



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA



Determinación de la evapotranspiración de referencia diaria bajo invernadero con el empleo de métodos directos e indirectos, en el periodo agosto-octubre, Hcda. El Prado

Muñoz Jurado Diego Marcelo

Departamento de Ciencias de la Vida y de la Agricultura

Carrera de Ingeniería Agropecuaria

Trabajo de titulación, previo a la obtención del título de Ingeniero Agropecuario

Ing. Aguirre, Maria Soledad Mgs.

2 de febrero de 2022





CONTENIDO

- ✓ **Introducción**
 - Justificación
 - Objetivos
 - Marco Teórico
- ✓ **Materiales y métodos**
- ✓ **Resultados y discusión**
- ✓ **Conclusiones**
- ✓ **Recomendaciones**



Evapotranspiración del cultivo de referencia



El primer paso para la programación del riego

(García E. , 2016)

Métodos para su cálculo

Directos

- Tanque clase A
- Lisímetros

Indirectos

- Formulas empíricas

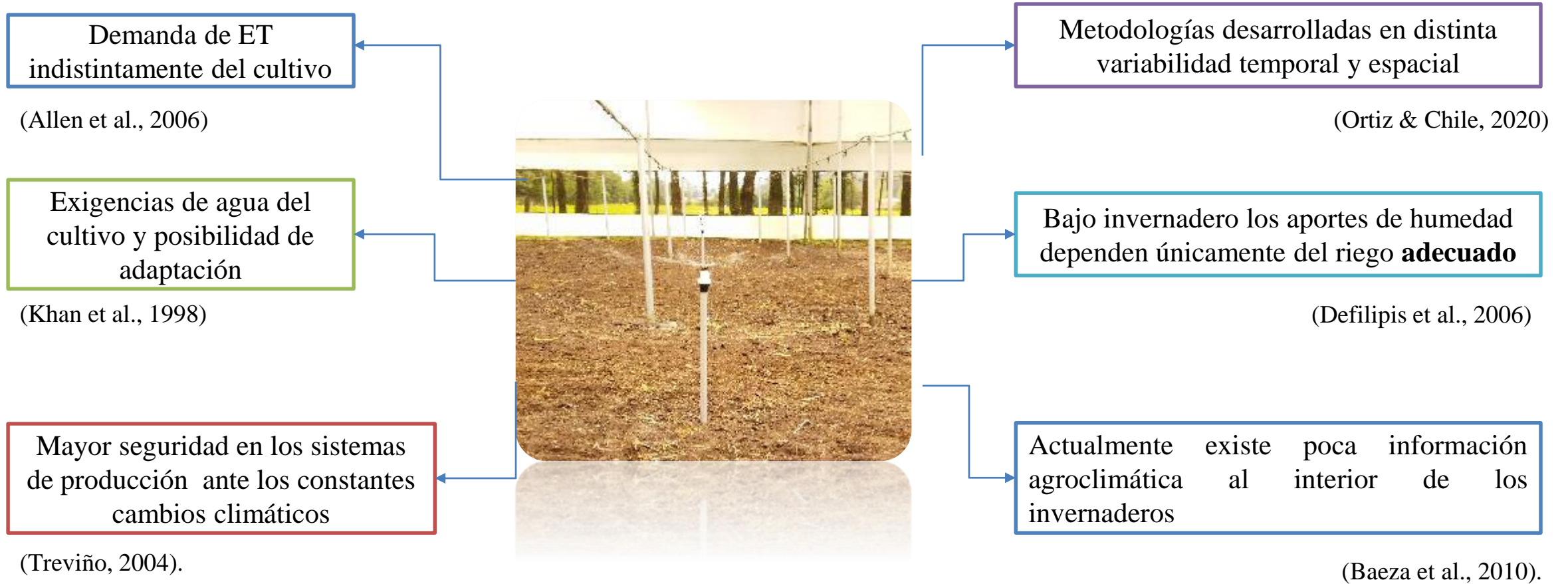


Volúmenes de agua



Elevan rendimientos

Una adecuada aplicación de riego es fundamental en la respuesta de la planta ante enfermedades y desórdenes fisiológicos (Flores et al., 2007)

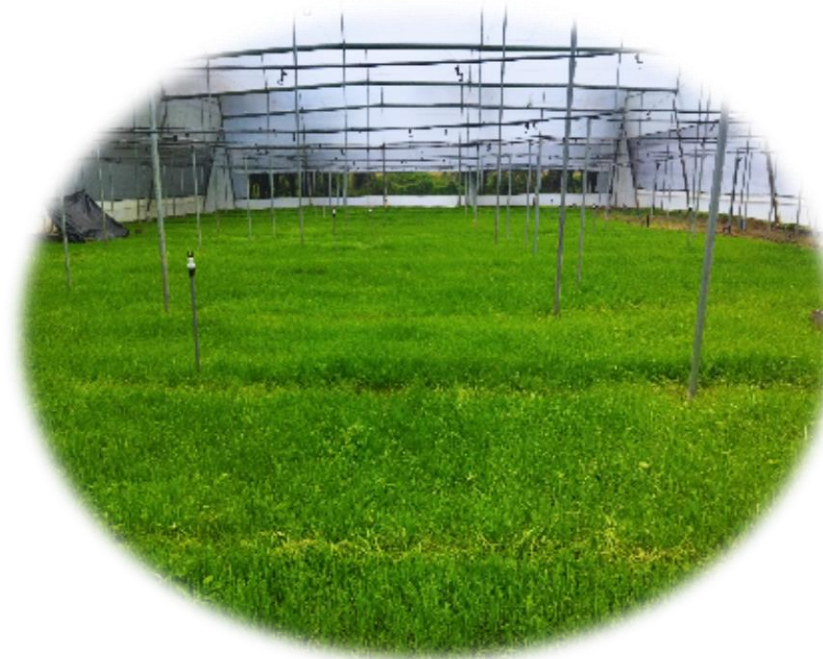


El clima variable de la Hcda. El Prado ha ocasionado daños por granizo y vientos

“tuvo como objetivo identificar una ecuación que permita determinar la ETo a campo abierto con la mayor precisión”

(Sangucho, 2018)

Este estudio fue considerado como preliminar y posterior a este no se han realizado otros estudios



Actualmente no se cuenta con estudios de ETo bajo invernadero

Tuvo como finalidad elegir el método que permita la mejor determinación de ETo bajo invernadero

ETo junto con el coeficiente de cultivo permite determinar las necesidades y programación de riegos

Dando así la apertura a futuros proyectos de investigación enfocados a un eficiente manejo del recurso agua aplicado con el riego bajo invernadero.

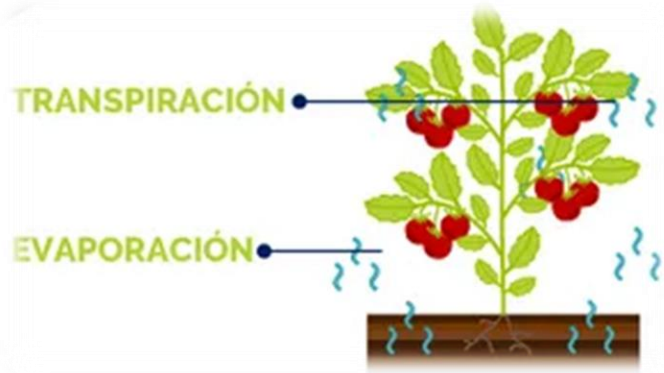


Correlacionar métodos indirectos y un método directo con el tanque evaporímetro Clase A, para estimar la evapotranspiración de referencia diaria bajo invernadero en el periodo agosto-octubre, en la Hcda. El Prado.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- ✓ Estimar la evapotranspiración de referencia (ET_o) diaria bajo invernadero, en el periodo agosto-octubre con el empleo de métodos directos e indirectos.
- ✓ Correlacionar los datos medidos y estimados en el cálculo de la ET_o diaria mediante prueba de bondad de ajuste, utilizando métodos no paramétricos.
- ✓ Encontrar la ET_o diaria que se genera bajo invernadero en el periodo agosto-octubre, en la Hcda. El Prado, aplicando el modelo que presente la mejor bondad de ajuste, respecto a los valores de ET_o medidos con el Tanque evaporímetro Clase A.

Evapotranspiración



(Allen et al., 2006).



La resistencia a la difusión del vapor

Altura de dosel del cultivo

IAF

Cobertura del suelo y humedad del suelo

Evapotranspiración del cultivo



ET bajo invernadero



(FAO 56, 1990)

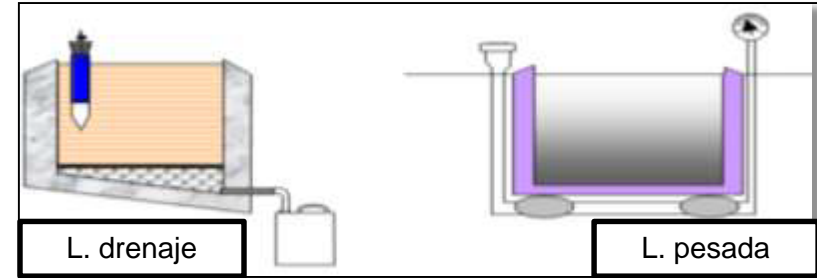
Métodos para determinar E_{To}

M Directos

Tanque evaporímetro Clase A

Efecto integrado de la radiación, viento, temperatura y humedad sobre la superficie del agua (FAO 56, 1990).

Lisímetro de drenaje
(Hernández, 2009).



Blaney Criddle (*BC*)

EEUU emplea $T_{mensual}$, R_s , F_c

Hargreaves (*HS*)

California emplea T_{max} y T_{min}

M Indirectos

Penman Monteith *PM-FAO 56*

Desarrollado con la definición del cultivo de referencia

Priestley Taylor (*PT*)

E_{To} de distintos tipos de vegetaciones, a escala regional, simplifica el uso *PM-FAO 56*

Requerimiento de riego de los cultivos bajo invernadero (Nr)



Es el consumo de agua que necesita compensar el cultivo debido a pérdidas por ET (Yanangómez, 2018).

$$Ec 1. L_n = f \times [(CC - PMP)/100] \times (Da/\delta_{agua}) \times Pr$$

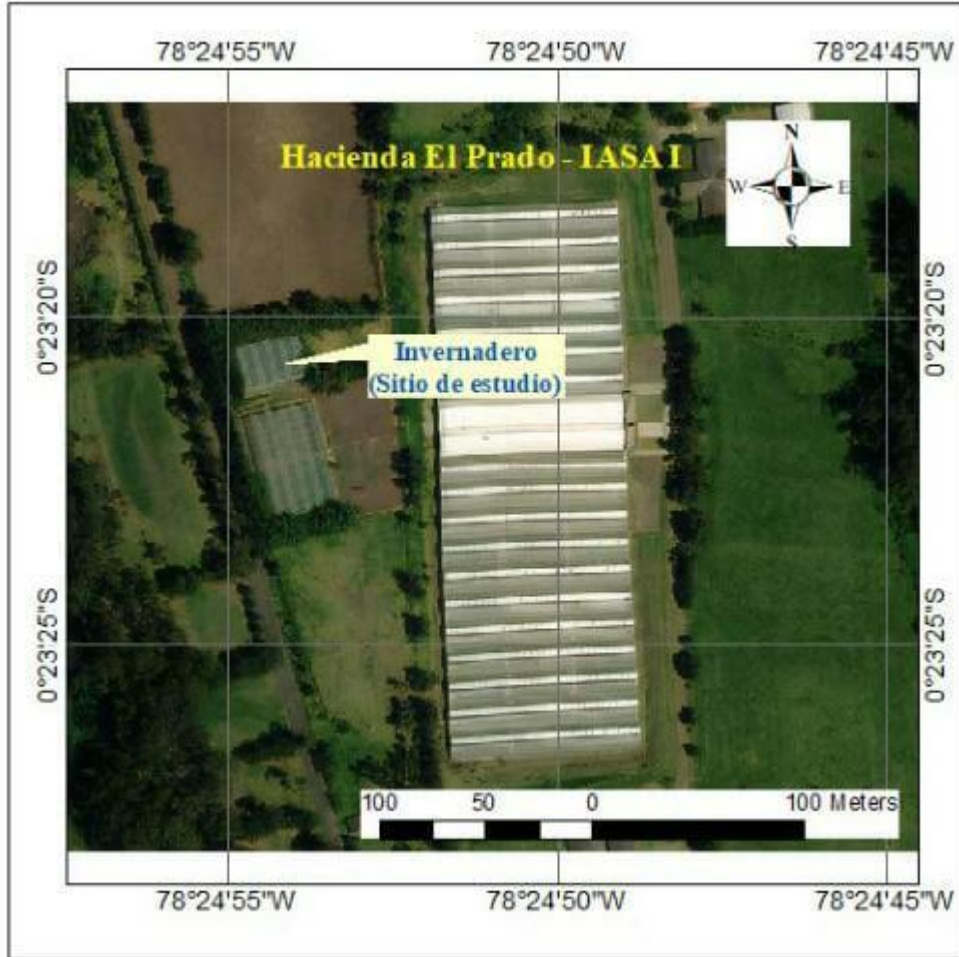
$$Ec 2. L_b = L_n / E_a$$

$$Ec 3 Fr = L_n / ET_c$$

Cultivo de ray grass

- pH= 5,8 y 6,7
- Suelos francos o franco arcillosos
- Baja tolerancia a salinidad
- Altitudes de 2000 a 3200m.s.n.m
- Densidad de siembra de 100-150 lb.Ha-1

Localización del proyecto



Hcda. El Prado IASA 1

Invernadero multitúnel de
22.40m x 35.90 m



Área bruta: $804.16m^2$
Área neta: $672m^2$

Altitud (msnm)	2748
Precipitación media anual (mm)	1332
Temperatura media anual (°C)	13,96

Establecimiento del proyecto

Preparación del terreno



Motocultor Husqvarna modelo TF 338 tipo de cultivador frente a ti

Muestra de suelo



AGROCALIDAD

Materia orgánica,
conductividad eléctrica,
textura, humedad
equivalente a capacidad
de campo, punto de
marchitez y agua
aprovechable

Determinación de la velocidad de Infiltración

Método de cilindros infiltrómetros

Donde se determinó el volumen que agua drenada por unidad de tiempo (Blanco, 1999)



Nota. A la par la infiltración fue obtenida con la ecuación de Rawls y Saxton (2006)

Determinación de la curva tensión-humedad del suelo



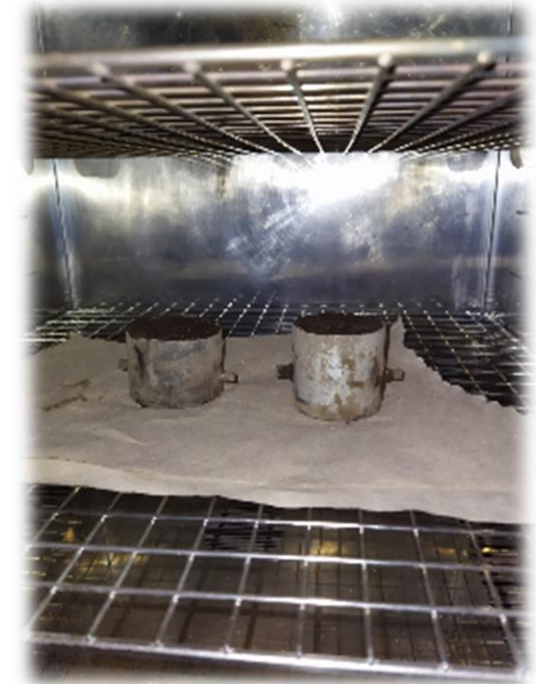
Saturación del suelo



Toma de muestra



Pesado de la muestra

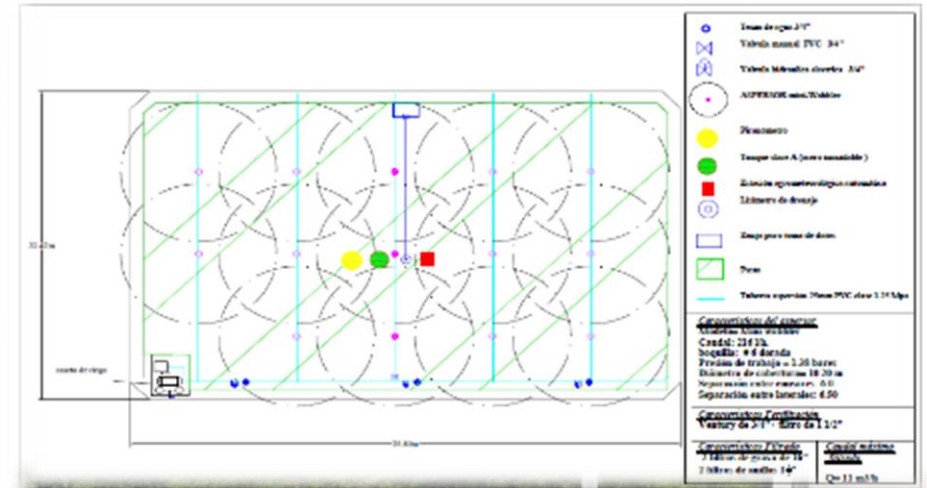
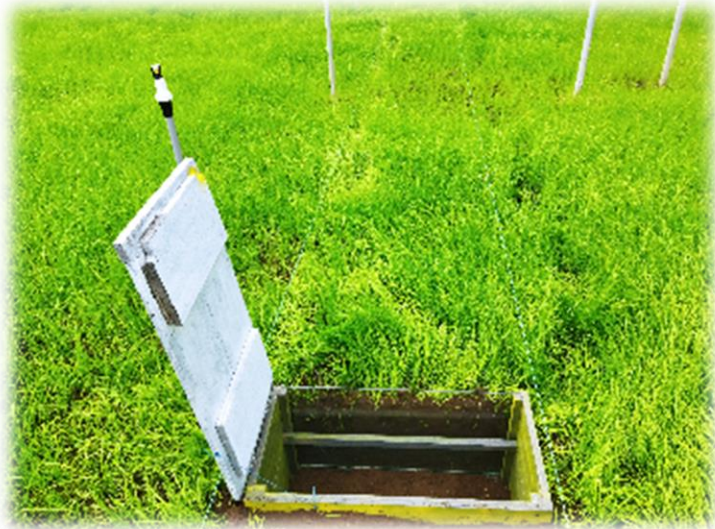


Secado 105°C

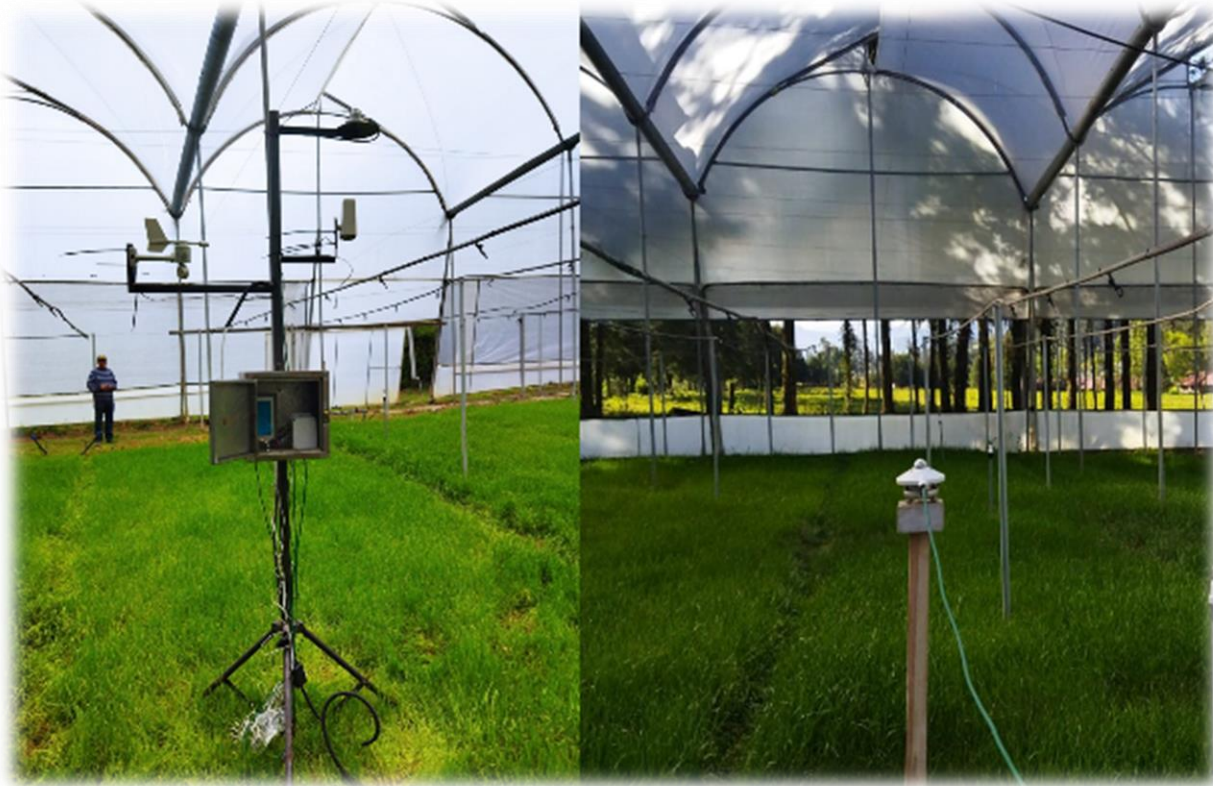
Siembra y fertilización del cultivo de referencia



Aplicación de la dosis neta de riego (L_n)



Instrumentos y variables a medir

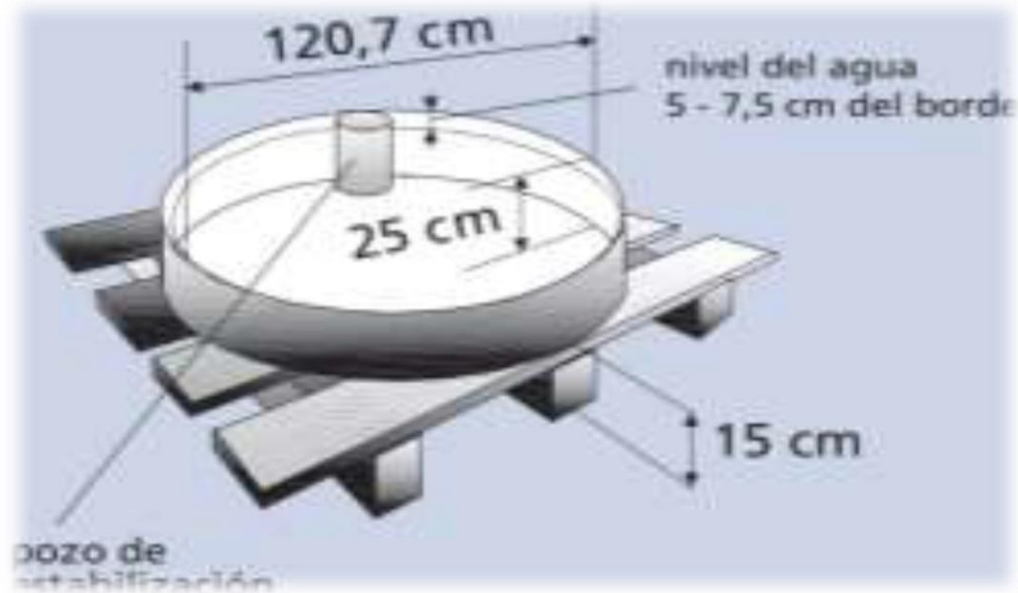


Estación agro meteorológica automática modelo WS-2317 Weather Pro Center a la izquierda, piranómetro CPM3 a la derecha

Temperatura máxima (T_{max} , °C),
Temperatura mínima (T_{min} , °C),
Humedad relativa (H_r , %)
Medida cada 30 minutos

y la radiación solar incidente (R_s ,
 W/m^2), Tomada cada minuto

Métodos directos para la estimación de ET_o



Tanque evaporímetro Clase A

$$ET_o = K_p \times E_p$$

Métodos directos para la estimación de ET_o



Tanque lisímetro de drenaje

$$ET_o / ET_c = \frac{R - D}{ND}$$

(León, 2018).

Métodos Indirectos para la estimación de ET_o

Método de Blaney y Criddle (BC)

$$ET_{o_{B-C}} = f_{B-C} * (45,72 * T_m + 812,8)$$

(Doorenbos & Pruitt, 1977).

Método de Hargreaves y Samani (HS)

$$ET_o = \beta R_s(T_p + 17.8)$$

(Rivano & Jara, 2005)

Método Penman-Monteith FAO 56 (PM- FAO 56)

$$ET_{o_{P-M}} = \frac{0,408\Delta(Rn - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0,34u_2)}$$

(FAO 56, 1990)

Método Priestley-Taylor (PT)

$$\lambda E = ETr = \frac{0.408\Delta(RN - G)}{\gamma + \Delta} \alpha \quad \alpha = 1 + 0.26 DPV$$

(Jara J. , 2005).

Criterios de Evaluación

Coeficiente de determinación R^2

$$R^2 = \frac{[\sum_{i=1}^n (O_i - X)(E_i - E_m)]^2}{(\sum_{i=1}^n O_i^2 - nX^2) \times (\sum_{i=1}^n E_i^2 - nE_m^2)}$$

Estadístico utilizado para medir la relación lineal entre dos variables cuantitativas; el valor óptimo debe ser igual a uno

Raíz del error cuadrático medio (RMSE)

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - E_i)^2}{n}}$$

Permite cuantificar la magnitud de la desviación de los valores simulados respecto a los observados

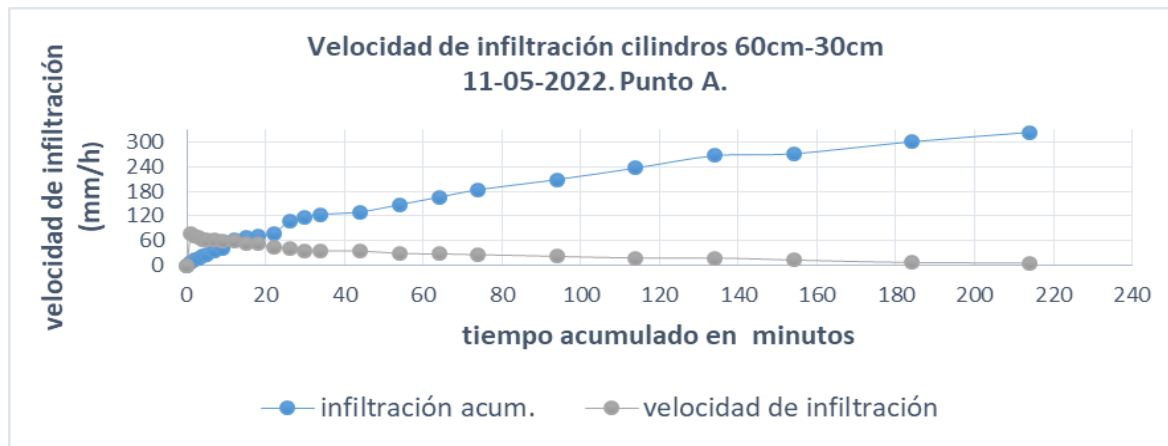
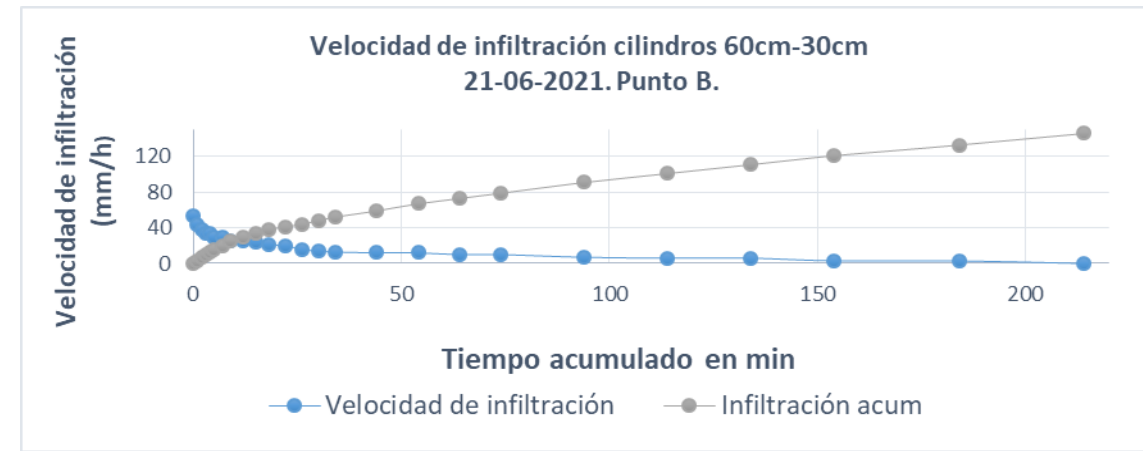
Error absoluto medio (MAE)

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |O_i - E_i|}{n}$$

Utilizado para establecer la diferencia que existe entre una variable medida con relación a una estimada

Velocidad de Infiltración

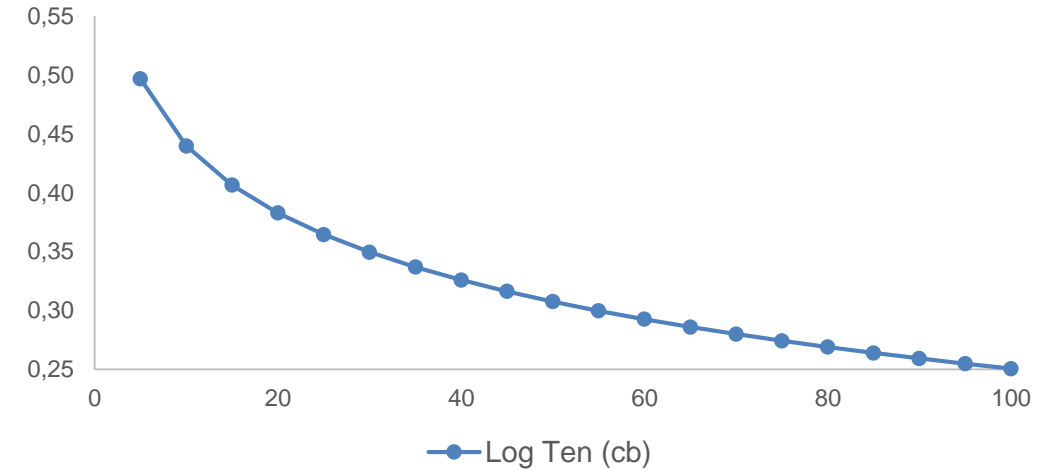
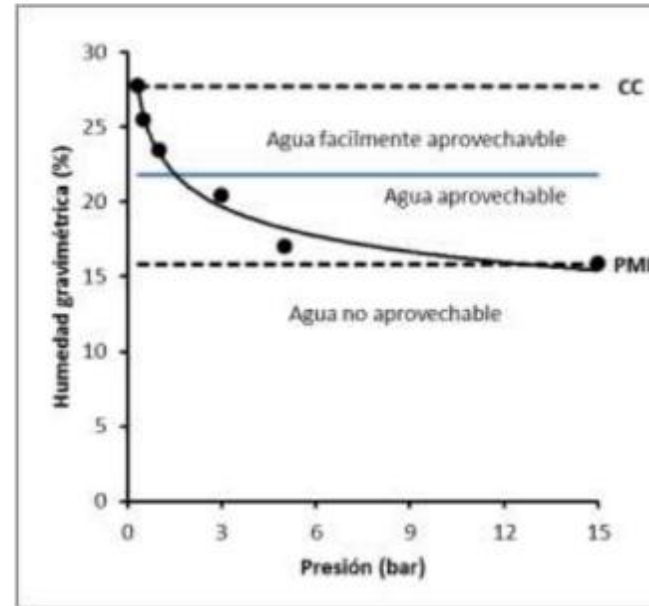
Velocidad de Infiltración ($mm \cdot h^{-1}$) Punto A	Velocidad de Infiltración ($mm \cdot h^{-1}$) Punto B	Velocidad de Infiltración ($mm \cdot h^{-1}$) Punto C	Velocidad de Infiltración ($mm \cdot h^{-1}$) Rawls y Saxton (2006)
39,1	19,6	31,0	38,73



Determinación de la curva tensión-humedad del suelo

Presión (bar)	Humedad gravimétrica	Unidad
0.33	27.7	%
0.50	25.5	%
1.00	23.4	%
3.00	20.4	%
5.00	17.0	%
15.00	15.8	%
CC	27.7	%
PMP	15.8	%
Da	1.3	g/cc
Hg	23.9	%
Hv	31.0	%
MO	1.5 M	%
Arena	43	%
Limo	33	%
Arcilla	24	%
Clase textural	Franco	

GRAFICO



$$Da = 1,254 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$$

Calidad de agua

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

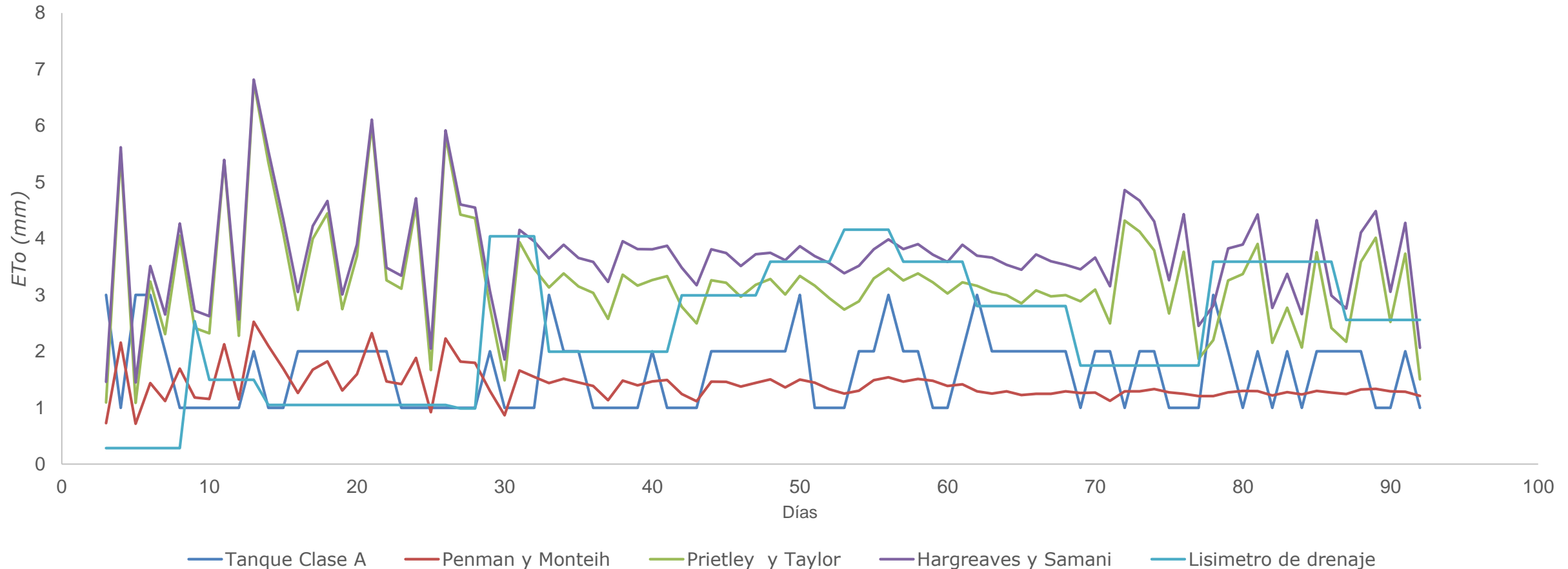
	PARÁMETROS	UNI.	M1
FÍSICOS	Temperatura	°C	17.5
	Potencial hidrogeno	0-14	8.53
	Conductividad	µS/cm	230
	TDS	mg/l	167
MICROBIOLÓGICO	Enterobacterias lactosa (+)		
	<i>Enterobacter sp.</i>	UFC/100ml	0
	<i>E. coli</i>		
	Enterobacterias lactosa (-)		
	<i>Proteus sp.</i>	UFC/100ml	<5
	Aerobios totales (<i>Bacillus sp.</i>)	UFC/100ml	<18
	<i>Pseudomonas sp.</i>	UFC/100ml	0
	Hongos	UFC/100ml	0
	levaduras	UFC/100ml	0
	Nitritos NO2	mg/l	0.014
QUÍMICOS	Nitratos NO3	mg/l	0.44
	Fosfatos PO4	mg/l	0.95
	CaCO3	mg/l	22
	Magnesio	mg/l	0
	Amonio NH3	mg/l	0.085

Tabla 2. Criterios para evaluar la calidad de aguas para riego⁽¹⁾.

Problema potencial	Unidades	Grado de restricción en el uso		
		Ninguno	Ligero o Moderado	Severo
Salinidad ⁽²⁾				
CEa	dS m ⁻¹	< 0.7	0.7 - 3.0	> 3.0
TSD	mg l ⁻¹	< 450	450 - 2000	> 2000
Infiltración ⁽³⁾				
RAS = 0 - 3 y CEa		> 0.7	0.7 - 0.2	< 0.2
= 3 - 6		> 1.2	1.2 - 0.3	< 0.3
= 6 - 12		> 1.9	1.9 - 0.5	< 0.5
= 12 - 20		> 2.9	2.9 - 1.3	< 1.3
= 20 - 40		> 5.0	5.0 - 2.9	< 2.9
Toxicidad de iones específicos				
Sodio (Na⁺) ⁽⁴⁾				
Riego superficial	RAS	< 3.0	3.1 - 9.0	> 9.0
Riego por aspersión	cmol(+) l ⁻¹	< 3.0	> 3.0	
Cloruros (Cl⁻) ⁽⁵⁾				
Riego superficial	cmol(+) l ⁻¹	< 4.0	4.0 - 10	> 10
Riego por aspersión	cmol(+) l ⁻¹	< 3.0	> 3.0	
Boro (B) ⁽⁶⁾				
	mg l ⁻¹	< 0.7	0.7 - 0.3	> 3.0
Elementos traza (ver tabla 11)				
Nitratos (N-NO ₃ ⁻) ⁽⁷⁾	mg l ⁻¹	< 5	5.0 - 30	> 30
Bicarbonatos (HCO ₃ ⁻)	mg l ⁻¹	< 1.5	1.5 - 8.5	> 8.5
pH		Rango Normal 6.5 - 8.4		

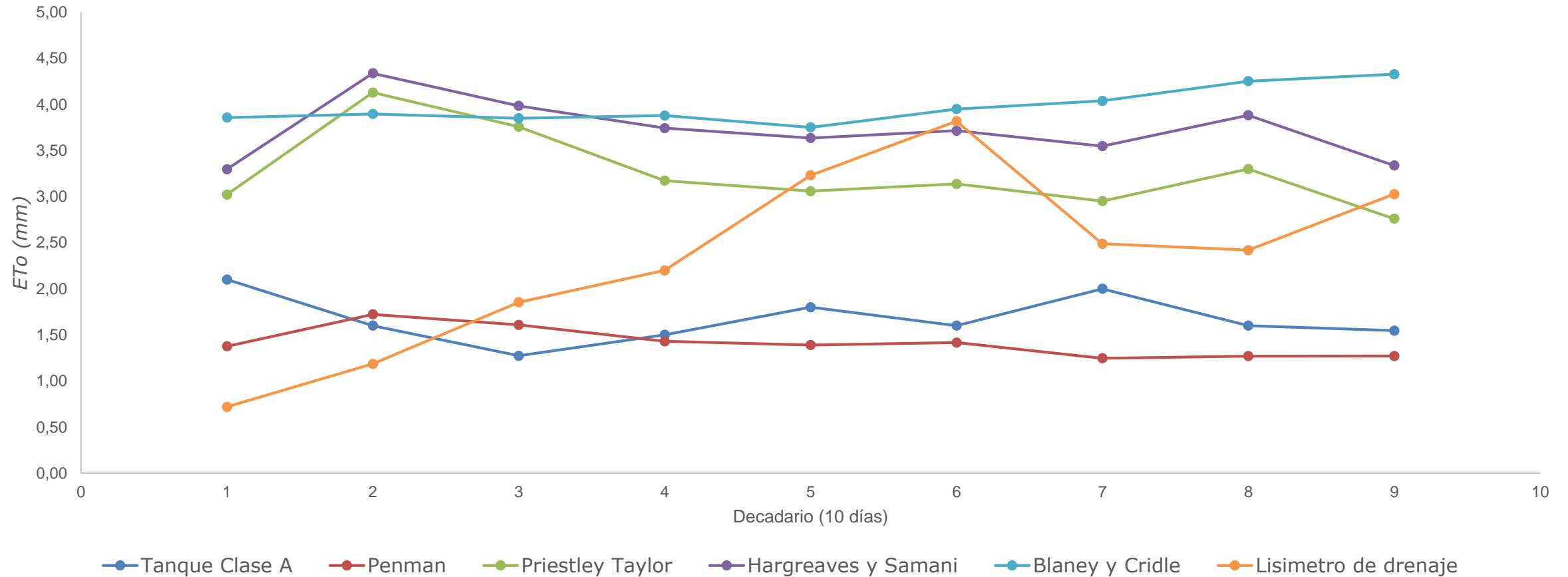
RESULTADOS Y DISCUSIÓN

ET_o diaria estimada con diferentes métodos en el periodo agosto- octubre 2021

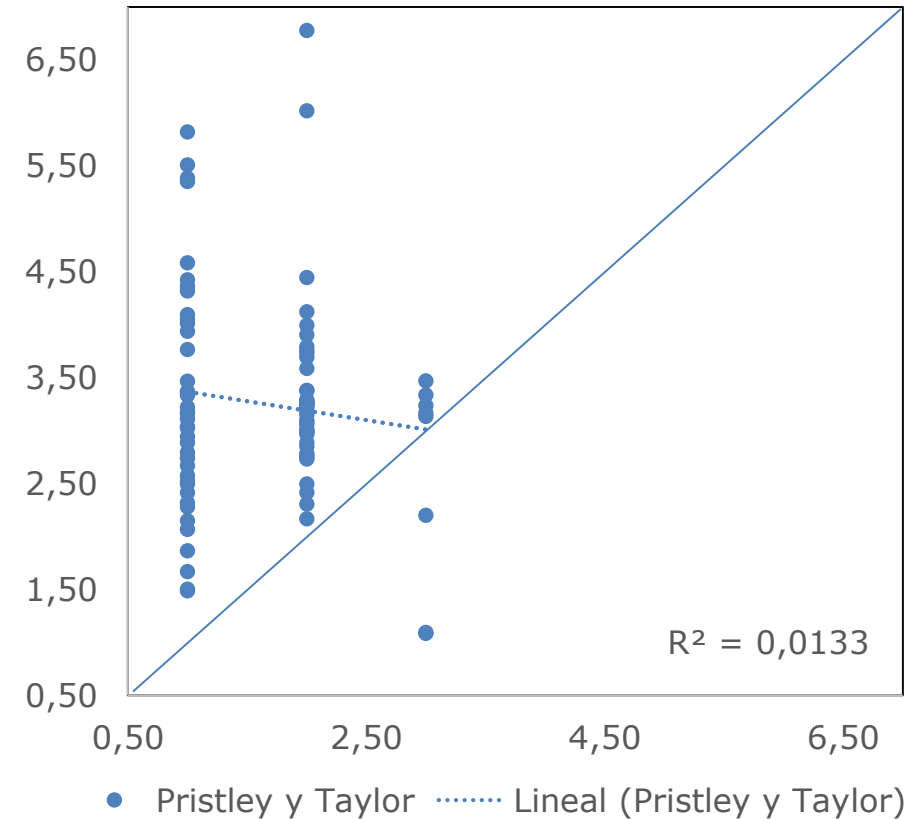
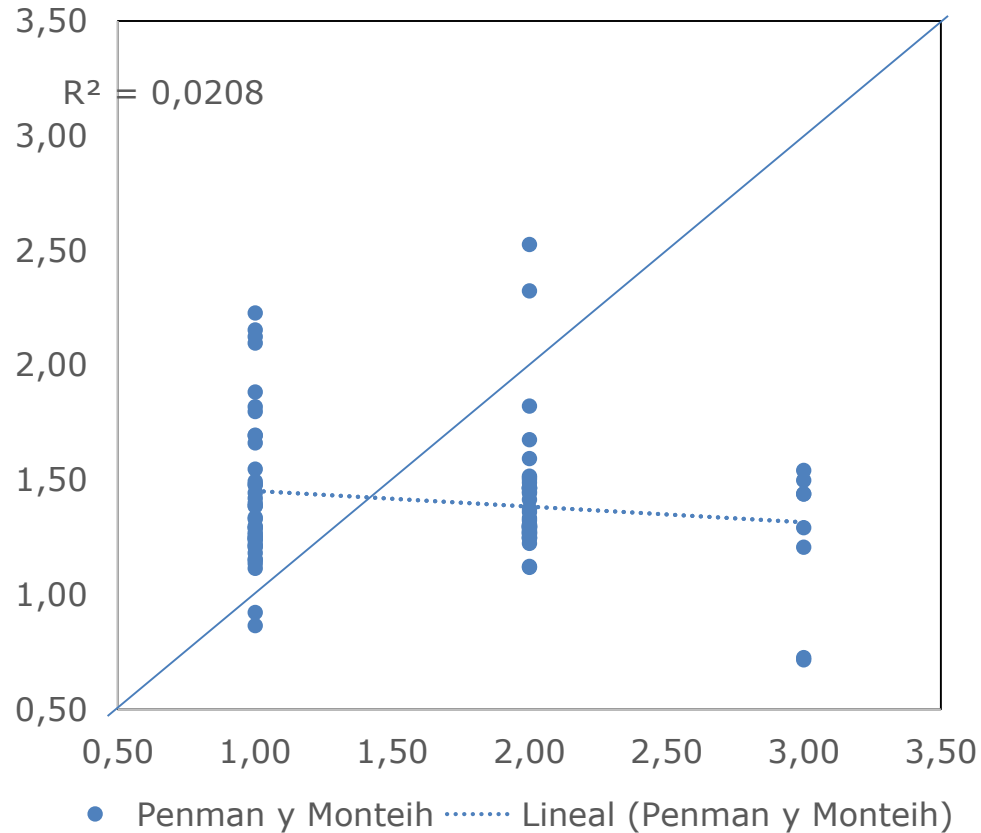


(Trezza R. , 2008) (Sangucho, 2018) (Vega & Jara, 2009)

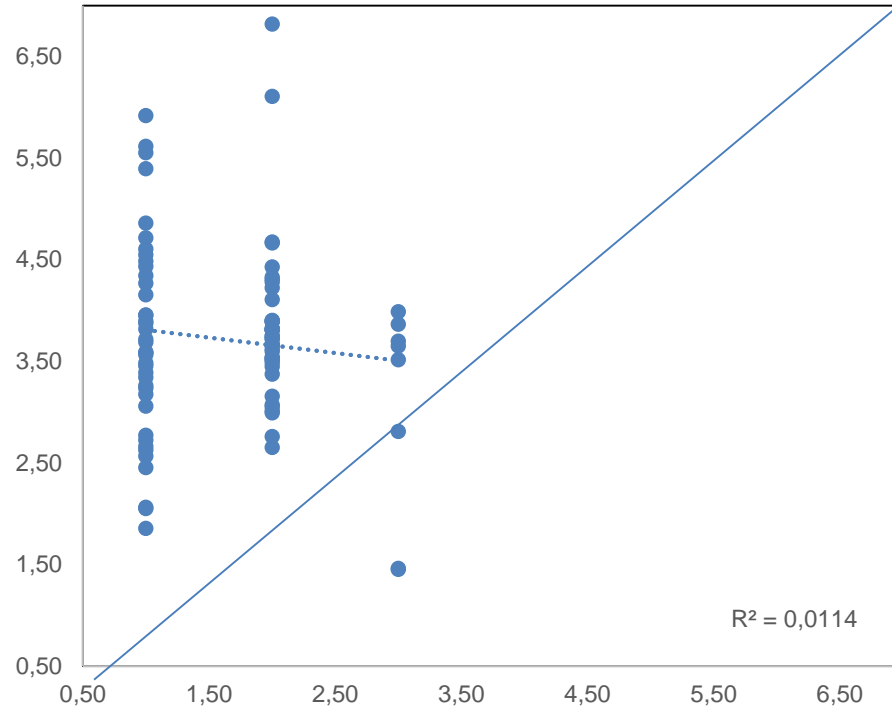
ETo decadaria estimada con diferentes métodos en el periodo agosto- octubre 2021



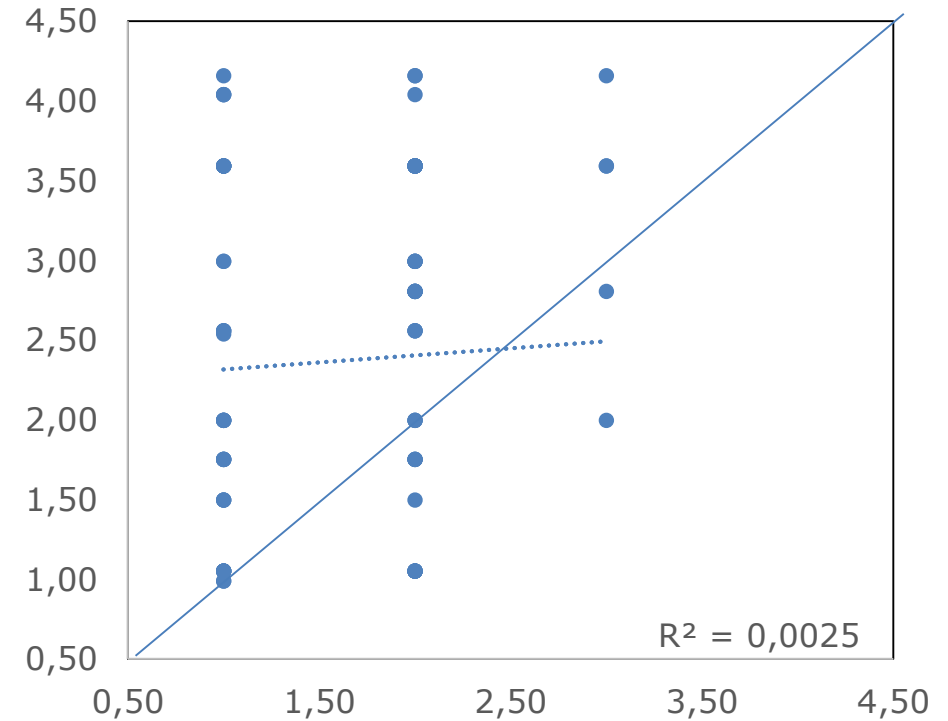
Criterios de evaluación



Criterios de evaluación



- Hargreaves y Samani
- Lineal (Hargreaves y Samani)

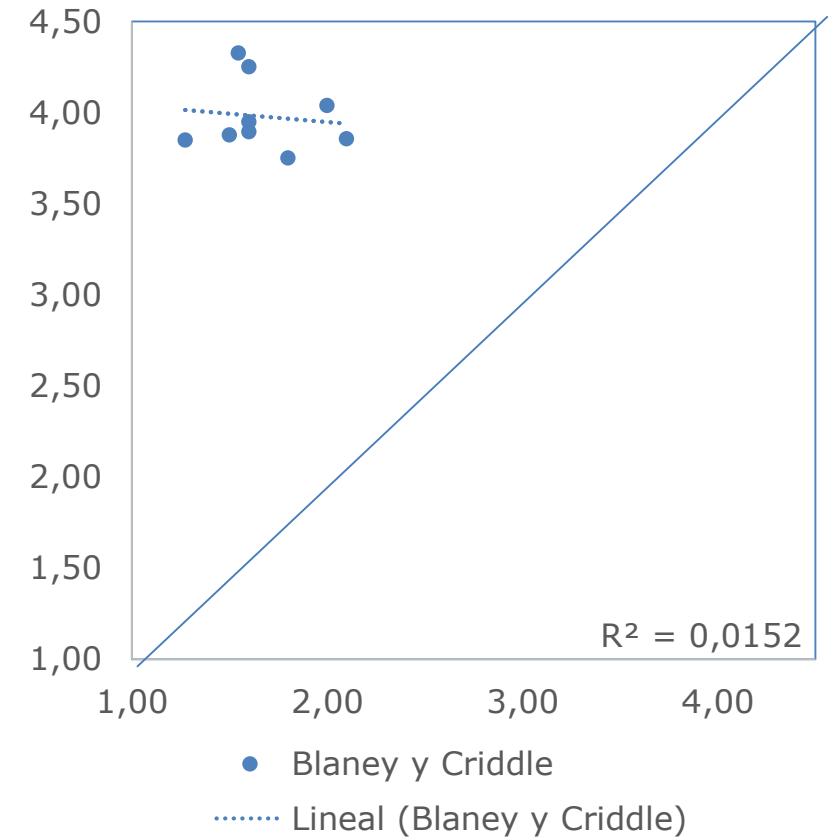
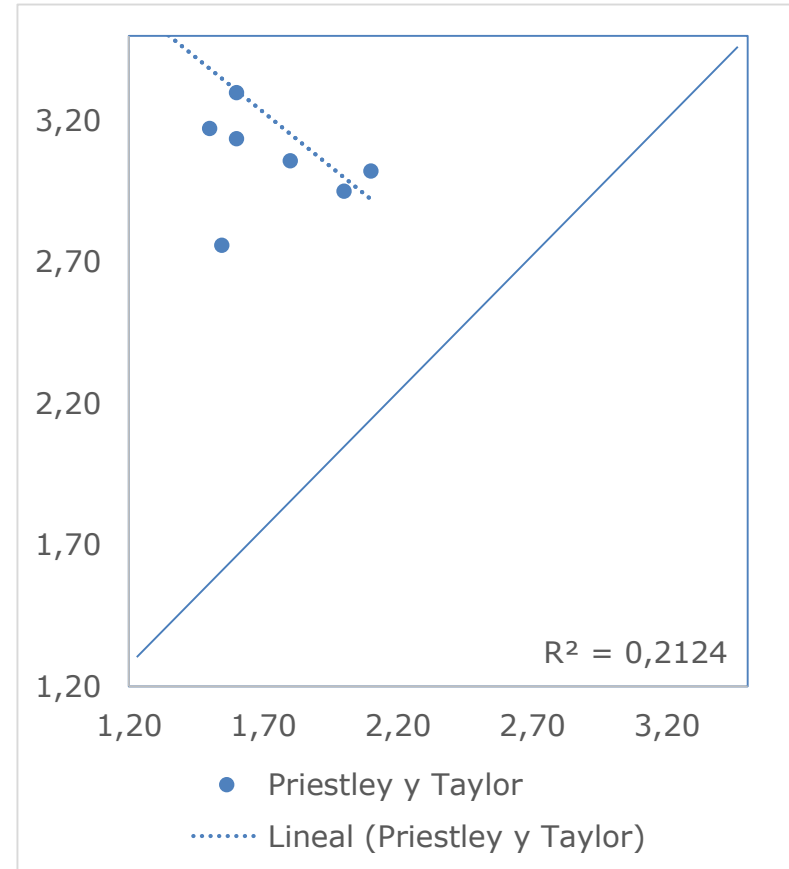
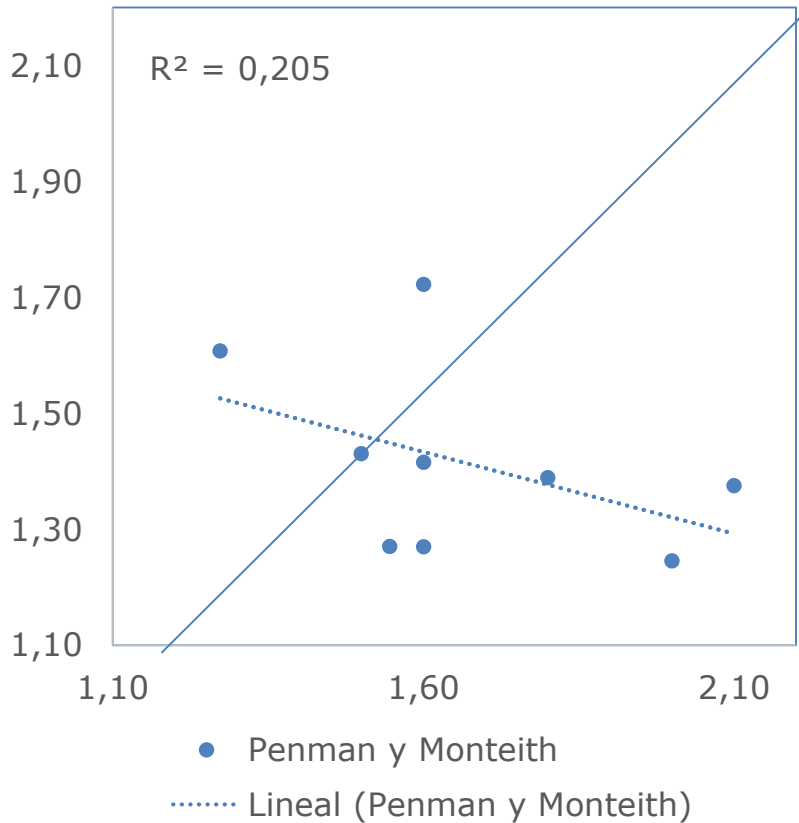


- Lisimetro de drenaje
- Lineal (Lisimetro de drenaje)

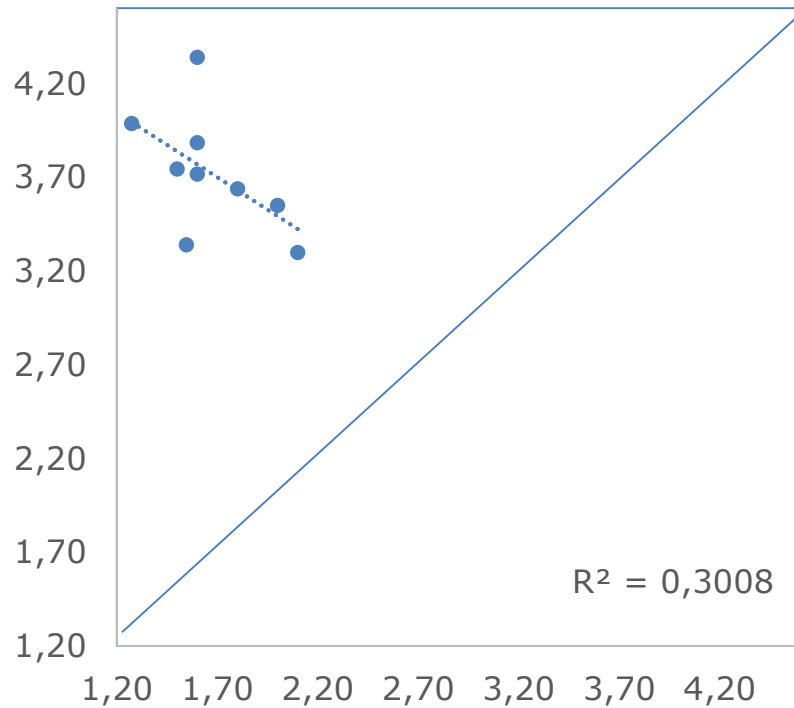
Criterios de evaluación

MÉTODO	CRITERIO DIARIO		
	MAE	RMSE	R^2
<i>PM- FAO 56</i>	0,65	0,78	0,02
<i>HS</i>	2,14	2,37	0,01
Priestley y Taylor	1,71	2,03	0,01
<i>L_sD</i>	1,19	1,47	0,0025

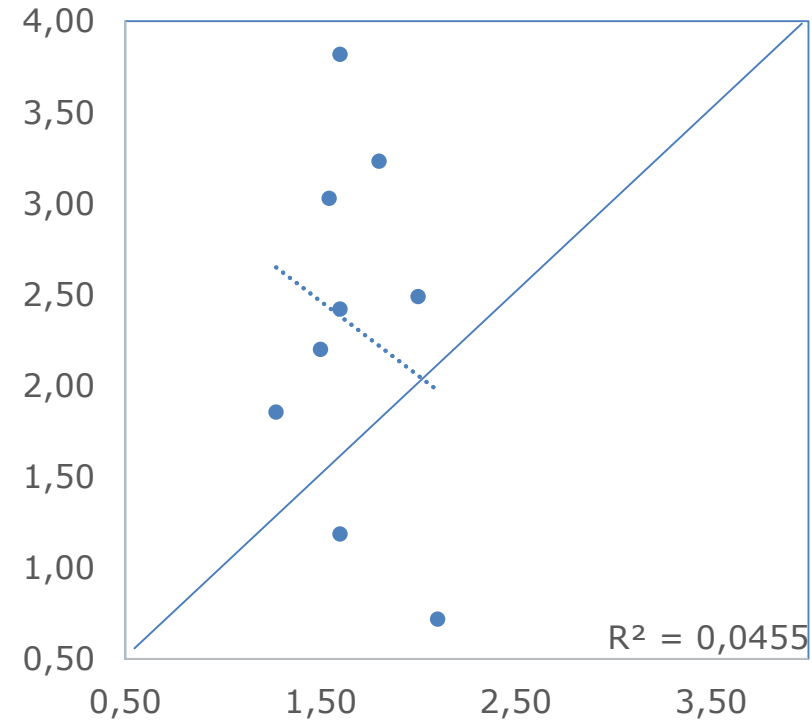
Criterios de evaluación



Criterios de evaluación



- Hargreaves y Samani
- Lineal (Hargreaves y Samani)



- Lisimetro de drenaje
- Lineal (Lisimetro de drenaje)

Criterios de evaluación

MÉTODO	CRITERIO DECADARIO		
	MAE	RMSE	R^2
<i>PM- FAO 56</i>	0,36	0,42	0,21
<i>HS</i>	2,05	2,11	0,30
<i>PT</i>	1,59	1,68	0,21
<i>L_sD</i>	1,06	1,20	0,0455
<i>BC</i>	2,31	2,33	0,02

- La ET_o promedio diaria obtenida bajo invernadero con el T_{evap} Clase A durante el periodo agosto-octubre fue de $1,65mm. día^{-1}$, mientras que con el MD de L_3D se determinó una ET_o promedio diaria bajo invernadero de $2,34mm. día^{-1}$. Para los MI la ET_o promedio diaria bajo invernadero se estimó en los siguientes valores de $1,45mm. día^{-1}$ ($PM-FAO 56$), $3,45mm. día^{-1}$ (HS) $3,25mm. día^{-1}$ (PT) y $3,98mm. día^{-1}$ (BC).
- Una vez obtenidos valores de ET_o diaria bajo invernadero conseguida con MD y MI para el periodo agosto-octubre del 2021, estos valores se compararon mediante los criterios de MAE , $RMSE$ y R^2 siendo el MI de $PM-FAO 56$ el modelo que mejor simula la evapotranspiración del T_{evap} Clase A ($MAE=0,65$, $RMSE= 0,78$, $R^2 = 0,02$), luego le sigue el MD de L_3D ($MAE=1,19$, $RMSE= 1,47$, $R^2 = 0,0025$), seguido por $MI PT$ ($MAE=1,71$, $RMSE= 2,03$, $R^2 = 0,01$) y por último el $MI HS$ ($MAE=2,14$, $RMSE= 2,37$, $R^2 = 0,01$).

- En función de las correlaciones entre valores estimados y medidos de $ETo_{diaria} Inv$ se concluye que el *MI PM-FAO 56* sobre estima y sub estima los valores de $ETo_{diaria} Inv$ medidas con el *MD T_{evap} Clase A*, al igual que el *MD L_sD* ; mientras que los *MI PT* y *HS* sobre estiman los valores de $ETo_{diaria} Inv$ medidas con el *MD T_{evap} Clase A*
- Una vez obtenida la *ETo* decadaria con *MD* y *MI* para el periodo agosto-octubre del 2021 se compararon mediante los criterios de *MAE*, *RMSE* y R^2 siendo el *MI* de *PM- FAO 56* el modelo que mejor simula la evapotranspiración del *T_{evap} Clase A* ($MAE=0,36$, $RMSE= 0,42$, $R^2 = 0,21$), seguido por el *MD* de *L_sD* ($MAE=1,06$, $RMSE= 1,20$, $R^2 = 0,0455$), seguido por *MI PT* ($MAE=1,59$, $RMSE= 1,68$, $R^2 = 0,21$), luego le sigue el *MI HS* ($MAE=2,05$, $RMSE= 2,11$, $R^2 = 0,30$) siendo el modelo que presentó mejor ajuste en función del criterio R^2 y, finalmente el *MI BC* presentó los siguientes valores ($MAE=2,31$), ($RMSE= 2,33$), ($R^2 = 0,02$).

- En función de las correlaciones entre valores estimados y medidos de ETo decadaria bajo invernadero se concluye que el MI PM -FAO 56 y sobre estima y sub estima los valores de ETo decadaria bajo invernadero medidas con el MD T_{evap} . Clase A, al igual que el MD L_sD , mientras que los MI PT , HS y BC sobre estiman los valores de ETo decadaria bajo invernadero medidas con el MD T_{evap} . Clase A
- El MI seleccionado para la determinación de ETo_{diaria} Inv en la Hcda el Prado corresponde al MI PM -FAO 56 con un valor promedio de ETo diaria de $1,45 \text{ mm. día}^{-1}$ este método es el que mejor aproxima la ETo_{diaria} Inv en relación a la ETo_{diaria} Inv medida con el T_{evap} . Clase A cuyo valor corresponde a $1,65 \text{ mm. día}^{-1}$
- En el caso que no se disponga de mediciones climáticas el MD L_sD , para estimar promete ser una buena opción a la hora de determinar la ETo_{diaria} Inv .

RECOMENDACIONES

- En el presente estudio el coeficiente Kp del $T_{evap. Clase A}$ utilizado para el cálculo de $ETo_{diaria Inv}$ se la obtuvo teóricamente con base en recomendaciones propuestas por la FAO, bajo este criterio se recomienda determinar el coeficiente Kp del $T_{evap. Clase A}$ para las condiciones climáticas y ubicación del $T_{evap. Clase}$ dentro del invernadero; así como también se debe considerar características constructivas como espesor y tipo de recubrimiento del $T_{evap. Clase A}$.
- Durante la etapa de riego en este estudio se verificó pérdidas de presión y cortes de agua, por lo cual las frecuencias de riego se vieron alteradas, bajo esta consideración se recomienda tener una dotación de agua continua dentro del invernadero que permita satisfacer de manera oportuna los requerimientos de riego del cultivo. Para el sitio en estudio debido a las altas precipitaciones, se recomienda el almacenamiento del agua lluvia a través tanques o reservorios.
- Debido a la extensa cantidad de variables climáticas requeridas para el modelo de *PM- FAO 56*, este involucra la adquisición de varios equipos para la recolección de información climática y varios de estos muy costosos, bajo estas consideraciones se recomienda el uso del método de L_sD .

RECOMENDACIONES

- Debido a que la recolección de las variables climáticas al interior del invernadero involucra una actividad diaria y continua de vital importancia, se recomienda la adquisición de una estación agrometeorológica automatizada que permita disponer de la información del clima al interior del invernadero en tiempo real y que evite la pérdida de datos.
- Se recomienda determinar la curva de descarga del aspersor mini Wobbler boquilla dorada instalada al interior del invernadero, y de esta manera llegar a obtener la pluviometría real en campo entregada por el aspersor en el rango de presiones de funcionamiento recomendadas por el fabricante. La pluviometría del aspersor es un dato muy importante al momento de determinar la ET_0 diaria bajo invernadero mediante el uso del tanque L_sD

AGRADECIMIENTOS



Ing. María Soledad Aguirre, Mgtr