5 Proceso de factor de corrección para condiciones de invernadero

Allen *et al.*, (1996) sugieren que la diferencia entre temperatura del aire máxima y mínima ( $T_{\max} - T_{\min}$ ) se puede utilizar como indicador de la fracción de la radiación extraterrestre que alcanza la superficie de la tierra. Los mismos autores indican que la raíz cuadrada de la diferencia de temperaturas está muy relacionada con la radiación solar diaria en una localidad dada. Por esta metodología, la radiación solar derivada de las diferencias térmicas fue calculada con la ecuación de Hargreaves para condiciones de cielo abierto y en invernadero simulando el caso de no tener datos disponibles de radiación solar.

Por consiguiente, el factor de corrección para el cálculo de ETo en invernadero con la ecuación FAO Penman-Monteith con datos de cielo abierto, se realizó a través de la fórmula de Hargreaves (ecuación 8) con fin de calcular la radiación solar a cielo abierto en el caso de tener datos faltantes de esta variable, necesario para el cálculo de la ETo, por tanto, para la aplicación de la ecuación 8 se calculó el coeficiente de ajuste  $k_{Rs}$  (ecuación 9) que difiere de zonas al interior (en donde la masa de tierra domina y las masas de aire no están influenciadas fuertemente por un cuerpo grande de agua), lo cual está en función de la presión atmosférica del lugar.

Posteriormente, una ecuación lineal representa el ajuste de la radiación solar a cielo abierto en una radiación solar al interior del invernadero.

## 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1 Análisis físico del suelo

La textura del sustrato del invernadero donde se localizaba la superficie de referencia de pasto ray grass fue determinada en laboratorio presentando una clase textural franco, con un punto de marchitez permanente (PMP) de 14,8 % en Volumen y una capacidad de campo (CC) de 29,4 % Volumen. Estos datos muestran que para pasar de un estado de humedad del suelo en PMP hasta CC, considerando 40 cm de suelo del lisímetro mayor, se requieren 58 mm de riego en un solo evento.

Este dato fue considerado como referencial para mantener el contenido de agua del suelo entre PMP y CC. De esta manera luego del riego inicial de 40 mm, cuando el suelo estaba seco, se aplicó en promedio 10 mm de riego cada 3 días. Los parámetros químicos del suelo del invernadero se detallan en el anexo 3.

### 4.2 Datos meteorológicos al exterior y al interior del invernadero

Los valores medios mensuales durante el periodo de evaluación de los datos climáticos a cielo abierto (exterior) y en condiciones de invernadero (interior) se detallan en el cuadro 1.

Cuadro 1. Media mensual de datos climáticos de temperatura, presión real de vapor, radiación solar, velocidad del viento y evapotranspiración de referencia calculada por ecuación FAO Penman-Monteith.

Periodo	Temperatura (°C)		Presión real de vapor $e_a$ (kPa)		Radiación solar ( $MJ\ m^{-2}$ )		Velocidad del viento ( $m\ s^{-1}$ )		ET <sub>o</sub> (mm)	
	Exterior	Interior	Exterior	Interior	Exterior	Interior	Exterior	Interior	Exterior	Interior
Febrero	13,5	22,9	0,97	2,13	19,9	7,7	0,7	0	100,36	54,83
Marzo	13,5	23,7	0,97	2,31	18,7	7,1	0,5	0	102,11	57,71
Abril	12,6	21,0	0,95	1,93	15,6	6,2	0,2	0	78,12	47,57
Mayo	12,2	20,2	0,64	1,51	17,3	6,8	0,1	0	74,33	47,88
Junio	11,6	20,2	0,58	1,40	17,1	7,0	0,1	0	64,48	44,91
Julio	10,9	19,0	0,44	1,30	16,9	6,5	0,3	0	70,79	44,92

La diferencia observada en la temperatura media mensual entre el entorno interno (invernadero) y el externo (cielo abierto) durante el periodo de evaluación fue en

promedio 8,8 °C, la temperatura media del aire dentro del invernadero fue en promedio 41,4% superior a la temperatura de entorno a cielo abierto.

Como se muestra en la figura 2, los valores de temperatura mínima y temperatura máxima muestran una diferencia entre los ambientes externos y los ambientes protegidos. Estos resultados demuestran una fuerte ganancia energética ocurrida gracias al ambiente atemperado, lo cual podría ser mayor en zonas tropicales, pues Sousa, *et al.*, (2002), Boueri y Lunardi (2006) citado por De Andrade (2011) reportan en un estudio realizado en Teresina, estado de Piauí, Brazil, que en invernadero la temperatura en promedio es solo 17% más alto con relación al ambiente exterior, es decir, que en este caso debería ser de solo 3,3 °C más alta.

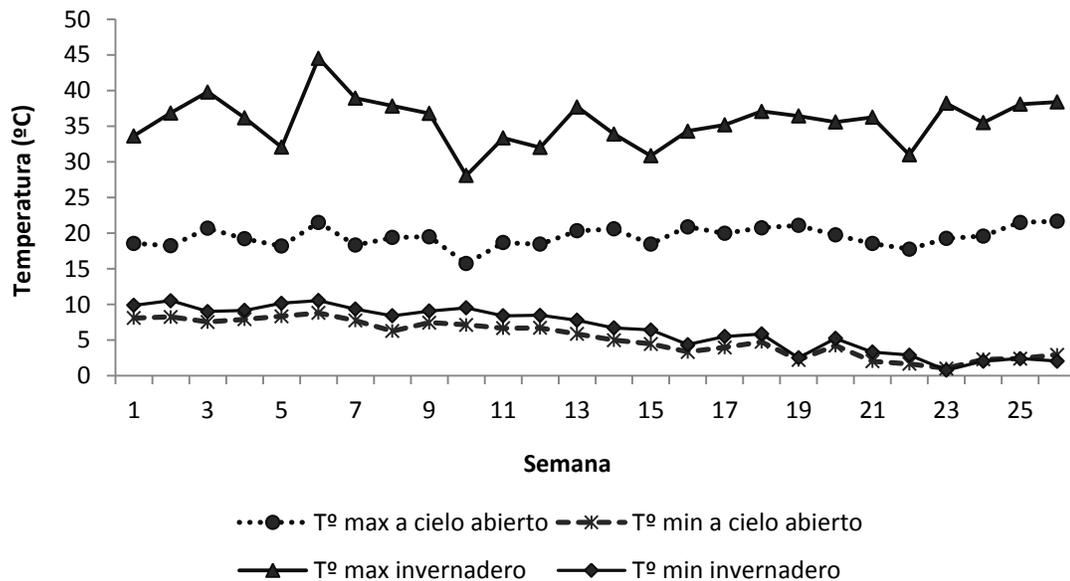


Figura 2. Valores de temperatura máxima y mínima semanal a cielo abierto y bajo condiciones de invernadero.

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 como se muestra en la figura 2. En la Figura 2, se aprecia claramente que la ganancia energética dentro de un invernadero, se relaciona mucho más a la acumulación durante el día (Tmax) que a la menor pérdida energética durante la noche (Tmin), Esto ya fue reportado en invernaderos del altiplano por Barrientos (2011) quien demostró que con mal manejo, las carpas solares podrían

producir condiciones incluso de menor temperatura durante la noche que a cielo abierto.

Uno de los parámetros para la estimación de ETo es la radiación solar ( $R_s$ ), la cual se define con la ecuación de radiación de Hargreaves (Ecuación N° 8), esta ecuación al considerar la temperatura máxima y mínima, sobre estima los valores de radiación solar en invernadero debido a que la amplitud térmica es muy alta al interior del invernadero.

#### **4.3 Comportamiento de la ETo y contribución de los términos radiativo y aerodinámico en la ecuación FAO Penman-Monteith dentro del invernadero**

El valor diario de la evapotranspiración de referencia (ETo) calculada con la ecuación FAO Penman-Monteith, es presentado en la Figura 3, con la línea punteada, asumiendo una velocidad del viento de  $0.1 \text{ m s}^{-1}$  que representa a una localidad con muy baja velocidad del viento. La Figura muestra que los valores de ETo en invernadero oscilan entre 1.5 y 2 mm/día, con mayor variación durante los meses estivales que en el invierno.

Durante los meses de verano, la variación en la nubosidad y la presencia de días alternos con precipitación, influyen en cambios bruscos de la ETo, pues su valor depende de la radiación que varía fuertemente si se presenta nubosidad o no. En invierno en cambio, existe una mayor estabilidad de la nubosidad y la insolación, la cual se refleja en una menor variabilidad de la ETo.

Los valores calculados, demuestran que la demanda evaporativa de la atmósfera dentro de un invernadero es reducida, lo cual apoya el uso eficiente del agua dentro de estos ambientes, ya que su productividad es elevada.

##### **4.3.1 Evaluación de los términos radiativo y aerodinámico en la ecuación FAO Penman-Monteith dentro del invernadero**

Para el cálculo de ETo, la ecuación FAO Penman-Monteith (párrafo 3.3.3.2) está compuesta por dos expresiones; el primero corresponde al término radiativo que toma en cuenta principalmente la energía provista para la evapotranspiración por la radiación solar y el segundo corresponde al término aerodinámico que está en función a la

velocidad del viento y del déficit de presión de vapor que promueven la evapotranspiración.

Con el fin de evaluar la importancia de los dos componentes principales dentro del invernadero, se aplicó la ecuación mencionada para calcular la ETo, tanto como la suma de sus dos expresiones y la calculada solamente con el término radiativo en los meses en estudio (Figura 3).

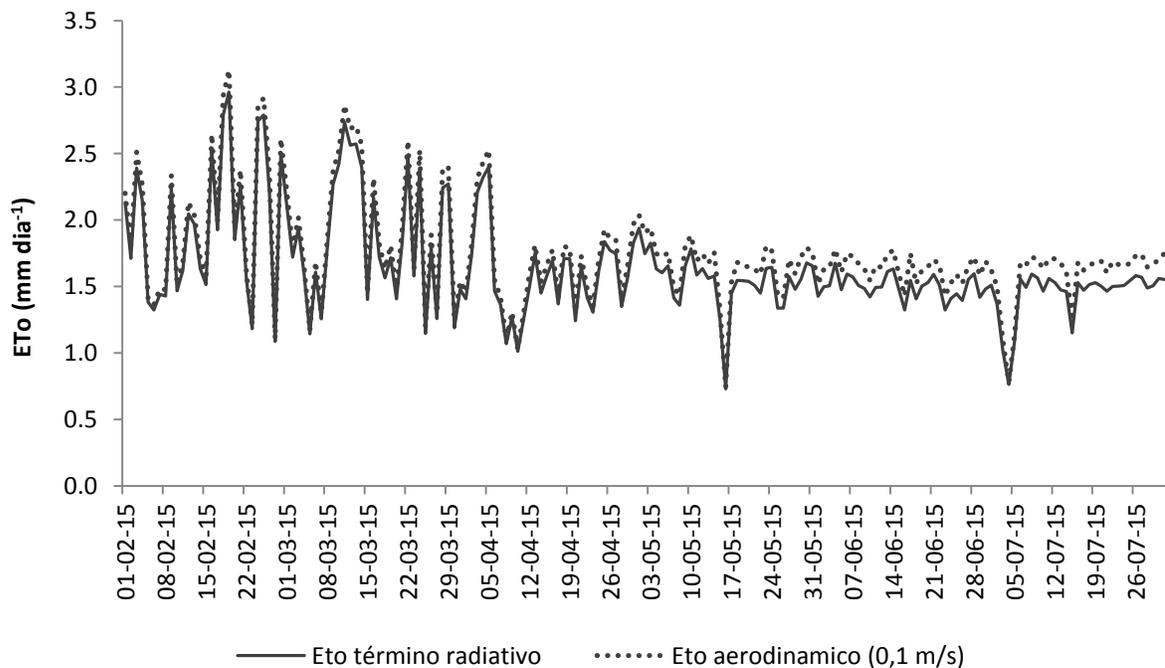


Figura 3. Valores calculados de ETo incluyendo solamente el término radiativo e incluyendo ambos términos para condiciones de invernadero.

El comportamiento de ETo calculada con los dos términos (radiativo y aerodinámico) es muy similar al calculado solamente con el término radiativo, pues la velocidad del viento en invernadero es cercana a cero, solo influenciada por la ventilación interna la cual por su baja magnitud, al mismo tiempo determina un muy reducido déficit de presión de vapor de agua en el aire. Estos resultados fundamentalmente demuestran también que la evapotranspiración dentro del ambiente atemperado, está influenciada en una gran proporción por la energía radiativa y muy levemente por la energía aerodinámica. Lo cual resalta la importancia de una adecuada estimación de la radiación neta pues es la fuerza que determina el consumo de agua.

También se aprecia que la importancia relativa del término aerodinámico, aunque continua siendo muy baja, es levemente mayor en invierno que en verano. Este efecto coincide con la dinámica climática, pues la menor cantidad de humedad atmosférica en la zona ocurre precisamente cuando el término aerodinámico incrementa levemente su importancia.

Dado que la velocidad del viento dentro del invernadero es determinada por su ventilación, muchas veces esta velocidad es estimada, debido a que su medición directa provee resultados de cero (0), en casos cuando la ventilación es reducida. En estos casos, debe asignarse un valor a la velocidad del viento. Con el fin de evaluar la importancia relativa del valor de la estimación efectuada, se presenta el cálculo de ETo bajo la estimación de velocidades de viento muy reducidas (0,1 y 0,01 m s<sup>-1</sup>).

El cuadro 2, detalla el promedio diario mensual de ETo para cada caso, el error absoluto y el error relativo que muestra las diferencias que existe con el cálculo de la ETo, donde, se aprecia que la distorsión máxima en el cálculo de la ETo al usar un valor de velocidad de viento (0,01 m s<sup>-1</sup>) en condiciones de invernadero es 0,97% correspondiente a un incremento estimativo de 0,0143 mm día<sup>-1</sup>, mientras que la distorsión al calcular la ETo con un valor superior de velocidad de viento (0,1 m s<sup>-1</sup>) presenta una diferencia de 9,62 % que corresponde a 0,142 mm día<sup>-1</sup> en ambiente controlado.

Cuadro 2. Comparación del promedio diario mensual de ETo calculada solo con el termino radiativo y calculada incluyendo también el termino aerodinámico si se asumen dos velocidades de viento.

MES	ETo calculada con el Término energético	ETo calculada incluyendo el Término aerodinámico con un valor de viento de (0,01 m s <sup>-1</sup> )			ETo calculada incluyendo el Término aerodinámico con un valor de viento de (0,1 m s <sup>-1</sup> )		
	ETo (mm día <sup>-1</sup> )	ETo (mm día <sup>-1</sup> )	E <sub>abs</sub> (mm día <sup>-1</sup> )	E <sub>rel</sub> (%)	ETo (mm día <sup>-1</sup> )	E <sub>abs</sub> (mm día <sup>-1</sup> )	E <sub>rel</sub> (%)
Febrero	1,96	1,97	0,0083	0,40	2,04	0,082	3,99
Marzo	1,86	1,87	0,0091	0,47	1,95	0,091	4,70
Abril	1,59	1,59	0,0076	0,47	1,66	0,076	4,64
Mayo	1,54	1,56	0,0114	0,73	1,66	0,113	7,22
Junio	1,50	1,51	0,0136	0,91	1,63	0,135	9,06
Julio	1,45	1,46	0,0143	0,97	1,59	0,142	9,62

Estos resultados muestran que en casos de invernaderos poco ventilados, incluso con una estimación del valor del viento de  $0,1 \text{ m s}^{-1}$ , no producirá un error práctico de magnitud, sin embargo también demuestran que en invernaderos con mayor ventilación, es importante contar con datos más precisos de la velocidad interna del viento.

#### 4.3.1.1 Dinámica del término radiativo

La contribución a la demanda evaporativa de la atmósfera (ET<sub>o</sub>) del término radiativo se basa principalmente en la estimación de la radiación neta que muestra la diferencia entre la radiación neta de onda corta y la radiación neta de onda larga. La radiación de onda larga está en función de la temperatura y la humedad relativa del aire, mientras que por otro lado la radiación de onda corta está en función a la radiación solar recibida. En el siguiente cuadro se detallan los valores mensuales de las variables mencionadas.

Cuadro 3. Valores de temperatura, humedad relativa y radiación solar necesarios para el termino energético de la ecuación FAO Penman-Monteith al interior del invernadero.

Periodo	Temperatura (°C)			Humedad relativa (%)			Radiación solar (MJ m-2)		
	Máxima	Mínima	Media	Máxima	Mínima	Media	Máxima	Mínima	Media
Febrero	36,2	9,6	22,9	100,0	51,7	75,8	55	0,0	7,7
Marzo	37,8	9,6	23,7	100,0	50,3	75,2	57,5	0,0	7,1
Abril	33,2	8,8	21,0	100,0	51,0	75,5	48,6	0,0	6,2
Mayo	34,4	5,9	20,2	100,0	36,2	68,1	40,8	0,0	6,8
Junio	36,4	4,1	20,2	100,0	31,4	65,7	34,9	0,0	7,0
Julio	36,0	2,0	19,0	99,9	32,3	66,1	35,3	0,0	6,5

La máxima radiación solar recibida dentro de los invernaderos ocurrió en los meses de febrero y marzo. En los meses de junio y julio que representan a la época seca, la radiación solar dentro de los invernaderos es en promedio menor en un 37,6% con relación a la que se presenta en los meses de mayor incidencia.

Al respecto Allen, *et al.*, (2006) indican que la cantidad potencial de radiación que puede llegar a una superficie evaporante viene determinada por su localización y época del año. En este caso, a pesar de que el invernadero se encuentra en una latitud tropical, se aprecia una clara diferencia en la radiación solar recibida entre los meses de

mayor recepción y los de menor recepción. A pesar de lo mencionado, la cantidad de radiación solar recibida, es grande incluso en los meses de menor recepción.

La relación de los valores recibidos de radiación solar en invernadero y los valores de ETo obtenidos con la ecuación FAO Penman-Monteith se muestran en la siguiente figura de correlación y regresión lineal de las variables mencionadas anteriormente.

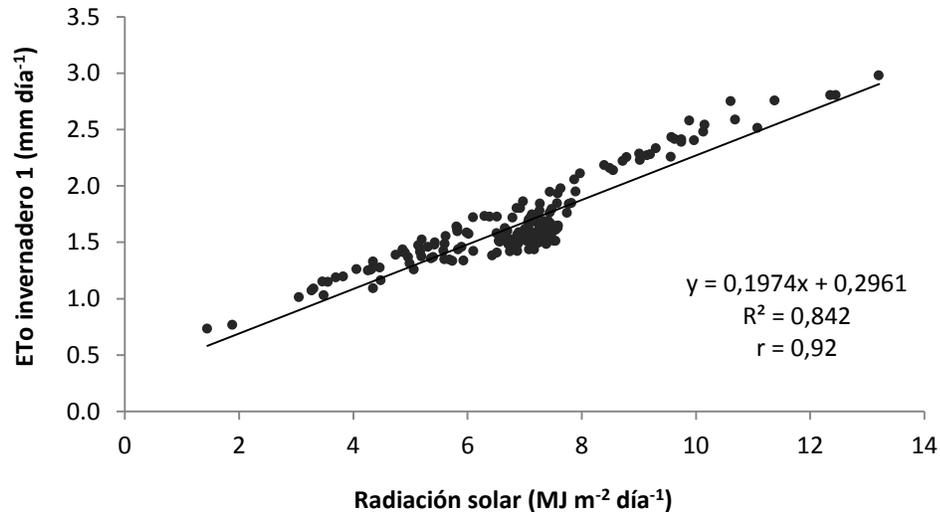


Figura 4. Regresión lineal de radiación solar y evapotranspiración de referencia (ETo) en invernadero.

La correlación entre la radiación solar recibida en invernadero y la evapotranspiración de referencia en invernadero, ( $r=0,92$ ), indica que existe una fuerte relación lineal para ambas variables, manifestando que a medida que la radiación solar medida en el interior del invernadero incrementa la ETo en ambiente controlado también lo hará.

El  $r^2$  indica que el 84% de la evapotranspiración de referencia depende de la radiación solar recibida al interior del invernadero, siendo que la velocidad del viento dentro del ambiente controlado es muy baja o no existe, por lo tanto la ETo calculada con la ecuación FAO Penman-Monteith se ve levemente influenciada por la velocidad del viento.

Esmeral (2011) indica que el estudio realizado por Jolliet y Bailey (1992) acerca de los efectos del clima sobre la transpiración en un cultivo bajo invernadero, concluyó que la tasa de transpiración en un invernadero se incrementa linealmente con la radiación solar. También, encontró que el factor temperatura del aire y concentración de CO<sub>2</sub> no

influyen significativamente. Asimismo, en el presente estudio, la radiación solar es el factor más preponderante casi desapareciendo la influencia del viento y la humedad atmosférica.

De Andrade, *et al.*, (2011), señalan que los elementos internos tienen mejor ajuste considerando la radiación solar interna seguida por la humedad relativa y la temperatura.

También se evaluó la relación entre la radiación neta ( $R_n$ ) y la ETo en invernadero. La  $R_n$  es la diferencia entre la radiación solar entrante y saliente de longitudes de onda cortas y largas y muestra la diferencia entre la energía absorbida, reflejada y emitida por la superficie terrestre. En otras palabras, este valor muestra no solo la radiación incidente, sino también la pérdida por la superficie terrestre.

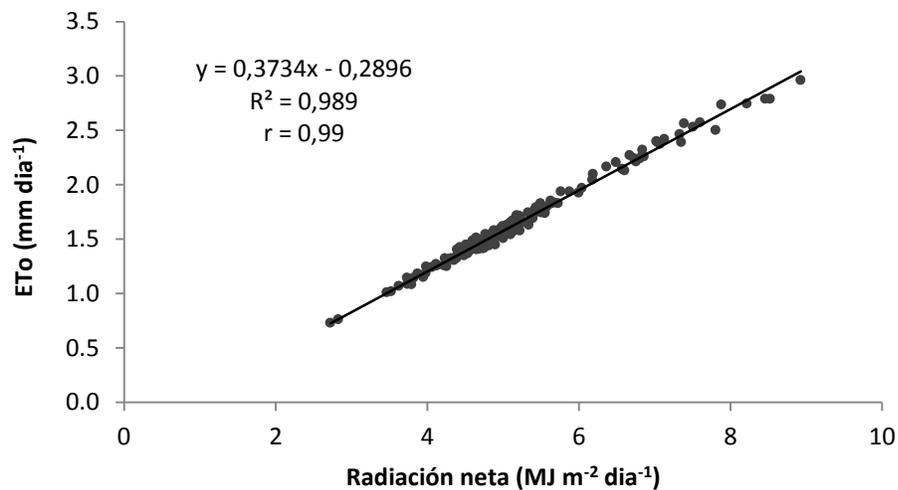


Figura 5. Correlación y regresión lineal entre la radiación neta y la evapotranspiración de referencia dentro del invernadero.

El resultado de la correlación entre la radiación neta y la evapotranspiración de referencia (figura 5), muestra un coeficiente de correlación de 0,99, lo que indica claramente que existe una relación directa de dependencia entre las variables mencionadas y, que el 99% de la evapotranspiración de referencia en invernadero depende del comportamiento de la radiación neta. Se observa también que por cada unidad de radiación neta que incremente en el interior del invernadero se espera que la ETo se incremente en  $0,3 \text{ mm día}^{-1}$ .

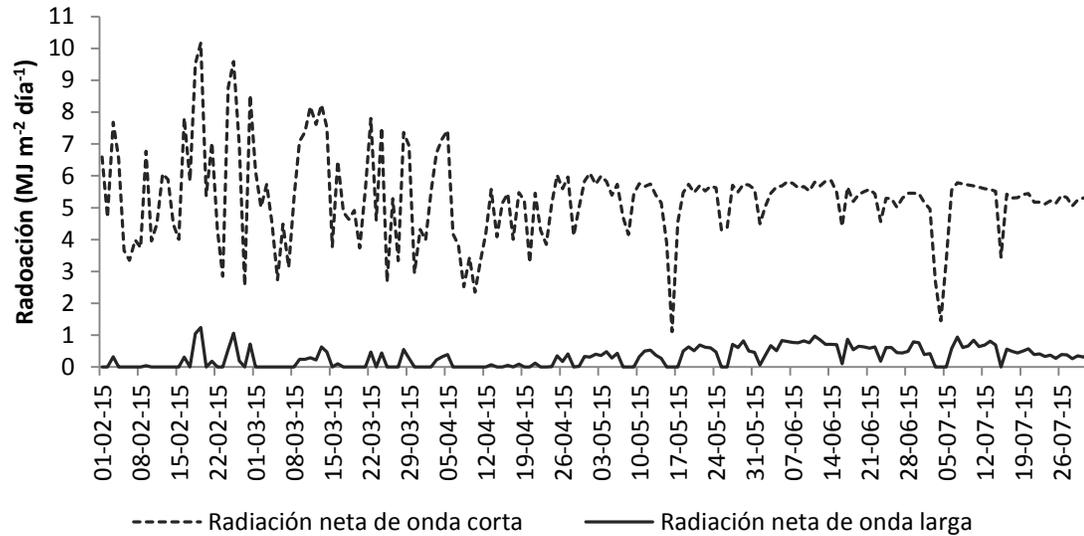


Figura 6. Comportamiento de balance de onda corta y el balance de onda larga en invernadero.

El comportamiento del balance de la radiación neta de onda corta y el balance de radiación neta de onda larga presenta una diferencia amplia. La figura 6, muestra que la mayor temperatura se debe a que prácticamente no se pierde radiación terrestre y eso provoca acumulación energética que se expresa en acumulación de calor e incremento térmico.

La razón para esta dependencia se encontraría en que el proceso de la evapotranspiración está determinado por la cantidad de energía disponible para evaporar el agua. En un invernadero poco ventilado, como lo son los utilizados en Bolivia, la radiación solar es la más importante fuente de energía y como mencionan Allen *et al.*, (2006), puede cambiar grandes cantidades de agua líquida en vapor de agua.

### 4.3.1.2 Dinámica del término aerodinámico

El término aerodinámico se basa principalmente en la velocidad del viento y de la humedad atmosférica.

Cuadro 4. Valores de temperatura, presión de vapor y velocidad del viento necesarios para el término aerodinámico de la ecuación FAO Penman-Monteith al interior del invernadero.

Periodo	Temperatura (°C)			Presión real de vapor $e_a$ (kPa)			Velocidad del viento ( $m\ s^{-1}$ )		
	Máxima	Mínima	Media	Máxima	Mínima	Media	Máxima	Mínima	Media
Febrero	36,2	9,6	22,9	9,19	2,58	6,25		0,0	
Marzo	37,8	9,6	23,7	4,03	1,38	2,31		0,0	
Abril	33,2	8,8	21,0	3,43	1,25	1,92		0,0	
Mayo	34,4	5,9	20,2	3,08	0,72	1,51		0,0	
Junio	36,4	4,1	20,2	2,43	0,75	1,40		0,0	
Julio	36,0	2,0	19,0	2,07	0,69	1,30		0,0	

La velocidad del viento en invernaderos poco ventilados es cero, pues no se presenta viento en estas condiciones. Allen, *et al.*, (2006) señalan que bajo condiciones atmosféricas húmedas, de reducido viento y la presencia de nubes la demanda evapotranspiratoria es baja pues estas condiciones reducen la energía evaporativa, restringiéndola a aquella otorgada por la radiación de la zona.

### 4.4 Evaluación del consumo de agua del ray grass en lisímetro

El consumo de agua del raygrass (cultivo que simula al cultivo hipotético de referencia) fue evaluado mediante lisímetros al interior del invernadero, aplicando la ecuación de balance hídrico de suelo (párrafo 3.3.3). Los valores encontrados muestran que el consumo de agua del pasto se encuentra en fuerte relación a los valores calculados con la ecuación de la FAO Penman-Monteith (Figura 5), demostrando que la ecuación calcula adecuadamente los valores de  $ET_o$  en invernadero, pero además confirmando el reducido consumo de agua dentro de los ambientes controlados.

En la Figura 7, se muestra el consumo de agua del ray grass en lisímetro se comparan los valores medidos de la  $ET_o$  con los valores estimados de la  $ET_o$  durante el periodo de evaluación.

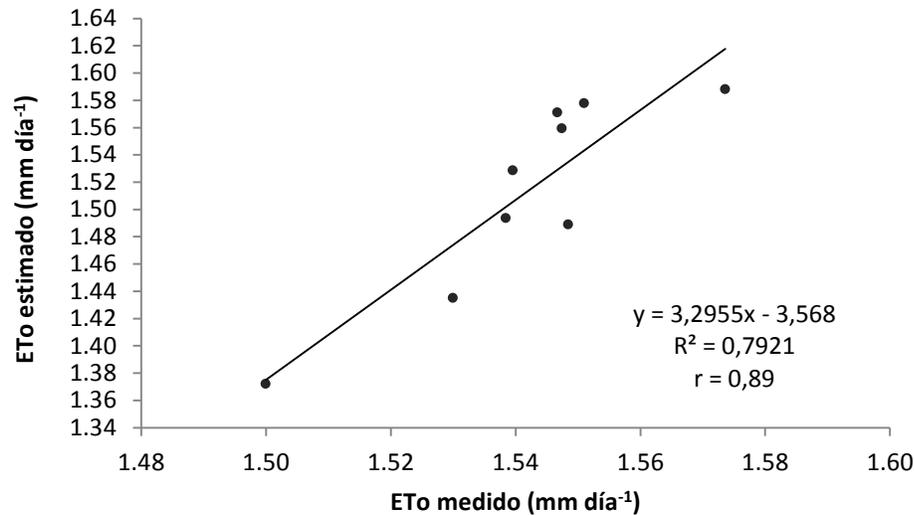


Figura 7. Evapotranspiración de referencia diaria, estimada con la ecuación FAO Penman-Monteith, y la Evapotranspiración medida con lisímetro al interior del invernadero.

La figura 7, muestra que la correlación entre la ETo medida y la ETo estimada con la ecuación FAO Penman-Monteith es muy elevada. El coeficiente de correlación “r” de 0,89, indica que existe una relación lineal y directa para la ETo medida y la estimada, manifestando de esta manera que los valores de ETo obtenidos con la ecuación de FAO Penman-Monteith son validados con los valores de ETo encontrados con el método directo del lisímetro al interior del invernadero de estudio.

Similarmente, Pire, *et al.*, (1998) citado por Martínez, *et al.*, (2005) reportan que en un estudio con lisímetros en el estado Lara (México), la fórmula que mejor reprodujo los valores de ETo fue la de Penman-Monteith.

#### 4.4.1 Relación del consumo de agua del ray grass con los factores que determinan los valores de la ETo calculada con la ecuación FAO Penman-Monteith

El consumo de agua por parte del pasto está determinado físicamente por las mismas variables que intervienen en la ecuación de la FAO Penman-Monteith. Como se demostró arriba, la ETo en invernadero está determinada fundamentalmente por la radiación solar, por ello se presenta un análisis de su comportamiento.

La radiación solar dentro de un invernadero es transmitida por el material aislante. En el caso de estudio, el material aislante es el plástico el cual produce una transmisividad de la radiación que determina la energía disponible para la evapotranspiración del pasto. Por ello se muestra la transmisividad (proporción de la radiación solar exterior que penetra dentro de invernadero) del plástico del invernadero como se observa en la figura 8.

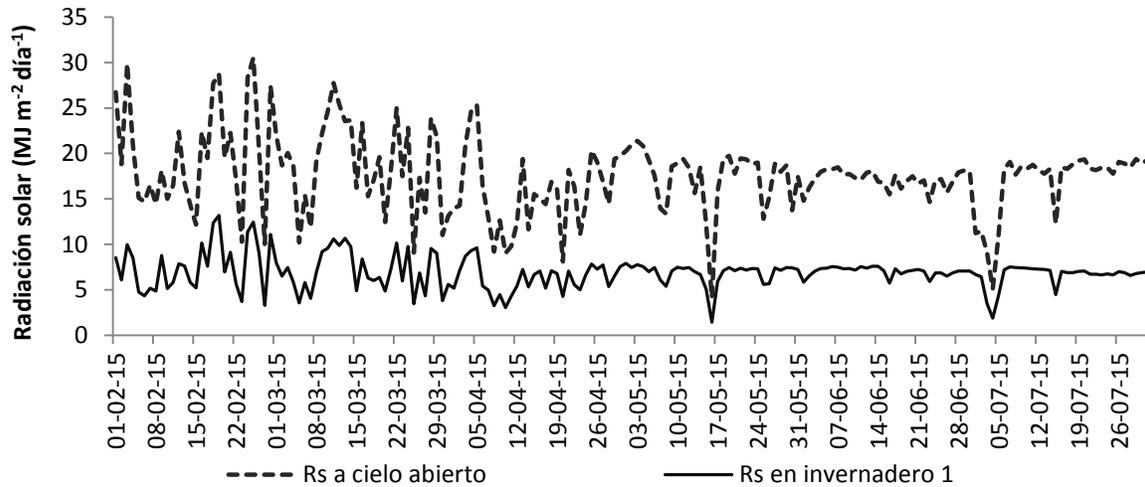


Figura 8. Comportamiento de la Radiación solar a cielo abierto y en invernadero 1.

La radiación solar diaria recibida dentro del invernadero de estudio fue en promedio 60,7% más baja, que la medida a cielo abierto para el periodo evaluado. Similarmente, Pacheco, *et al.*, (2014), en un estudio reciente en invernadero del Instituto Mexicano de Tecnología del agua (IMTA) determinó que la radiación solar recibida dentro de un invernadero fue 51% menor con relación a la radiación solar medida afuera del invernadero.

Fernández, *et al* (2010), referencian el estudio realizado por De Villele (1974) bajo condiciones de invernadero, en el cual se encontraron estrechas relaciones entre la ET observada y radiación solar medida dentro del invernadero. Los autores mencionados encontraron una reducción del 56% de la radiación que ingresa al invernadero en comparación con la radiación solar externa. Obviamente esto se encuentra en función del material plástico, pero los resultados obtenidos muestran que los datos se encuentran dentro de los datos reportados por otros investigadores.

El comportamiento y la diferencia de la radiación solar transmitida dentro del invernadero en el transcurso de un día muestran que las máximas diferencias se producen en las horas de máxima insolación, cuando se atenúa fuertemente la radiación solar directamente recibida en el exterior del invernadero.

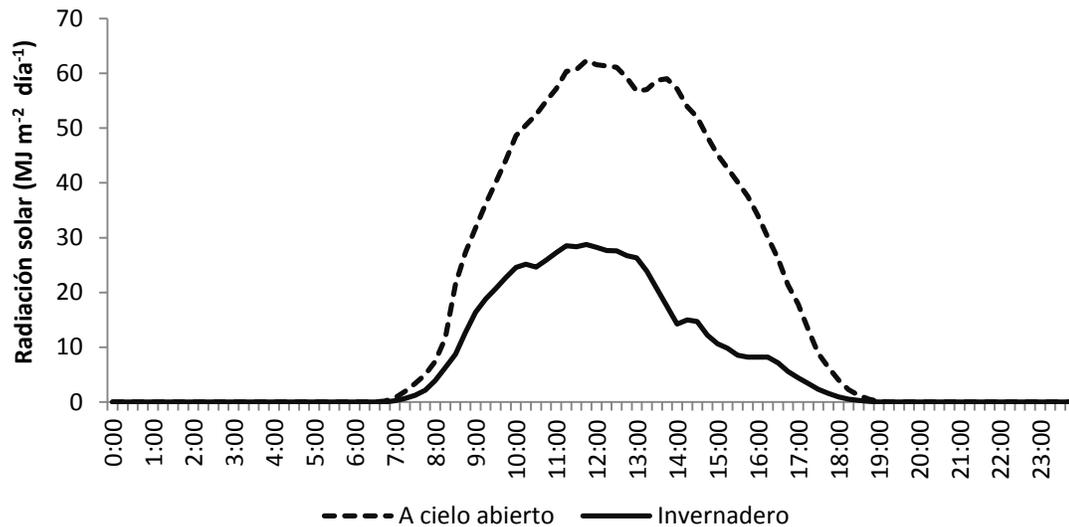


Figura 9. Comportamiento de la radiación solar horaria bajo condiciones de cielo abierto, invernadero principal.

Al respecto Sentelhas, (2001) citado por Fernandes *et al.*, (2003), indican que el plástico que es utilizado en invernaderos, significativamente cambia el balance de radiación relativamente a la del ambiente externo, debido a la atenuación (absorción y reflexión) de la radiación solar incidente, resultando en una reducción del saldo de radiación interna lo que, en consecuencia, afecta a la evapotranspiración.

Al respecto Lorenzo (2012) menciona que los materiales de cubierta tienen alta capacidad de difusión de la radiación. La radiación difusa es adireccional y genera mayor uniformidad espacial dentro del invernadero. Otros autores citados por Lorenzo, (2012) han descrito que el aumento de la fracción difusa aumenta la radiación absorbida por el cultivo (Warren Wilson *et al.*, 1992), la eficiencia en el uso de la radiación (RUE) (Cockshull *et al.*, 1992) y la productividad del cultivo (Hemming, *et al.*, 2008). Por lo tanto la radiación difusa es la que mejor eficiencia fotosintética produce, y por esta razón, los cultivos bajo invernadero incrementan su productividad. Al respecto, Hernández, *et al.*, (2001) señalan que cuando la radiación solar atraviesa la lámina

plástica del invernadero, se modifica la proporción entre radiación directa y difusa, siendo que algunos plásticos tienen un gran poder de difusión de la luz, de modo que aumenta notablemente la proporción de la luz difusa dentro del invernadero. Ello tiene interés agronómico, pues la radiación difusa, por su carácter adireccional, es más eficiente para la fotosíntesis que la directa, a igualdad de cantidad de radiación dado que favorece la fotosíntesis incluso en estratos internos de la planta, los que con radiación directa, se encontrarían bajo sombra.

Los resultados presentados aquí, muestran que el uso de invernaderos en zonas de altitud intermedia en los trópicos, es de gran utilidad y eficiencia, pues, la gran cantidad de radiación directa recibida en zonas altas, es atenuada y transmitida como radiación difusa de gran eficiencia fotosintética, pero con menor demanda evapotranspirativa. Así se produce mejor, más y con menor uso de agua, lo cual se constituye en una gran ventaja productiva comparativa con otras latitudes.

En la figura 10, el modelo del invernadero de dos aguas, muestra una transmitancia de 0,33 y una atenuación de 0,12 pasado el mediodía, la disminución se dio, debido a que desaparece la radiación directa y solo se capta una porción de la radiación solar difusa por efecto de sombra provocada por la presencia de árboles que se encuentran a su alrededor.

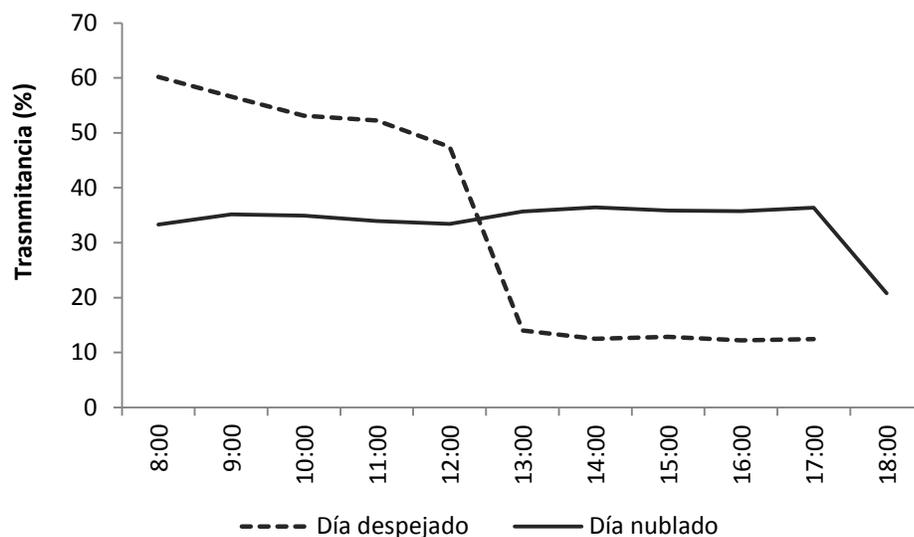


Figura 10. Transmitancia del material del invernadero en situación de día despejado y nublado.

La figura 11, demuestra que el efecto del polietileno de cubierta y la forma del diseño del invernadero reducen la incidencia de luz en un 66%, factor determinante para tener un óptimo de crecimiento en los cultivos. El pico más elevado en el registro de la intensidad luminosa, corresponde a 83.900 lux, en el ambiente exterior del invernadero y al interior del invernadero corresponde a 28,900 lux que es un valor apto para cualquier cultivo que comprende rangos entre 10.000 a 50.000 lux, como unidades para que los cultivos se desarrollen normalmente (Alpi y Tognoni (1999) citado por Barrientos (2015)).

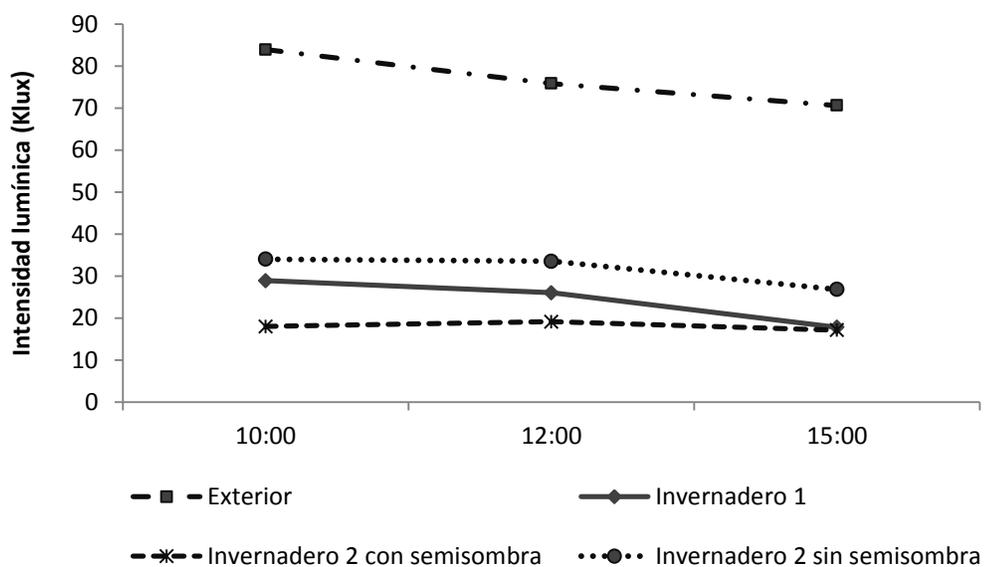


Figura 11. Intensidad lumínica externa y en la interior del invernadero en el transcurso de un día.

Manú (2003) citado por Barrientos (2015) explica que la mayor eficacia fotosintética se obtiene en general a abaja intensidad luminosa, el aumento de la intensidad luminosa de la luz no produce ningún efecto en la velocidad de la fotosíntesis (saturación). El exceso de luz, acompañando de un exceso de calor produce efectos negativos. A partir de una cierta intensidad luminosa se verifica una detención del incremento de la fotosíntesis (saturación luminosa). La excesiva intensidad de la luz, destruye el aparato fotosintético e inactiva algunas enzimas o sustancias básicas en la actividad de todo ser vivo.

La figura 12 muestra la regresión lineal entre radiación solar medida al interior y al exterior del invernadero, para el periodo evaluado con base en los datos recolectados con un intervalo de 15 minutos.

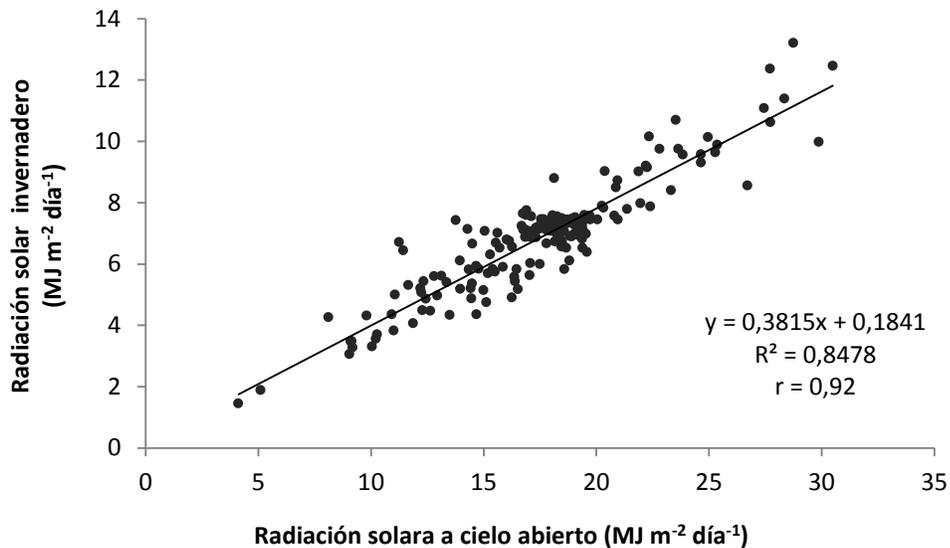


Figura 12. Regresión lineal entre la radiación solar medida al interior y al exterior del invernadero, entre febrero y julio de 2015.

La correlación entre la radiación solar a cielo abierto y la radiación solar recibida dentro del invernadero, con un coeficiente de correlación “r” de 0,92, indica que existe una fuerte relación lineal entre la radiación solar medida afuera y la recibida al interior del invernadero, demostrando amplias posibilidades para la estimación de la radiación solar dentro del invernadero con información de radiación a cielo abierto. Esto es aún más prometedor considerando que, en el párrafo anterior se describió que el factor más importante para la estimación de ETo es la radiación.

Sin embargo se debe considerar la transmisividad del material plástico del invernadero, que en el caso del invernadero es de 38,1 %.

Al respecto, Flores *et al.*, (2009) en un estudio reportan que reducir la radiación solar incidente en el invernadero hasta un 30% no repercute en una disminución significativa de biomasa total y en la partición de asimilados al órgano de interés, lo que ocurre si la tasa de sombra es superior del 50%.

#### 4.5 Comportamiento de la ETo a cielo abierto y en invernadero

La comparación de los valores diarios de la evapotranspiración de referencia a cielo abierto y en invernadero calculados a través de la ecuación FAO Penman-Monteith (Figura 12), muestran comparativamente una elevada demanda evaporativa de la atmósfera a cielo abierto en la zona de estudio. Se advierte que los valores de la ETo a cielo abierto oscilan entre 3 y 4 mm/día, demostrando que en el exterior, el consumo de agua de los cultivos es potencialmente mayor que dentro de los invernaderos, definiendo consecuentemente mayores requerimientos de riego.

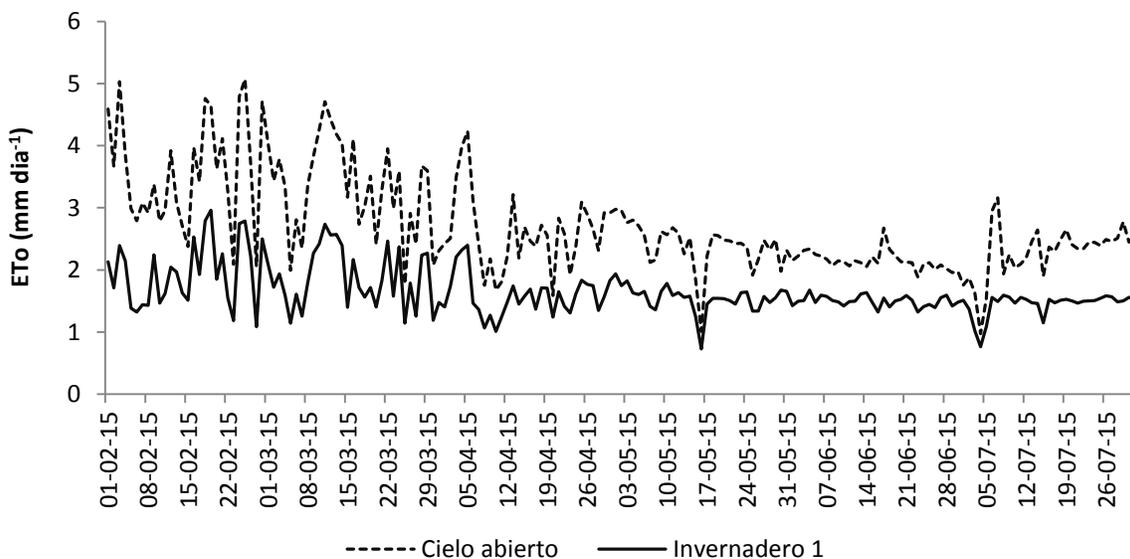


Figura 13. Valores diarios de evapotranspiración de referencia (ETo) estimados a través de la ecuación FAO Penman-Monteith, a cielo abierto y en invernadero.

Los valores diarios de ETo en invernadero son muy inferiores a los valores diarios de ETo a cielo abierto a excepción de los periodos o días con mucha nubosidad. Estos resultados pueden explicarse por la influencia de los principales factores de la demanda evaporativa de la atmósfera, tales como los valores de velocidad del viento inferiores, mayor humedad relativa y menor incidencia de la radiación solar directa en el interior de invernaderos.

Diversos autores (Farias, *et al.*, (1994); Martins, *et al.*, (1994); Braga y Klar, (2000) citado por Fernandes, *et al.*, (2003) también han observado que la evapotranspiración

en invernaderos fue inferior con relación a la evapotranspiración al aire libre, al respecto, De Andrade, *et al.*, (2011) señalan que esta diferencia es relacionada con los cambios de microclima causados por el uso de un ambiente protegido confirmando lo informado por Damalgo, *et al.*, (2006), Reis, *et al.*, (2009) y Guiselini, *et al.*, (2010) quienes mencionan que el agua de consumo de los cultivos en invernadero es menor que en condiciones de campo abierto.

La razón física para estas diferencias se centran en a) una menor radiación solar incidente dentro el invernadero que a pesar de ello, ocurre en forma difusa, lo cual incrementa su eficiencia fotosintética y b) una menor influencia del término aerodinámico que obviamente a cielo abierto presenta mucha mayor influencia relativa sobre el valor total de la ETo.

Según Montero, *et al.*, (1985); Rosenberg, *et al.*, (1989) citado por Fernandes, *et al.*, (2003) la diferencia entre los valores de evapotranspiración interna (interior del invernadero) y externa (a cielo abierto) varía en función de las condiciones meteorológicas, lo cual también se confirma en este estudio, pues en días con poca nubosidad, los valores calculados de ETo a cielo abierto son cercanos a los del invernadero. Los autores reportan que por lo general, la evapotranspiración dentro de un invernadero es de alrededor de 60 a 80% de la evapotranspiración verificada a cielo abierto. En el presente caso, en promedio la ETo dentro del invernadero fue 60,32% de la ETo a cielo abierto, valores similares a los resultados obtenidos por otros estudios, pero que sugieren un ahorro del consumo de agua de los cultivos de hasta un 40%.

Así mismo Farias, *et al.*, (1994) citado por Fernandes, *et al.*, (2003) encontraron resultados similares cuando observaron que la evapotranspiración de referencia (ETo) dentro de invernaderos en Jaboticabal Brasil siempre fue menor, variando desde 45 a 77% en verificación fuera del invernadero,

Pivetta *et al.*, (2010) citado por De Andrade, *et al.*, (2010) atribuyen que el cambio de la ETo en invernadero con relación a la ETo a cielo abierto es principalmente a la opacidad parcial de la cubierta, la radiación solar y la reducción del viento, que son los

principales factores de la demanda evaporativa atmosférica. Los elementos externos e internos del clima están relacionados con la ETo dentro del invernadero.

Con el fin de tener una mejor apreciación de la relación de la ETo a cielo abierto con la radiación solar disponible, los valores diarios de ETo calculados con la ecuación FAO-Penman-Monteith a cielo abierto se compararon con los valores diarios de radiación solar.

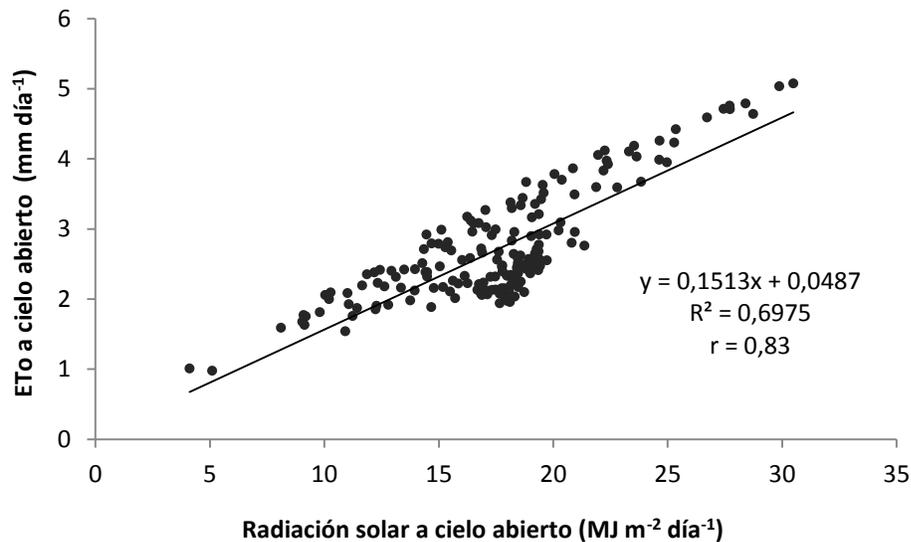


Figura 14. Regresión lineal de la radiación solar y la evapotranspiración de referencia a cielo abierto.

La correlación entre la radiación solar y la evapotranspiración de referencia (ETo) a cielo abierto presentan un coeficiente de correlación “r” de 0,83 mostrando que al igual que en invernadero, a medida que la radiación solar se incrementa, la ETo a cielo abierto también incrementa. Sin embargo esta relación es mucho menos directa que en el caso del invernadero, pues a cielo abierto, la influencia del término aerodinámico es más importante. Esto también implica que, en zonas con mayor velocidad externa del viento, como en el Altiplano Boliviano, el ahorro en el consumo de agua sería incluso mayor, lo que da luces sobre estrategias de uso eficiente de agua en zonas con limitaciones del recurso.

El  $R^2$  indica que el 69% del valor de la ETo a cielo abierto depende del comportamiento de la radiación solar medida y el 31% restante depende de otras variables, en este caso la velocidad del viento y la humedad atmosférica que influyen fundamentalmente en la

evapotranspiración de referencia. Allen, *et al.*, (2006) mencionan que el aumento de la velocidad del viento, afecta la evapotranspiración en diferente forma, cuando más seca este la atmosfera, más grande será su efecto sobre la ET.

La figura 15, muestra la correlación entre la ETo calculada con la ecuación FAO Penman-Monteith a cielo abierto y la ETo calculada con la misma ecuación en invernadero. el coeficiente de correlación “r” es de 0,79, el cual es menor en relación al coeficiente de correlación entre la radiación solar y la ETo al interior del invernadero (r= 0,92).

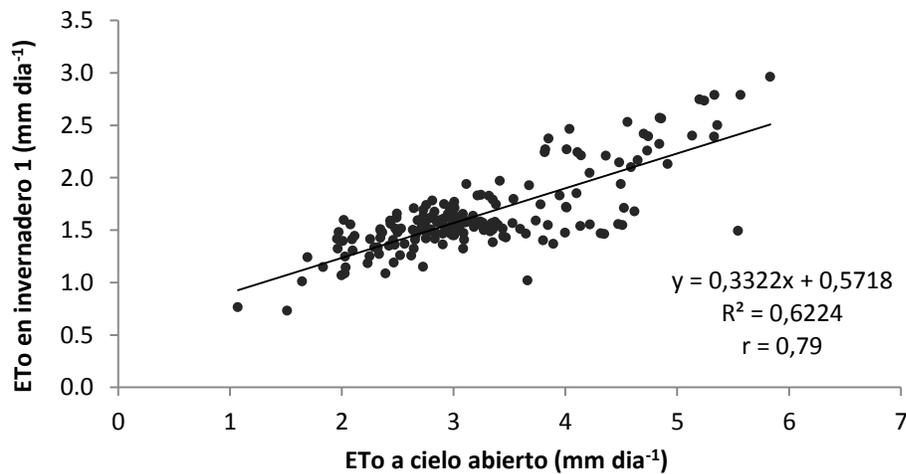


Figura 15. Regresión lineal de la ETo a cielo abierto y la ETo en invernadero.

Los resultados previos muestran que no existe una correlación clara entre la ETo a cielo abierto y en invernaderos, por lo que la corrección directamente en los valores de ETo ya calculados, produciría errores en las estimaciones de ETo. Por ello, en el presente trabajo se propone que, si solamente se cuenta con datos meteorológicos a cielo abierto, la corrección para un cálculo adecuado y con reducido error de la ETo en invernaderos debería considerar correcciones sobre la radiación, pues esta es la variable que mayor influencia tiene sobre la ETo en invernaderos.

#### 4.5.1 Comportamiento mensual de la ETo a cielo abierto y en invernadero

El cálculo acumulado de los valores de la evapotranspiración de referencia a cielo abierto en relación a la evapotranspiración de referencia calculada al interior del

invernadero, muestra que los valores mensuales dentro del ambiente controlado la ETo representan el 61,6% de la ETo calculada al exterior del invernadero. Adicionalmente, en los valores acumulados, se aprecia la mayor diferencia entre los cálculos afuera y dentro del invernadero. También se percibe que la relación no se mantiene a lo largo de los meses, demostrando nuevamente que la corrección directa sobre los valores calculados de la ETo a cielo abierto no constituye un procedimiento adecuado.

La máxima tasa de demanda de agua a cielo abierto ocurre durante los meses de máxima radiación solar la cual se presenta en el mismo periodo en el que ocurren las precipitaciones, principalmente en los meses de febrero y marzo con una ETo de 100,36 y 102,11 mm mes<sup>-1</sup> respectivamente.

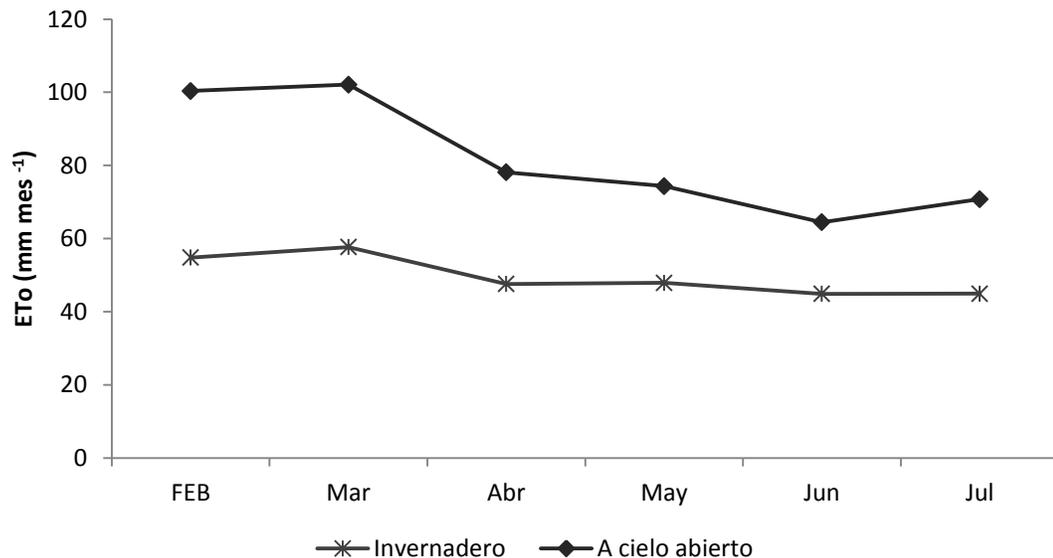


Figura 16. Comportamiento de la Evapotranspiración de referencia mensual a cielo abierto y en invernadero 1 y 2.

En invernadero la máxima demanda de agua al igual que a cielo abierto ocurre durante el mes de máxima radiación solar recibida en el interior del invernadero que se presenta en el mes de marzo con una ETo de 57,71 mm mes<sup>-1</sup>, que representa el 56,5% de la ETo calculada afuera del invernadero. Sin embargo, los picos son muy atenuados a diferencia de la fuerte influencia externa de las condiciones atmosféricas sobre la ETo.

Al respecto De Andrade, *et al.*, (2011), observaron que la evapotranspiración de referencia mensual (ET<sub>o</sub>) en invernadero vario desde 62 hasta 97 mm en un periodo de julio a enero en el Hemisferio Sur mientras que en el entorno externo la ET<sub>o</sub> fue entre 130 y 162 mm durante el mismo periodo.

#### 4.5.2 Comportamiento de la radiación solar medida y la estimada con la ecuación de Hargreaves dentro y fuera del invernadero

La radiación solar derivada de las diferencias térmicas fue calculada con la ecuación de Hargreaves para condiciones de cielo abierto y en invernadero simulando el caso de no tener datos disponibles de radiación solar.

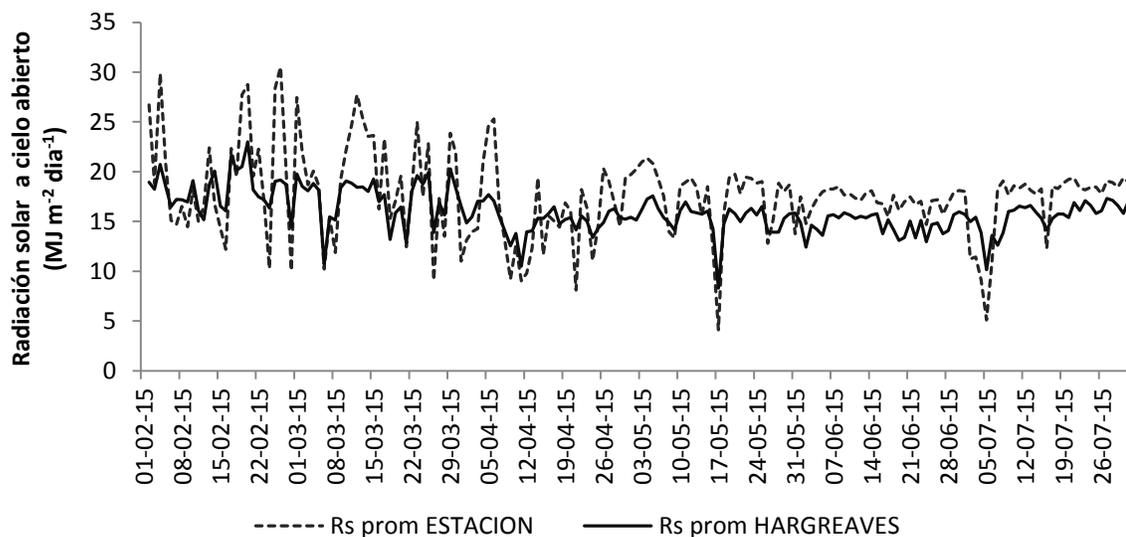


Figura 17. Comportamiento de la radiación solar medida con la estación y la estimada con la ecuación de Hargreaves en caso de datos faltantes a cielo abierto.

En el caso de cielo abierto (Figura 17), el comportamiento de la radiación solar estimada con la ecuación de Hargreaves presenta valores en el mismo rango que el promedio de la radiación solar medida con la estación meteorológica aunque no refleja los extremos máximos y mínimos de la radiación solar que acontece a cielo abierto. Esto ocurre debido a que, la ecuación de Hargreaves toma en cuenta solamente las temperaturas máximas y mínimas en un periodo diario, las cuales pueden ser atenuadas por otros factores como el viento y la humedad atmosférica, aunque la radiación solar se mantenga en valores elevados, A pesar de estas diferencias, las

estimaciones de radiación solar por parte de la ecuación de Hargreaves, se encuentra en rangos muy aceptables del valor real de ella.

En forma diferente a lo anterior, la radiación solar calculada con la ecuación de Hargreaves para condiciones de invernadero muestra un comportamiento muy diferente con relación a la radiación solar medida con la estación meteorológica como se muestra en la figura 18.

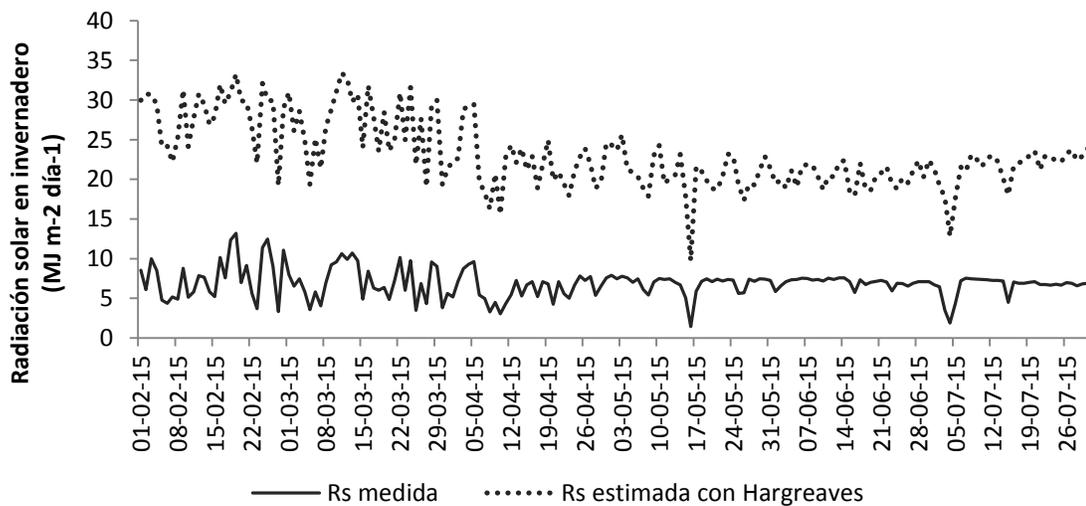


Figura 18. Comportamiento de la radiación solar medida con la estación y la estimada con la ecuación de Hargreaves en caso de dato faltante en invernadero.

En condiciones de invernadero la ecuación de Hargreaves sobrestima en promedio en 70% el valor de la radiación solar con relación a la radiación solar medida, demostrando que esta aproximación no es correcta ni apropiada para su uso y aplicación. Esto ocurre debido a que la ecuación de Hargreaves, no percibe que los extremos térmicos dentro del invernadero, se dan por la acumulación de radiación local y no así por diferencias de nubosidad. En el invernadero existe mayor amplitud térmica y dado que la ecuación de Hargreaves estima los valores de radiación solar en función a la temperatura máxima y mínima de una localidad, esta no ofrece una estimación aceptable de radiación solar al interior del invernadero.

Samani, (2000) menciona que hay un supuesto implícito en la ecuación que podría dar lugar a errores significativos en algunas condiciones, por tanto asume que la diferencia de temperatura máxima y mínima se relaciona directamente con la fracción de radiación

extraterrestre recibida a nivel del suelo, sin embargo, existe otros factores como la radiación solar y la humedad que puede influir en la diferencia de la temperatura máxima y mínima en un lugar determinado, tal cual ocurre en el presente caso.

#### 4.5.3 Comportamiento de ETo con datos faltantes de radiación dentro y fuera del invernadero

El cálculo de la ETo, incluyendo los valores de la Rs estimada con la ecuación de Hargreaves muestra que esta corrección no afecta severamente en los valores obtenidos, en comparación a aquellos calculados con los datos completos (Figura 19).

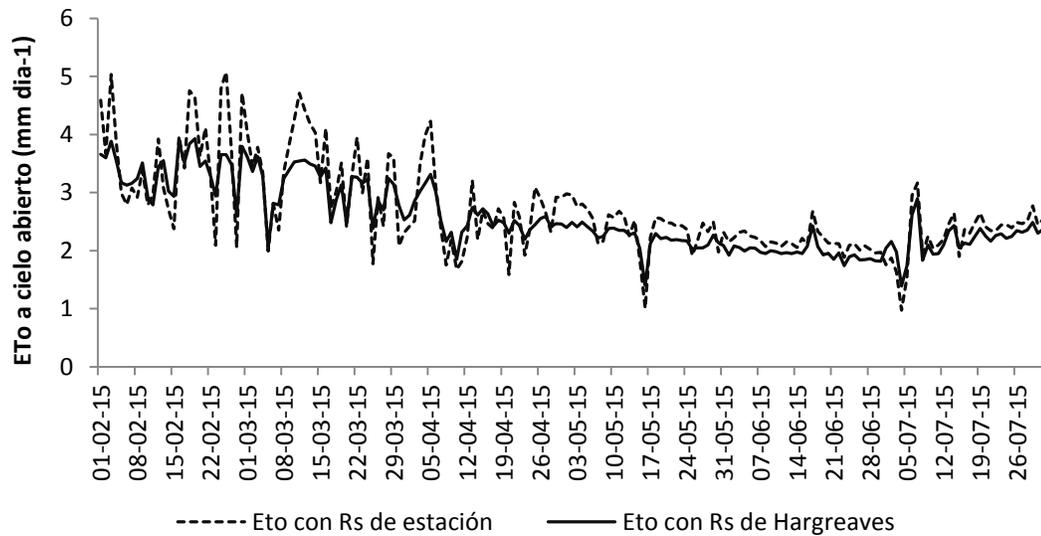


Figura 19. Comportamiento de ETo calculada con la radiación solar medida con la estación meteorológica y la ETo calculada con la radiación solar estimada con la ecuación de Hargreaves a cielo abierto.

La ETo al igual que la radiación solar calculada con la ecuación de Hargreaves y Samani muestra que los valores calculados con la radiación solar estimada no produce errores significativos en el valor medio en comparación a la ETo calculada con valores medidos de radiación solar a cielo abierto.

Al realizar un análisis de correlación entre la ETo estimada con radiación solar medida a cielo abierto y la ETo calculada con la radiación solar estimada con la ecuación de Hargreaves y Samanai, estas presentan un coeficiente de correlación “r” de 0,91, lo que indica que existe una fuerte relación lineal entre ambos valores (Figura 20).

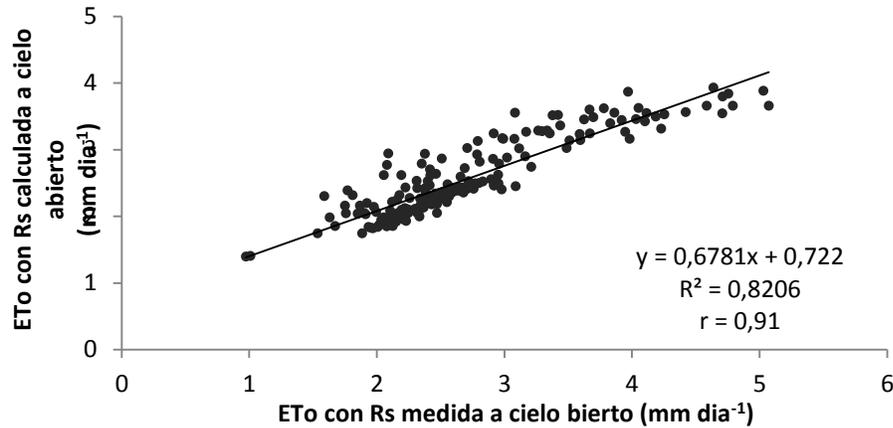


Figura 20. Correlación y regresión lineal entre la ETo calculada con la radiación solar medida y la ETo calculada con la radiación solar estimada con la ecuación de Hargreaves y Samani a cielo abierto.

El comportamiento de ETo en condiciones de invernadero es análogo al comportamiento de la radiación solar estimada al interior del invernadero (Figura 21).

La evapotranspiración de referencia en invernadero calculada con la ecuación de FAO Penman-Monteith tomando en cuenta el valor estimado de radiación solar con la ecuación de Hargreaves y Samani sobrestima en 64% a la evapotranspiración de referencia calculada con la ecuación de FAO Penman-Monteith con el valor de radiación solar medida al interior del invernadero. Samani, (2000) señala que cuando la diferencia de temperatura es significativa, la ecuación de radiación solar de Hargreaves y Samani, (1982) se vuelve insensible y podría significativamente sobrestimar tanto la radiación solar y la ETo, lo que ocurre claramente en condiciones de invernadero.

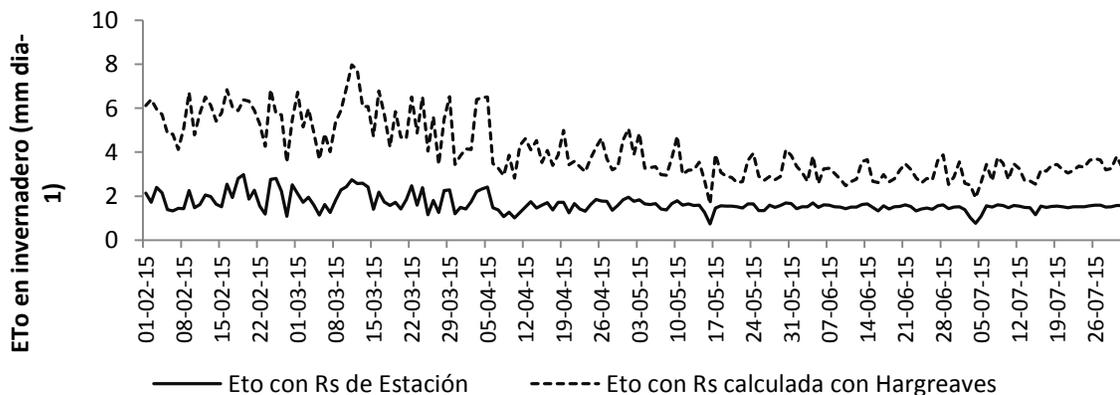


Figura 21. Comportamiento de ETo en invernadero con variables de radiación solar medida y la radiación solar estimada con la ecuación de Hargreaves.

Fernandez, *et al.*, (2010) señalan que los valores de ETo medidos en un invernadero de plástico de Cajamar en la Estación de Investigación de la Fundación en el sur de España, fueron sobreestimados en 66% en promedio por el método de Hargreaves donde la ecuación original parte de la fórmula de Hargreaves y Samani (1985).

#### 4.6 Correcciones sugeridas para el cálculo de la ETo en invernadero

El comportamiento de la evapotranspiración de referencia (ETo) horaria a cielo abierto para un día despejado y un día nublado está relacionado con el comportamiento de la radiación horaria los días correspondientes.

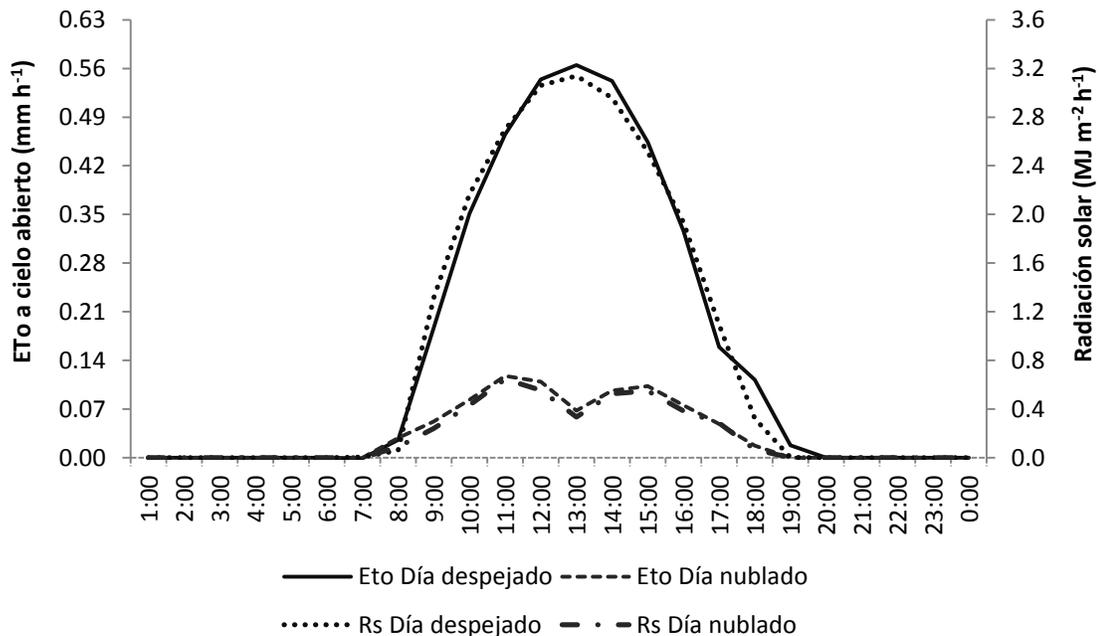


Figura 22. Comportamiento horario de la ETo y la radiación solar a cielo abierto para días despejado y nublado.

La figura 22, muestra que la radiación es mayor en un día despejado por lo tanto la ETo también es superior con relación a la ETo en un día nublado donde la radiación solar recibida es baja y por consecuencia la ETo también es menor. De esta manera la evapotranspiración de referencia presenta un comportamiento similar al comportamiento de la radiación solar, debido a que, si la radiación solar disminuye también lo hará la ETo.

A cielo abierto para un día despejado en un periodo de 24 horas la ETo presenta su valor máximo en horarios cuando la radiación solar es máxima (12:00 a 13:00) con una relación aproximada de 3,1 y 3,1 ( $\text{MJ m}^{-2} \text{h}^{-1}$ ) de radiación solar y la ETo presenta los valores de 0,54 a 0,56 ( $\text{mm h}^{-1}$ ) respectivamente.

Para condiciones de invernadero el comportamiento de la evapotranspiración de referencia también se ve fuertemente relacionado con el comportamiento de la radiación solar recibida en el interior del invernadero en un día despejado y nublado.

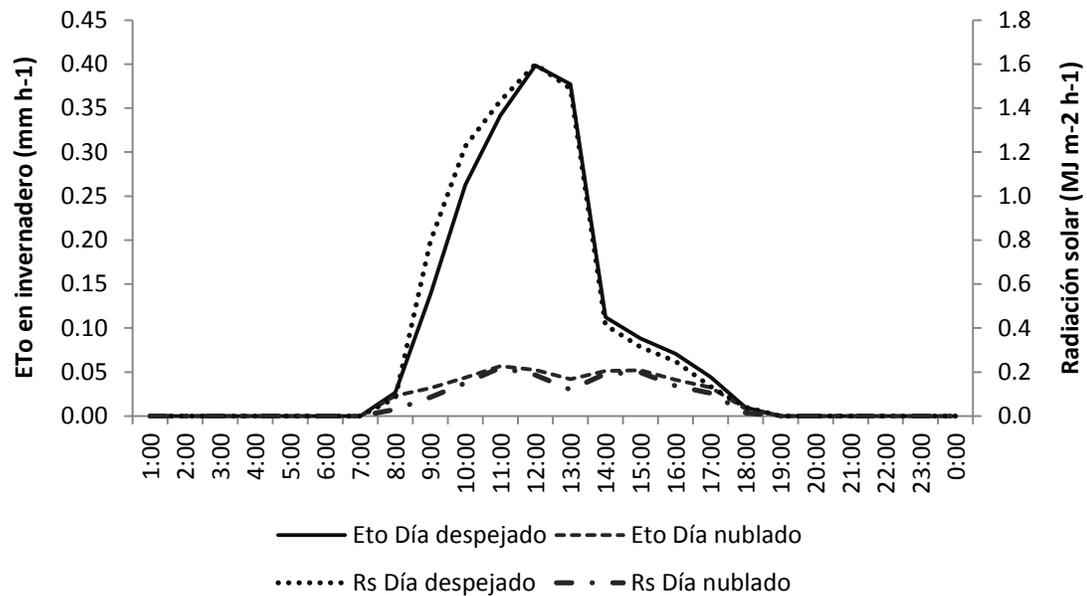


Figura 23. Comportamiento horario de la ETo y radiación solar al interior del invernadero en un día despejado y otro nublado.

En un día despejado la radiación solar al interior del invernadero es más baja con respecto a la radiación solar medida al exterior del invernadero, por lo tanto la ETo en condiciones de invernadero también disminuye en relación al ambiente externo, asimismo en condiciones de ambientes atemperados el comportamiento de la ETo está en función principalmente de la radiación solar. En caso de día nublado la radiación solar en invernadero es baja y por lo tanto la ETo también muestra valores bajos que oscilan entre 0,02 a 0,06  $\text{mm h}^{-1}$ .

Fernández *et al.*, (2010) indican que la radiación solar parecía ser la variable meteorológica para determinar la mayor parte de la ETo en invernadero. Evaluaciones similares fueron hechas por De Villele (1974) y Moller y Assouline (2007). Sin embargo, la relación entre los valores de ETo y radiación solar dentro de un invernadero Mediterráneo van cambiando a lo largo del año y estos cambios estaban relacionados con la temperatura del aire. Esto podría estar relacionado con la relación entre la radiación solar y la radiación neta, que varía con la temperatura del invernadero.

El método FAO Penman-Monteith es mundialmente aceptado como patrón para la determinación de la evapotranspiración de referencia (ETo). Desafortunadamente la mayoría de las estaciones meteorológicas no cuentan con registros de algunas variables necesarias como la radiación solar, velocidad del viento y humedad relativa que condicionan su cálculo por este método (Maffei, 2012).

Maffei, (2012) indica que el estudio realizado en el estado de Trujillo presentó un modelo de regresión lineal propuesto involucrando la radiación solar medida, predijo mejor la ETo diaria (RSME = 0,36 mm día<sup>-1</sup>; RE = 12,22%; d = 0,94; E = 0,80) lo que afirma, la alta dependencia de la ETo en los datos de radiación solar.

En vista de que las estaciones meteorológicas no cuentan con datos necesarios como la radiación solar para el cálculo de la evapotranspiración de referencia (ETo) con la ecuación FAO Penman-Monteith en condiciones de invernadero es necesario sugerir una corrección para el cálculo de la ETo para el interior de invernadero.

Como se demostró en párrafos anteriores, la relación entre la ETo a cielo abierto y aquella en invernadero no presenta una buena correlación, mientras que la radiación solar dentro y fuera del invernadero, se aproximan muy adecuadamente. También se demostró que la aproximación de la radiación solar a cielo abierto, presenta valores muy adecuados cuando se la realiza por la ecuación de Hargreaves. Por ello, la corrección para el cálculo de la ecuación de FAO Penman-Monteith para condiciones de invernadero se propone tomando en cuenta la estimación de la radiación solar a cielo abierto con la ecuación de Hargreaves utilizando datos de Tmax y Tmin a cielo

abierto, para luego con estos valores estimar la radiación solar dentro del invernadero y aplicarla a la ecuación de FAO Penman-Monteith.

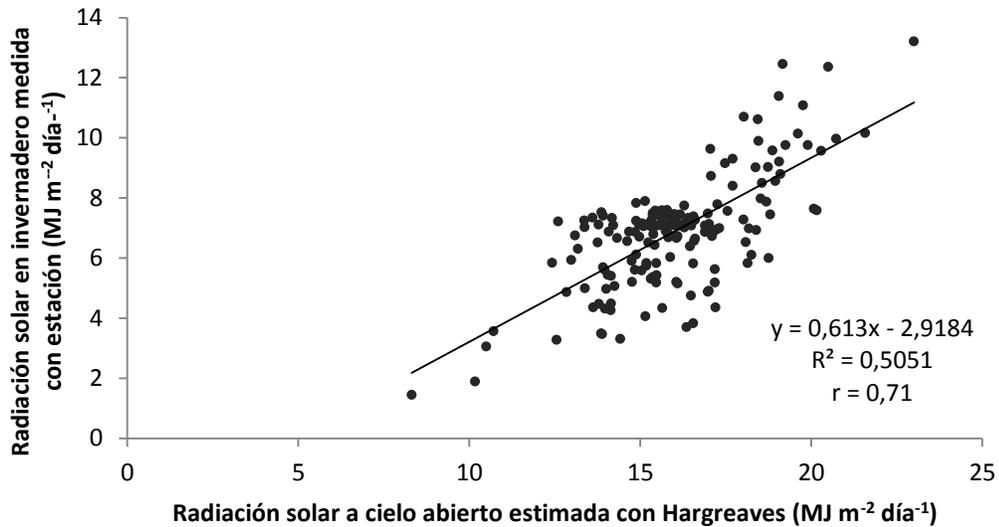


Figura 24. Relación lineal de la radiación solar a cielo abierto estimada con la ecuación de Hargreaves y la radiación solar medida con la estación meteorológica al interior del invernadero.

La figura muestra que existe una relación lineal entre la radiación solar estimada con la ecuación de Hargreaves y la radiación solar medida en invernadero, por lo tanto se aplica la ecuación lineal para ajustar la radiación solar calculada con Hargreaves a cielo abierto a la radiación solar medida al interior del invernadero, la cual está dada por:

$$R_s(\text{ajustada inv.}) = 0,613 * R_s(\text{est. afuera HG}) - 2,9184$$

Donde,  $R_s$  (ajustada inv) es la radiación solar ajustada en el interior del invernadero,  $R_s$  (estimada afuera HG) representa al valor de la radiación solar estimada con la ecuación de Hargreaves en condiciones de cielo abierto.

El comportamiento de ETo ajustando los valores de la radiación solar a cielo abierto para el interior del invernadero se presenta en la siguiente figura:

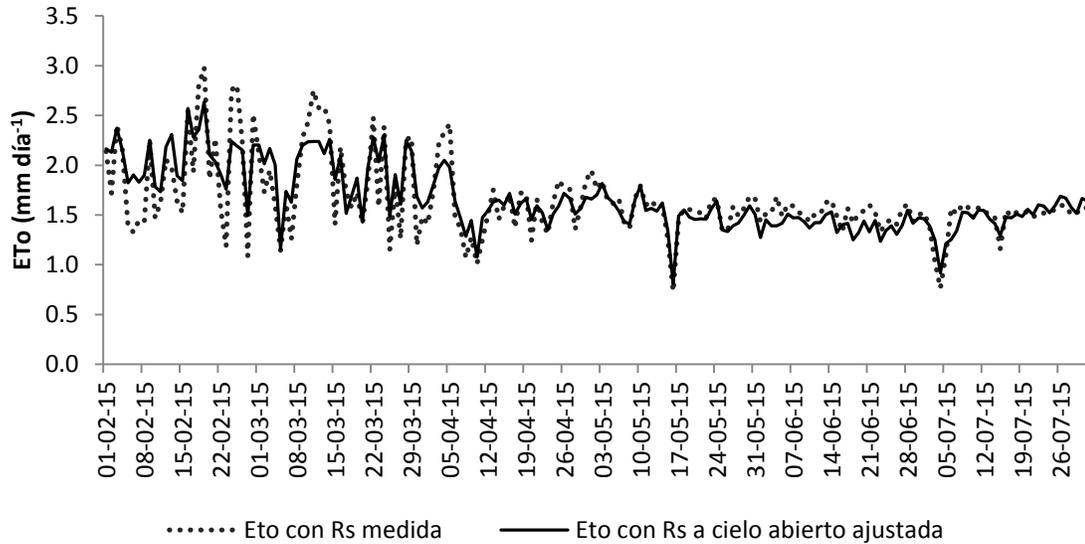


Figura 25. ETo para condiciones de invernadero ajustada con la radiación solar estimado a cielo abierto con la ecuación de Hargreaves.

La ETo calculada con la radiación solar a cielo abierto ajustada para condiciones de invernadero presenta un comportamiento similar a la ETo calculada en función a la radiación solar medida al interior del invernadero, por lo tanto, la ecuación mencionada en el anterior párrafo puede ser aplicada para ambientes atemperados en zonas que no se cuente con datos de radiación solar dentro de invernadero ni a cielo abierto, lo cual es el caso más común en Bolivia, pues la radiación solar es un dato que pocas veces las estaciones meteorológicas presentan.

La evapotranspiración de referencia calculada al interior del invernadero con la ecuación de FAO Penman-Monteith con valores de radiación solar medida en invernadero y con valores de radiación solar del ambiente exterior ajustada para condiciones de invernadero presenta un coeficiente de correlación de “r” de 0,85, lo que indica que existe una relación lineal para la evapotranspiración de referencia calculada con valores de radiación medidos y ajustados.

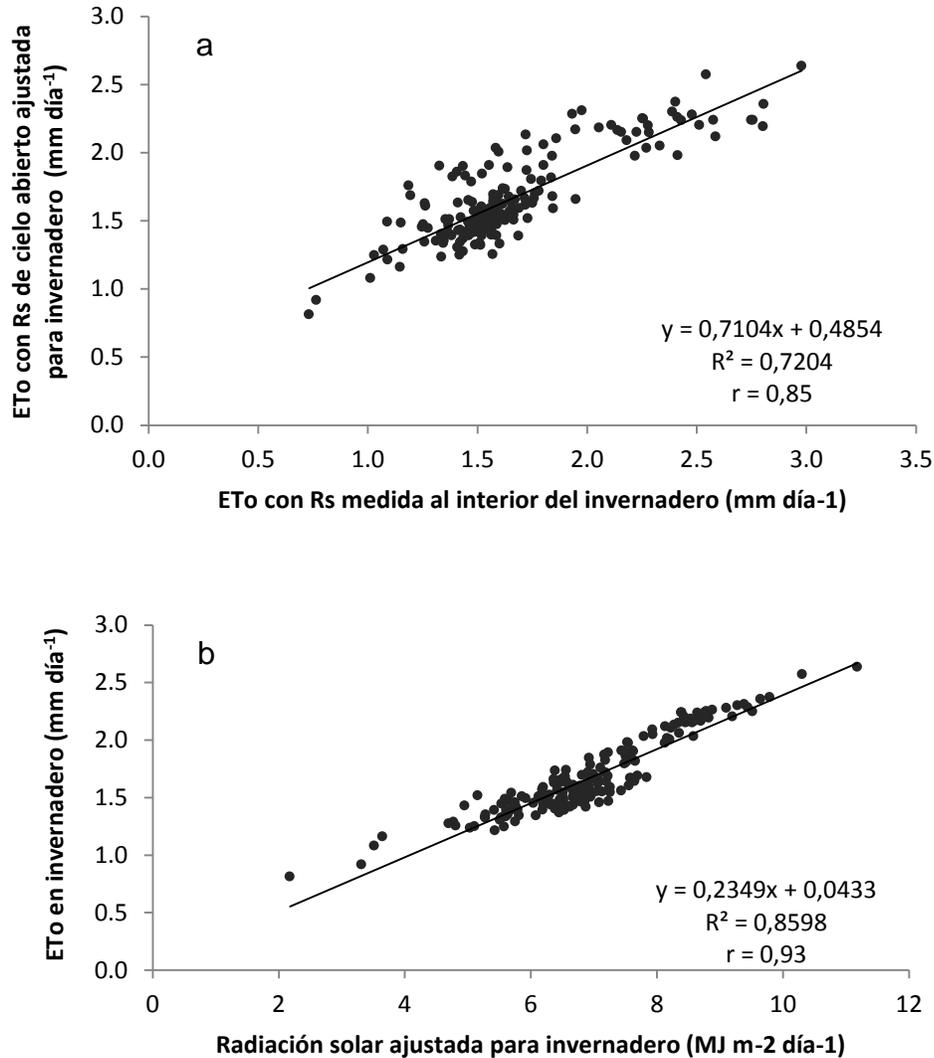


Figura 26. Regresión lineal de la ETo calculada con la radiación solar medida al interior del invernadero (a) y la ETo con radiación solar ajustada para condiciones de invernadero (b).

La aplicación de la ecuación lineal de ajuste de radiación solar estimada con la ecuación de Hargreaves a cielo abierto y posteriormente ajustada para condiciones de invernadero para el cálculo de la ETo en invernadero con la Ecuación FAO Penman-Monteith presenta una coeficiente de correlación de 0,93, los que indica que existe una relación lineal manifestando que a medida que la radiación solar se incrementa la ETo también se aumenta. El coeficiente de determinación nos muestra que el 86% del comportamiento de ETo en invernadero depende del comportamiento de la radiación solar al interior del invernadero.

## 5. CONCLUSIONES

Los parámetros climáticos de radiación solar, velocidad del viento y déficit de presión de vapor en el invernadero fueron en promedio más bajos que en las condiciones externas, mientras que la temperatura presentan valores superiores en relación a cielo abierto lo que demuestra que existe una fuerte ganancia energética ocurrida gracias al ambiente atemperado, fundamentalmente debida a la retención energética y a la poca pérdida de radiación terrestre.

La evapotranspiración de referencia (ET<sub>o</sub>) al interior del invernadero está influenciada en gran proporción por la energía radiativa y muy levemente por la energía aerodinámica. Por consiguiente la radiación neta y la ET<sub>o</sub> presentan un coeficiente de correlación de 0,99, lo que indica claramente que existe una relación lineal directa entre ambas variables, el 99% de la evapotranspiración de referencia en invernadero depende del comportamiento de la radiación neta, por cada unidad de radiación neta que incrementa en el interior del invernadero se espera que la ET<sub>o</sub> se incremente en 0,3 mm día<sup>-1</sup>.

El cálculo de la ET<sub>o</sub> con un valor de velocidad de viento (0,01 m s<sup>-1</sup>) en el interior de invernadero presenta un incremento estimativo de 0,0143 mm día<sup>-1</sup>, un valor de velocidad de viento de (0,1 m s<sup>-1</sup>) presenta una diferencia en el cálculo de ET<sub>o</sub> incrementando 0,142 mm día<sup>-1</sup> en invernadero, por lo tanto en caso de invernadero muy ventilados es necesario contar con datos más precisos de velocidad del viento dentro del invernadero. Sin embargo, el diseño de invernadero con velocidades internas de viento muy elevadas no es recomendable pues se eliminaría la ventaja comparativa del ahorro de agua demostrada en este estudio.

La radiación solar diaria recibida al interior del invernadero de estudio fue en promedio 60,7% más baja que la recibida en el ambiente externo del invernadero, en consecuencia, la ET<sub>o</sub> dentro del entorno protegido es menor en promedio 61,6% a la ET<sub>o</sub> a cielo abierto, esto puede explicarse por la influencia de los principales factores de la demanda evaporativa de la atmosfera, tales como los valores de velocidad del viento

inferiores, mayor humedad relativa y menor incidencia de la radiación solar directa en el interior de invernaderos.

La ecuación lineal puede aplicarse para ajustar la radiación solar calculada con Hargreaves a cielo abierto a la radiación solar para condiciones de invernadero, ecuación lineal está dada por:

$$R_s (\text{ajustada inv.}) = 0,613 * R_s (\text{est. afuera HG}) - 2,9184$$

La ETo en invernadero calculada con la ecuación FAO Penman-Monteith en función a la radiación solar ajustada con la ecuación lineal mencionada anteriormente muestra un coeficiente de correlación de 0,93, indicando que la radiación solar ajustada para condiciones de invernadero presenta resultados similares a los calculados con la ecuación FAO Penman-Monteith en base a los datos reales que se midieron al interior del invernadero.

## 6. RECOMENDACIONES

Se recomienda realizar estudios similares con la finalidad de apoyar los datos obtenidos con el presente trabajo de investigación.

Se recomienda contar con estaciones meteorológicas para detallar con datos meteorológicos precisos (temperatura del aire, humedad del aire, radiación solar y velocidad del viento) para una adecuada aplicación de la ecuación FAO Penman-Monteith.

Se recomienda contar con datos de evapotranspiración de referencia dentro del invernadero para realizar programaciones de riego y de esta manera apoyar el uso eficiente de agua, ya que su productividad elevada.

## 7. BIBLIOGRAFÍA

- ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; RAES, D.; SMITH, M. 2006. Evapotranspiración del cultivo. Riego y Drenaje, FAO-56. Roma. 298 p.
- BARRIENTOS, H. 2011. Determinación de la intensidad lumínica en plásticos de cubierta (agrofilm) para ambientes atemperados en tres localidades del Departamento de La Paz. Tesis Ing.Agronomo. La Paz-Bolivia. UMSA-Facultad de Agronomía. 114 p.
- BARRIENTOS, H. 2015. Análisis de crecimiento funcional, acumulación de biomasa y translocación de materia seca de ocho hortalizas cultivadas en invernadero. Tesis M Sc. En Producción Vegetal. La Paz-Bolivia. UMSA-Facultad de Agronomía. 140 p.
- BOCHETTI M. 2010. Análisis comparativo de la evapotranspiración obtenida mediante distintas ecuaciones empíricas aplicadas a la zona agrícola de Chillan. Informe de proyecto de título para optar al título de Ingeniero Civil. Universidad Católica de la Santísima Concepción-Facultad de Ingeniería. Concepción. 68 p.
- CASANOVA, M.; MESSING, I.; JOEL, A.; CAÑETE, A. 2009. Methods to estimate lettuce evapotranspiration in greenhouse conditions in the Central Zone of Chile. Chilean Journal of Agricultural Research 69 (1): 60-70.
- CÓRDOVA M. 2013. Análisis del comportamiento de la evapotranspiración de referencia (ET<sub>o</sub>) en un ecosistema de Páramo mediante la ecuación combinada de Penman-Monteith. Facultad de Ingeniería-Universidad de Cuenca. Cuenca-Ecuador. 54 p.
- DE ANDRADE, A.; DANACENO, L.; DIAS, N.; GHEYI, H.; GUISELINI, C. 2011. Climate variations in greenhouse cultivated with gerbera and relationship with external conditions. Eng. Agric., Jaboticabal, 31 (5): 857-867 p.
- ESMERAL Y. 2011. Análisis de la evapotranspiración real en el cultivo de rosa, Trabajo de grado para optar al título de Magister en ingeniería Agrícola, Universidad Nacional de Colombia-Facultad de ingeniería, Bogotá, 94 p.

- FAZLIL, W. 2009. Evapotranspiration Models in Greenhouse. Master thesis Irrigation and Water Engineering submitted in partial fulfillment of the Master of Science degree Agricultural and Bioresearch Engineering at Wageningen University, the Netherlands. 52 p.
- FERNANDES, C.; CORA, J.E.; CAMPOS, J.A. 2003. Reference Evapotranspiration Estimation Inside Greenhouses. *Scientia Agricola*. 60 (3): 591-594.
- FERNÁNDEZ, M.D.; ORGAZ, F.; LÓPEZ, J.C.; CÉSPEDES, A.; PEREZ, J.; BONACHELA, S.; GALLARDO M. 2001. Programación del riego de cultivos hortícolas bajo invernadero en el sudeste español. Editorial (Caja Rural de Almería y Málaga). 71 p.
- FERNÁNDEZ, M.D.; BONACHELA, S.; ORGAZ, F.; THOMPSON, R.; LOPEZ, J.C.; GRANADOS, M.R.; GALLARDO, M.; FERERES, E. 2010. Measurement and estimation of plastic greenhouse reference evapotranspiration in a Mediterranean climate. *Irrig Sci* DOI 10.1007/s00271-010-0210-z. 28: 497-509.
- FLORES, R.; SANCHEZ, F.; RODRIGUEZ J.E.; MORA, R.; COLINAS, M.T.; LOZOYA, H. 2009. Influencia de la radiación solar en la producción de semilla-tuberculo de papa bajo cultivo sin suelo. *Revista Chapingo Serie Horticultura* 15 (1): 25-30.
- HERNÁNDEZ, J.; ESCOBAR, I.; CASTILLA, N. 2001, La radiación solar en invernadero mediterráneos. Ediciones de Horticultura. Granada-España. 9 p.  
<http://www.horticom.com/pd/imagenes/51/075/51075.pdf>
- LINARES, R. Proyecto de explotación agrícola en Berja
- LORENZO, P. 2012. El cultivo en invernadero y su relación con el clima. Cuaderno de estudios agroalimentarios (CEA). ISSN 2173-7568. 23 – 44 p.
- LOPEZ, J; DEBBETT, M. 2005. Comparación de dos métodos para estimar la evapotranspiración de referencia (ET<sub>o</sub>) en una zona semiárida de Venezuela. *Bioagro* 17 (1): 41-46.

- MACIAS, R. 2009. Estimación de la evapotranspiración de cultivo y requerimientos hídricos del tomate (*Solanum lycopersicum* Mill.cv. El Cid) en invernadero. Tesis Maestro en Ciencias. Jiquilpan-Michoacan. Departamento de Recursos Naturales-Instituto Politécnico Nacional. 66 p.
- MAFFEI, M. 2012. Desempeño de la ecuación de Hargreaves en la estimación de la evapotranspiración de referencia en una zona de páramo en Trujillo, Venezuela. Revista Fac. Agron. (LUZ). 29: 378-394.
- MAMANI, R.S. 2007. Partición de biomasa y evapotranspiración del cultivo de quinua (*Chenopodium quinoa* Willd.) sometida a estrés hídrico en diferentes etapas de crecimiento, Tesis Ing. Agrónomo. La Paz-Bolivia. UMSA-Facultad de Agronomía. 107 p.
- MARTINEZ, A. (s.f.) XXXIV Jornadas de Aida: Producción Sostenible en el Medio Agrario. ITEA Vegetal extra nº 23, Evaluación de métodos de cálculo de la evapotranspiración de referencia diaria y mensual en Aragón. Zaragoza.
- MOLINA, M. 2009. Estandarización de las ecuaciones para estimar la evapotranspiración del cultivo de referencia. Centro de Investigación de la Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Chiapas, Tuxtla Gutierrez, Chiapas. RIIT 10 (2): 125-135.
- PACHECO, *et al.*, 2014, Microlysimetric quantification of wáter consumption in poinsettia (*Euphorbia pulcherrima* Willd). Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas 5 (8): 1481-1493.
- PEREIRA, *et al.*, 2010, El Riego y sus Tecnologías, Centro Regional de Estudios del Agua Universidad de Castilla-La Mancha-España. 296 p.
- ROJAS, M. 2009. Determinación del momento de riego mediante la temperatura de la cobertura foliar en el cultivo de jitomate bajo condiciones de invernadero. Tesis para obtener el grado de Doctor en Ciencias. Instituto de Enseñanza e Investigación en Ciencias Agrícolas-Postgrado de Hidrociencias. Montecillo, Texcoco, Estado de Mexico. 169 p.

- SAMANI, Z. 2000. Estimating Solar Radiation and Evapotranspiration Using Minimum Climatological Data. *Journal of Irrigation Drainage Engineering*, 126(4): 265–267.
- SÁNCHEZ, M; CARVACHO, L. 2011. Comparación de ecuaciones empíricas para el cálculo de la evapotranspiración de referencia en la Región del Libertador General Bernardo O`Higgins, Chile. *Revista de Geografía Norte Grande*, 50: 171-186.
- SOUZA, *et al.*, 2014, Comparison of methods for estimating reference evapotranspiration in two locations of espirito santo. *Revista Brasileira de Agricultura Irrigada* 8 (2): 114-126.
- TORRES, A; VÁSQUEZ, R. 2013. Prospección de la estimación de la evapotranspiración de referencia bajo condiciones del valle de Chaca, Arica-Chile. *IDESIA* 31(2): 25-29.
- TREZZA, R. 2008. Estimación de evapotranspiración de referencia a nivel mensual en Venezuela. ¿Cuál método utilizar?. *Bioagro* 20 (2): 89-95.
- VALERA, C. 2013. Programación y manejo del riego localizado, en el cultivo de pimentón (*Capsicum annum L.*), mediante tres métodos de estimación de la evapotranspiración en condiciones de invernadero, Santa Rosa, Mérida, Venezuela. Tesis M. Sc. Desarrollo de los recursos aguas y tierras mención Ingeniería de Riego y Drenaje. Universidad de Los Andes-Venezuela. 172 p.
- VILLAMAN, *et al.*, 2001, Comparación de métodos micro-meteorológicos para estimar evapotranspiración, en el área de Montecillo, Mexico. *TERRA* 19 (3): 281-291.

# ANEXOS

## Anexo 1. Datos meteorológicos de invernadero

<b>FECHA</b>	<b>Tmax</b>	<b>Tmin</b>	<b>T promedio</b>	<b>HR max</b>	<b>HR min</b>	<b>Presion prom</b>	<b>Rad Solar prom</b>	<b>Vel. viento</b>
	° C	° C	° C	%	%	kPa	MJ/m2/dia	m/s
01/02/2015	18,4	7	12,7	96	40	66,50	26,72	1,4
02/02/2015	18,8	8,2	13,5	91	33	66,50	18,82	1,1
03/02/2015	20,5	6,8	13,7	96	39	66,50	29,88	1,1
04/02/2015	20,5	9,5	15,0	88	38	66,50	20,87	0,6
05/02/2015	18,4	9,7	14,1	95	43	66,50	15,12	0,6
06/02/2015	17,2	7,7	12,5	96	55	66,50	14,69	0,6
07/02/2015	16,8	7,3	12,1	95	50	66,50	16,53	0,9
08/02/2015	17,9	8,6	13,3	96	45	66,50	14,46	0,9
09/02/2015	20,6	8,8	14,7	95	46	66,50	18,14	0,3
10/02/2015	16	7,6	11,8	96	58	66,50	15,00	0,8
11/02/2015	16,1	8,6	12,4	97	67	66,50	16,47	0,6
12/02/2015	18,8	7,4	13,1	96	45	66,50	22,41	0,8
13/02/2015	20,8	7,6	14,2	97	43	66,50	16,75	0,1
14/02/2015	17,9	8,9	13,4	97	58	66,50	14,35	0,1
15/02/2015	17,4	8,9	13,2	97	62	66,50	12,19	0,0
16/02/2015	22,8	7,4	15,1	97	39	66,50	22,34	0,3
17/02/2015	19,9	6,4	13,2	97	56	66,50	19,48	0,2
18/02/2015	21,8	7,8	14,8	97	24	66,50	27,72	0,7
19/02/2015	23,6	5,9	14,8	83	14	66,50	28,74	0,3
20/02/2015	19,4	8,3	13,9	96	42	66,50	19,55	0,9
21/02/2015	18,8	8,5	13,7	94	32	66,50	22,26	1,4
22/02/2015	18,5	8,5	13,5	93	43	66,50	17,04	0,9
23/02/2015	17,4	8,3	12,9	95	60	66,50	10,28	0,1
24/02/2015	19,8	7,4	13,6	97	35	66,50	28,41	1,2
25/02/2015	20,5	7,9	14,2	96	38	66,50	30,50	1,0
26/02/2015	20,4	8,3	14,4	93	45	66,50	20,38	0,7
27/02/2015	14,9	7,7	11,3	96	57	66,50	10,05	0,5
28/02/2015	20,6	7	13,8	89	34	66,50	27,45	1,2
01/03/2015	20,8	8,8	14,8	94	33	66,50	21,97	1,0
02/03/2015	19,6	8,1	13,9	96	44	66,50	18,67	0,8
03/03/2015	21,6	9,1	15,4	93	36	66,50	20,06	0,8
04/03/2015	18,3	6,6	12,5	94	45	66,50	18,59	0,8
05/03/2015	13,1	9	11,1	96	70	66,50	10,22	0,5
06/03/2015	17	8,4	12,7	98	61	66,50	15,40	0,6
07/03/2015	17,2	8,9	13,1	98	62	66,50	11,87	0,6
08/03/2015	20,5	8,2	14,4	97	47	66,50	19,22	0,1
09/03/2015	22	8,7	15,4	96	44	66,50	22,21	0,1
10/03/2015	21,1	8	14,6	95	39	66,50	24,65	0,8
11/03/2015	21,6	9	15,3	95	31	66,50	27,73	0,8
12/03/2015	21,4	8,7	15,1	93	41	66,50	25,37	1,1
13/03/2015	22	9,8	15,9	94	26	66,50	23,54	0,7
14/03/2015	22,2	8,2	15,2	96	35	66,50	23,65	0,4

15/03/2015	20,2	9,2	14,7	95	37	66,50	16,26	0,8
16/03/2015	20,4	8,4	14,4	94	36	66,50	23,32	1,0
17/03/2015	15,2	8,5	11,9	94	57	66,50	15,30	0,8
18/03/2015	17	7,2	12,1	96	49	66,50	17,08	0,8
19/03/2015	18,8	8,2	13,5	94	41	66,50	19,60	1,0
20/03/2015	15,5	9	12,3	95	57	66,50	12,44	0,9
21/03/2015	19,8	6,9	13,4	97	39	66,50	18,20	0,8
22/03/2015	21,4	6	13,7	97	36	66,50	24,97	0,1
23/03/2015	20,4	6,2	13,3	95	50	66,50	17,49	0,1
24/03/2015	20,8	4,7	12,8	96	36	66,50	22,81	0,1
25/03/2015	14,8	6,9	10,9	95	62	66,50	9,10	0,0
26/03/2015	18	6,2	12,1	97	48	66,50	17,33	0,2
27/03/2015	17,6	7,4	12,5	97	61	66,50	13,50	0,1
28/03/2015	22,1	4,8	13,5	97	27	66,50	23,85	0,1
29/03/2015	21,9	7,6	14,8	96	40	66,50	21,88	0,1
30/03/2015	19,1	7,4	13,3	95	34	66,50	11,01	0,0
31/03/2015	16,7	7,2	12,0	100	48	66,50	13,13	0,1
01/04/2015	17	6,6	11,8	97	61	66,50	13,97	0,1
02/04/2015	19,8	7,1	13,5	97	47	66,50	14,29	0,1
03/04/2015	20,8	7,9	14,4	96	34	66,50	20,94	0,4
04/04/2015	21,7	7,7	14,7	94	32	66,50	24,65	0,5
05/04/2015	21,4	8,3	14,9	94	25	66,50	25,29	1,0
06/04/2015	19,3	8,4	13,9	90	26	66,50	16,40	0,9
07/04/2015	16,9	7,9	12,4	94	45	66,50	12,94	0,5
08/04/2015	14,3	7	10,7	95	63	66,50	9,19	0,1
09/04/2015	15,1	6,2	10,7	96	64	66,50	12,64	0,3
10/04/2015	12,3	7,1	9,7	97	79	66,50	9,05	0,1
11/04/2015	15,4	6,1	10,8	97	63	66,50	9,81	0,1
12/04/2015	16,7	7,2	12,0	97	53	66,50	12,34	0,4
13/04/2015	19,3	7,9	13,6	96	41	66,50	19,38	0,6
14/04/2015	18,4	6,9	12,7	92	43	66,50	11,66	0,4
15/04/2015	18,9	6,5	12,7	94	42	66,50	15,55	0,5
16/04/2015	19,2	5,6	12,4	97	44	66,50	15,05	0,1
17/04/2015	17,6	6,6	12,1	96	53	66,50	14,43	0,0
18/04/2015	18,9	7,1	13,0	96	47	66,50	16,86	0,1
19/04/2015	18,3	6,1	12,2	97	50	66,50	16,04	0,0
20/04/2015	16,8	6,4	11,6	97	54	66,50	8,12	0,0
21/04/2015	18,8	6,1	12,5	95	54	66,50	18,20	0,1
22/04/2015	18,5	6,5	12,5	96	42	66,50	16,37	0,1
23/04/2015	16,3	6,7	11,5	97	56	66,50	11,07	0,0
24/04/2015	18,8	7,7	13,3	99	45	66,50	14,50	0,0
25/04/2015	19,3	7,2	13,3	96	50	66,50	20,33	0,1
26/04/2015	20,6	6,4	13,5	96	41	66,50	19,04	0,1
27/04/2015	20,7	5,9	13,3	95	44	66,50	16,91	0,1
28/04/2015	19	5,7	12,4	97	49	66,50	14,49	0,1
29/04/2015	20,9	7,7	14,3	94	30	66,50	19,39	0,1

30/04/2015	20,2	6,5	13,4	96	34	66,50	19,72	0,1
01/05/2015	20,6	7,3	14,0	96	40	66,50	20,25	0,01
02/05/2015	21	5,7	13,4	96	16	66,50	20,96	0,19
03/05/2015	19,9	2,3	11,1	66	13	66,50	21,38	0,17
04/05/2015	21,7	3,3	12,5	89	19	66,50	20,81	0,10
05/05/2015	21,3	5,3	13,3	95	22	66,50	19,28	0,07
06/05/2015	20,1	5,7	12,9	91	31	66,50	17,56	0,09
07/05/2015	17,9	4,3	11,1	96	40	66,50	13,95	0,06
08/05/2015	19,5	7,1	13,3	96	40	66,50	13,35	0,09
09/05/2015	21,3	5,1	13,2	92	22	66,50	18,57	0,12
10/05/2015	22,3	4,1	13,2	92	18	66,50	18,94	0,06
11/05/2015	21,2	4,9	13,1	95	26	66,50	19,37	0,10
12/05/2015	21,6	5,4	13,5	95	18	66,50	18,45	0,14
13/05/2015	20,2	4,1	12,2	94	20	66,50	15,63	0,13
14/05/2015	20,6	3,8	12,2	95	15	66,50	18,50	0,18
15/05/2015	16,7	3,3	10,0	95	29	66,50	12,24	0,10
16/05/2015	9,9	5,3	7,6	95	55	66,50	4,12	0,14
17/05/2015	19	4,4	11,7	91	28	66,50	15,86	0,07
18/05/2015	20,9	3	12,0	96	19	66,50	19,40	0,18
19/05/2015	20,1	3,1	11,6	93	21	66,50	19,73	0,13
20/05/2015	21,1	5,7	13,4	93	21	66,50	17,78	0,17
21/05/2015	21,3	3,9	12,6	95	10	66,50	19,44	0,12
22/05/2015	21	2,4	11,7	84	11	66,50	19,34	0,16
23/05/2015	20,1	2,9	11,5	93	13	66,50	18,83	0,19
24/05/2015	21,7	2,4	12,1	91	12	66,50	19,01	0,10
25/05/2015	17,8	3,9	10,9	95	45	66,50	12,80	0,11
26/05/2015	18,8	4,9	11,9	95	40	66,50	15,20	0,10
27/05/2015	19,7	5,7	12,7	97	19	66,50	18,85	0,14
28/05/2015	19,7	2,7	11,2	95	27	66,50	18,00	0,11
29/05/2015	21,5	3,3	12,4	94	10	66,50	18,70	0,32
30/05/2015	21,6	3,1	12,4	87	11	66,50	13,76	0,17
31/05/2015	20,6	4,2	12,4	94	30	66,50	17,48	0,08
01/06/2015	17,9	6,4	12,2	94	53	66,50	14,79	0,13
02/06/2015	21,8	5,8	13,8	96	23	66,50	16,27	0,08
03/06/2015	21,3	6,1	13,7	94	23	66,50	17,26	0,10
04/06/2015	20	6	13,0	93	11	66,50	17,97	0,19
05/06/2015	21,3	2,9	12,1	91	13	66,50	18,25	0,12
06/06/2015	22	3,2	12,6	85	10	66,50	18,26	0,12
07/06/2015	20,9	2,8	11,9	56	10	66,50	18,48	0,15
08/06/2015	20,4	1	10,7	75	12	66,50	17,67	0,09
09/06/2015	21,8	2,9	12,4	82	12	66,50	17,75	0,09
10/06/2015	20,9	2,8	11,9	87	11	66,50	17,34	0,12
11/06/2015	21,1	2,4	11,8	93	11	66,50	17,12	0,06
12/06/2015	20,7	2,3	11,5	90	14	66,50	17,88	0,09
13/06/2015	21	1,9	11,5	87	11	66,50	18,07	0,08
14/06/2015	21,7	2,2	12,0	85	12	66,50	16,89	0,09

15/06/2015	19,6	4,7	12,2	93	34	66,50	16,76	0,10
16/06/2015	23	4,9	14,0	98	23	66,50	15,50	0,07
17/06/2015	20,2	4,4	12,3	94	16	66,50	17,63	0,81
18/06/2015	18,2	4,7	11,5	92	41	66,50	16,14	0,55
19/06/2015	19,6	5,5	12,6	94	28	66,50	16,96	0,12
20/06/2015	20,6	2,7	11,7	96	14	66,50	17,49	0,10
21/06/2015	16,9	2,8	9,9	93	37	66,50	16,69	0,14
22/06/2015	18,9	0,9	9,9	94	32	66,50	17,03	0,10
23/06/2015	14,6	1,3	8,0	92	53	66,50	14,68	0,09
24/06/2015	19,2	2,2	10,7	92	31	66,50	17,08	0,00
25/06/2015	20,2	2,8	11,5	92	28	66,50	17,18	0,00
26/06/2015	17,6	2,7	10,2	93	40	66,50	15,73	0,00
27/06/2015	17,9	2,3	10,1	90	36	66,50	16,86	0,00
28/06/2015	21,3	2	11,7	88	9	66,50	17,92	0,00
29/06/2015	21,4	1,4	11,4	76	6	66,50	18,11	0,00
30/06/2015	20,7	1,4	11,1	77	8	66,50	18,02	0,00
01/07/2015	19,8	2,3	11,1	90	21	66,50	11,25	0,21
02/07/2015	20,9	2,4	11,7	94	13	66,50	11,44	0,31
03/07/2015	16,9	2	9,5	90	20	66,50	9,14	0,34
04/07/2015	9,1	1,1	5,1	96	66	66,50	5,11	0,02
05/07/2015	15,4	1,1	8,3	96	21	66,50	10,93	0,06
06/07/2015	15,1	2,9	9,0	64	14	66,50	18,31	1,48
07/07/2015	17,1	2,4	9,8	38	9	66,50	19,07	1,43
08/07/2015	18,3	-1,2	8,6	62	6	66,50	17,67	0,09
09/07/2015	19,9	0,2	10,1	55	7	66,50	18,59	0,29
10/07/2015	21,1	0,4	10,8	44	3	66,50	18,33	0,15
11/07/2015	21,8	1,6	11,7	66	5	66,50	18,74	0,07
12/07/2015	21,4	0,8	11,1	79	5	66,50	18,15	0,19
13/07/2015	20,6	1,7	11,2	86	7	66,50	17,77	0,47
14/07/2015	19,4	2	10,7	93	12	66,50	18,29	0,67
15/07/2015	17,4	2,7	10,1	91	21	66,50	12,29	0,30
16/07/2015	19,3	2,2	10,8	93	12	66,50	18,48	0,25
17/07/2015	19,8	1,8	10,8	86	14	66,50	18,29	0,18
18/07/2015	20,2	2,3	11,3	90	14	66,50	18,83	0,33
19/07/2015	20,4	3,4	11,9	72	8	66,50	19,22	0,50
20/07/2015	21,6	1,3	11,5	69	4	66,50	19,36	0,27
21/07/2015	20,9	2,6	11,8	88	16	66,50	18,32	0,12
22/07/2015	22,7	2,2	12,5	91	9	66,50	18,16	0,15
23/07/2015	22,1	2,9	12,5	88	21	66,50	18,43	0,14
24/07/2015	19,1	1,8	10,5	93	32	66,50	18,45	0,18
25/07/2015	21,3	3,6	12,5	91	19	66,50	17,79	0,13
26/07/2015	22,8	2,4	12,6	100	13	66,50	19,06	0,13
27/07/2015	23,1	3,3	13,2	90	10	66,50	18,91	0,12
28/07/2015	22,1	3,7	12,9	79	13	66,50	18,47	0,22
29/07/2015	20,7	4,1	12,4	63	18	66,50	19,38	0,47
30/07/2015	20,6	1,2	10,9	84	18	66,50	18,91	0,13
31/07/2015	21,8	2,4	12,1	78	12	66,50	19,27	0,18

## Anexo 2. Datos meteorológicos a cielo abierto

FECHA	Tmax ° C	Tmin ° C	T promedio ° C	HR max %	HR min %	Presion prom kPa	Rs prom MJ/m2/dia	Viento m/s
01/02/2015	18.4	7	12.7	96	40	66.50	25.38	4.5
02/02/2015	18.8	8.2	13.5	91	33	66.50	25.05	4.9
03/02/2015	20.5	6.8	13.7	96	39	66.50	28.68	3.6
04/02/2015	20.5	9.5	15.0	88	38	66.50	20.03	3.1
05/02/2015	18.4	9.7	14.1	95	43	66.50	14.52	2.2
06/02/2015	17.2	7.7	12.5	96	55	66.50	14.10	3.1
07/02/2015	16.8	7.3	12.1	95	50	66.50	15.86	4
08/02/2015	17.9	8.6	13.3	96	45	66.50	13.88	4
09/02/2015	20.6	8.8	14.7	95	46	66.50	17.41	4.5
10/02/2015	16	7.6	11.8	96	58	66.50	14.40	3.1
11/02/2015	16.1	8.6	12.4	97	67	66.50	15.81	3.1
12/02/2015	18.8	7.4	13.1	96	45	66.50	21.51	3.1
13/02/2015	20.8	7.6	14.2	97	43	66.50	16.08	1.3
14/02/2015	17.9	8.9	13.4	97	58	66.50	13.78	0.9
15/02/2015	17.4	8.9	13.2	97	62	66.50	11.71	0.9
16/02/2015	22.8	7.4	15.1	97	39	66.50	21.45	2.7
17/02/2015	19.9	6.4	13.2	97	56	66.50	18.70	2.7
18/02/2015	21.8	7.8	14.8	97	24	66.50	26.61	3.6
19/02/2015	23.6	5.9	14.8	83	14	66.50	27.59	2.7
20/02/2015	19.4	8.3	13.9	96	42	66.50	18.77	3.6
21/02/2015	18.8	8.5	13.7	94	32	66.50	21.37	4.5
22/02/2015	18.5	8.5	13.5	93	43	66.50	16.36	4
23/02/2015	17.4	8.3	12.9	95	60	66.50	9.87	0.9
24/02/2015	19.8	7.4	13.6	97	35	66.50	27.21	4
25/02/2015	20.5	7.9	14.2	96	38	66.50	29.28	3.1
26/02/2015	20.4	8.3	14.4	93	45	66.50	19.56	3.1
27/02/2015	14.9	7.7	11.3	96	57	66.50	9.64	3.1
28/02/2015	20.6	7	13.8	89	34	66.50	26.35	4.5
01/03/2015	20.8	8.8	14.8	94	33	66.50	21.29	3.1
02/03/2015	19.6	8.1	13.9	96	44	66.50	18.29	4
03/03/2015	21.6	9.1	15.4	93	36	66.50	19.65	3.6
04/03/2015	18.3	6.6	12.5	94	45	66.50	18.21	3.1
05/03/2015	13.1	9	11.1	96	70	66.50	10.01	1.8
06/03/2015	17	8.4	12.7	98	61	66.50	15.09	2.2
07/03/2015	17.2	8.9	13.1	98	62	66.50	11.63	3.6
08/03/2015	20.5	8.2	14.4	97	47	66.50	18.83	0.9
09/03/2015	22	8.7	15.4	96	44	66.50	21.75	0.9
10/03/2015	21.1	8	14.6	95	39	66.50	24.15	3.1

11/03/2015	21.6	9	15.3	95	31	66.50	27.17	3.1
12/03/2015	21.4	8.7	15.1	93	41	66.50	24.85	3.6
13/03/2015	22	9.8	15.9	94	26	66.50	23.06	2.7
14/03/2015	22.2	8.2	15.2	96	35	66.50	23.17	3.1
15/03/2015	20.2	9.2	14.7	95	37	66.50	15.92	3.1
16/03/2015	20.4	8.4	14.4	94	36	66.50	22.85	3.6
17/03/2015	15.2	8.5	11.9	94	57	66.50	14.98	3.6
18/03/2015	17	7.2	12.1	96	49	66.50	16.73	3.1
19/03/2015	18.8	8.2	13.5	94	41	66.50	19.20	3.6
20/03/2015	15.5	9	12.3	95	57	66.50	12.19	3.1
21/03/2015	19.8	6.9	13.4	97	39	66.50	17.83	3.6
22/03/2015	21.4	6	13.7	97	36	66.50	24.46	0.4
23/03/2015	20.4	6.2	13.3	95	50	66.50	17.14	0.9
24/03/2015	20.8	4.7	12.8	96	36	66.50	22.34	0.9
25/03/2015	14.8	6.9	10.9	95	62	66.50	8.91	0.4
26/03/2015	18	6.2	12.1	97	48	66.50	16.97	2.7
27/03/2015	17.6	7.4	12.5	97	61	66.50	13.22	0.9
28/03/2015	22.1	4.8	13.5	97	27	66.50	23.36	0.4
29/03/2015	21.9	7.6	14.8	96	40	66.50	21.44	0.9
30/03/2015	19.1	7.4	13.3	95	34	66.50	10.79	0.9
31/03/2015	16.7	7.2	12.0	100	48	66.50	12.86	0.9
01/04/2015	17	6.6	11.8	97	61	66.50	14.12	0.4
02/04/2015	19.8	7.1	13.5	97	47	66.50	14.59	0.9
03/04/2015	20.8	7.9	14.4	96	34	66.50	21.39	3.6
04/04/2015	21.7	7.7	14.7	94	32	66.50	25.17	3.6
05/04/2015	21.4	8.3	14.9	94	25	66.50	25.83	4
06/04/2015	19.3	8.4	13.9	90	26	66.50	16.75	4.5
07/04/2015	16.9	7.9	12.4	94	45	66.50	13.22	2.7
08/04/2015	14.3	7	10.7	95	63	66.50	9.39	2.2
09/04/2015	15.1	6.2	10.7	96	64	66.50	12.91	2.2
10/04/2015	12.3	7.1	9.7	97	79	66.50	8.76	2.2
11/04/2015	15.4	6.1	10.8	97	63	66.50	10.37	1.8
12/04/2015	16.7	7.2	12.0	97	53	66.50	12.61	3.1
13/04/2015	19.3	7.9	13.6	96	41	66.50	19.79	3.1
14/04/2015	18.4	6.9	12.7	92	43	66.50	11.91	3.1
15/04/2015	18.9	6.5	12.7	94	42	66.50	15.88	3.1
16/04/2015	19.2	5.6	12.4	97	44	66.50	15.95	0.9
17/04/2015	17.6	6.6	12.1	96	53	66.50	14.74	0.9
18/04/2015	18.9	7.1	13.0	96	47	66.50	17.22	1.3
19/04/2015	18.3	6.1	12.2	97	50	66.50	16.38	0.4
20/04/2015	16.8	6.4	11.6	97	54	66.50	8.29	0.4
21/04/2015	18.8	6.1	12.5	95	54	66.50	18.58	0.9
22/04/2015	18.5	6.5	12.5	96	42	66.50	16.72	0.9

23/04/2015	16.3	6.7	11.5	97	56	66.50	11.31	0.9
24/04/2015	18.8	7.7	13.3	99	45	66.50	14.50	0.4
25/04/2015	19.3	7.2	13.3	96	50	66.50	17.30	0.9
26/04/2015	20.6	6.4	13.5	96	41	66.50	19.45	0.4
27/04/2015	20.7	5.9	13.3	95	44	66.50	17.27	0.9
28/04/2015	19	5.7	12.4	97	49	66.50	14.80	0.4
29/04/2015	20.9	7.7	14.3	94	30	66.50	19.81	0.9
30/04/2015	20.2	6.5	13.4	96	34	66.50	20.14	0.9
01/05/2015	20.6	7.3	14.0	96	40	66.50	20.91	0.4
02/05/2015	21	5.7	13.4	96	16	66.50	21.87	0.9
03/05/2015	19.9	2.3	11.1	66	13	66.50	22.31	0.9
04/05/2015	21.7	3.3	12.5	89	19	66.50	21.72	0.4
05/05/2015	21.3	5.3	13.3	95	22	66.50	20.12	0.4
06/05/2015	20.1	5.7	12.9	91	31	66.50	18.32	0.9
07/05/2015	17.9	4.3	11.1	96	40	66.50	14.56	0.4
08/05/2015	19.5	7.1	13.3	96	40	66.50	13.93	0.9
09/05/2015	21.3	5.1	13.2	92	22	66.50	19.38	0.9
10/05/2015	22.3	4.1	13.2	92	18	66.50	19.76	0.4
11/05/2015	21.2	4.9	13.1	95	26	66.50	20.21	0.9
12/05/2015	21.6	5.4	13.5	95	18	66.50	19.25	0.9
13/05/2015	20.2	4.1	12.2	94	20	66.50	16.31	0.9
14/05/2015	20.6	3.8	12.2	95	15	66.50	19.30	1.3
15/05/2015	16.7	3.3	10.0	95	29	66.50	12.78	0.9
16/05/2015	9.9	5.3	7.6	95	55	66.50	7.83	3.6
17/05/2015	19	4.4	11.7	91	28	66.50	16.55	0.9
18/05/2015	20.9	3	12.0	96	19	66.50	20.25	1.3
19/05/2015	20.1	3.1	11.6	93	21	66.50	20.59	0.9
20/05/2015	21.1	5.7	13.4	93	21	66.50	18.55	3.6
21/05/2015	21.3	3.9	12.6	95	10	66.50	20.29	0.9
22/05/2015	21	2.4	11.7	84	11	66.50	20.18	0.9
23/05/2015	20.1	2.9	11.5	93	13	66.50	19.65	1.3
24/05/2015	21.7	2.4	12.1	91	12	66.50	19.83	0.9
25/05/2015	17.8	3.9	10.9	95	45	66.50	13.36	1.3
26/05/2015	18.8	4.9	11.9	95	40	66.50	15.86	0.4
27/05/2015	19.7	5.7	12.7	97	19	66.50	19.67	1.3
28/05/2015	19.7	2.7	11.2	95	27	66.50	18.79	0.9
29/05/2015	21.5	3.3	12.4	94	10	66.50	19.51	3.1
30/05/2015	21.6	3.1	12.4	87	11	66.50	16.18	4.5
31/05/2015	20.6	4.2	12.4	94	30	66.50	18.67	0.4

### Anexo 3. Análisis de parámetros químicos de suelo de invernadero



#### MINISTERIO DE HIDROCARBUROS Y ENERGÍA

INSTITUTO BOLIVIANO DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA NUCLEAR  
CENTRO DE INVESTIGACIONES Y APLICACIONES NUCLEARES  
UNIDAD DE ANÁLISIS Y CALIDAD AMBIENTAL

## ANÁLISIS FÍSICO QUÍMICO DE SUELOS

INTERESADO : CLARA BUTRÓN MAMANI

NO SOLICITUD: 132A / 2015

PROCEDECENCIA : Departamento LA PAZ,

FECHA DE RECEPCION : 05 / Junio / 2015

Provincia MURILLO,

FECHA DE ENTREGA : 13 / Julio / 2015

CENTRO EXPERIMENTAL COTA COTA

UMSA - FACULTAD DE AGRONOMÍA

DESCRIPCIÓN : MUESTRA DE SUELO : 1 Carga.

N° Lab.	PARAMETRO	Resultado	Unidades	Método	
510-01 /2015	C A T I O N E S	Calcio	10.43	meq/100 g	Absorción atómica
510-02 /2015		Magnesio	3.68	meq/100 g	Absorción atómica
510-03 /2015		Sodio	0.25	meq/100 g	Emisión atómica
510-04 /2015		Potasio	1.86	meq/100 g	Emisión atómica
510-05 /2015	Fósforo asimilable	85.13	ppm	Fotometría UV-Visible	
510-06 /2015	Materia Orgánica	7.10	%	Walkley Black	
510-07 /2015	Nitrógeno total	0.35	%	Kjeldahl	
510-08 /2015	Nitratos	38.01	ppm NO <sub>3</sub>	Espectrofotometría UV-Visible	
510-09 /2015	Amonio	4.58	ppm NH <sub>3</sub>	Espectrofotometría UV-Visible	
510-10 /2015	Carbonato total	0.44	% CaCO <sub>3</sub>	Volumetría	

OBSERVACIONES,- \*\* Cationes de Cambio extraídos con acetato de amonio 1N.



RESPONSABLE DE LABORATORIO  
JORGE CHANGARA S.

#### Anexo 4. Galería de fotos de proceso de investigación



Foto 1, 2. Establecimiento de la investigación



Foto 3. Instalación de estaciones meteorológicas



Foto 4. Recolección de datos meteorológicos



Foto 5, 6. Medición de la Evapotranspiración de referencia

