



**ESPE**  
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA



## **Determinación del coeficiente del tanque evaporímetro Clase A para estimar la evapotranspiración de referencia bajo invernadero, Hcda. El Prado**

Tabango Cacoango, Ana Gabriela

Departamento de Ciencias de la Vida y la Agricultura

Carrera de Ingeniería Agropecuaria

Trabajo de titulación, previo a la obtención del título de Ingeniera Agropecuaria

Ing. Aguirre, María Soledad, Mgtr.

27 de enero de 2023



# INTRODUCCIÓN

## Evapotranspiración del cultivo de referencia ( $ETo$ ).

Es una de las variables más importantes para realizar estudios y planificaciones de gestión de riego, Celine (2011).

Métodos directos como el *Tevap. Clase A* o por un lisímetro de drenaje, Toledo (2015) y métodos indirectos como la ecuación de *Penman-Monteith FAO56*.

$$ETo P - M = \frac{0,408\Delta (Rn - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0,34U_2)}$$

$$ETo = Ev * Kp$$

Donde:  $Ev$  representa la lámina de agua evaporada en el *Tevap. Clase A* en mm/día.

## Coeficiente $Kp$ del tanque evaporímetro Clase A

### Métodos empíricos

- ✓ Allen-Pruitt (A-P)
- ✓ Cuenca (C)
- ✓ Snyder (S)
- ✓ Pereira (P)
- ✓ FAO56 (FAO56)

- $U_2$  ( $m \cdot s^{-1}$ )
- $HRmedia$  (%)
- $F$  (m)

Según la FAO56 el coeficiente  $Kp$  puede variar entre 0,40 a 0,85.

### Método directo

$Kp$  medido ( $Kpm$ )

$$Kpm = \frac{ETo}{Ev}$$

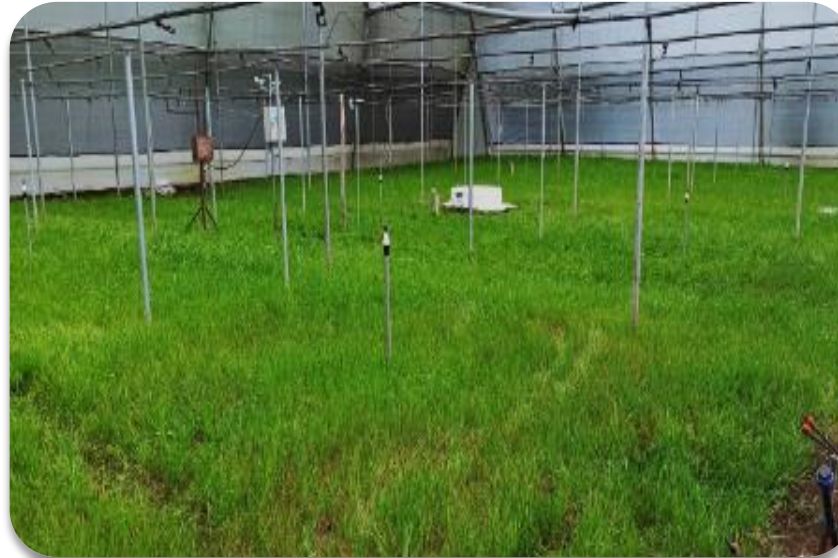


# JUSTIFICACIÓN

El uso de las ecuaciones para convertir la evaporación del *Tevap. Clase A* en *ETo*, son necesarias, ya que con el tiempo se han implementado estaciones automáticas tecnológicas, Sentelhas *et al.* (2003).

Puppo *et al.* (2009) sugieren calibrar localmente el coeficiente  $Kp$  en función de la *ETo* determinada mediante la ecuación *PM-FAO56*.

Obtener estimaciones de valores más precisas del coeficiente  $Kp$  es de mucha importancia para conseguir valores de *ETo* más exactos, Delgado (2012).



Esta investigación se hace viable

Para estimar  $Kp$ , este valor tendrá que ser calibrado y corregido de acuerdo a cada localización ya que son cambiantes en cada región, Celine (2011).

Esta investigación permitirá a futuro establecer planificaciones y programas de riego más exactos y específicos.

- ✓ Disponer sembrado dentro del invernadero
- ✓ Riego por microaspersión
- ✓ *Tevap. Clase A*
- ✓ Estación climática inalámbrica Ambient Weather WS-2000 Wi-Fi

## Objetivo general

- Evaluar diferentes modelos empíricos para predecir los valores del coeficiente  $K_p$  del  $T_{evap}$ . Clase A y, estimar valores diarios y decenales de  $ETo$  bajo invernadero, en la Hcda. El Prado.

## Objetivos específicos

- Establecer valores medidos del coeficiente  $K_p$  diarios y  $K_p$  decenales, con base en la información de evaporación del tanque Clase A y estimaciones de  $ETo$  obtenidas con la ecuación. de *Penman-Monteith FAO56*, bajo condiciones de invernadero.
- Calcular el coeficiente  $K_p$  diario y  $K_p$  decenal con base a métodos empíricos, para estimar la  $ETo$  diaria y  $ETo$  decenal bajo invernadero.
- Correlacionar los datos medidos y estimados, de acuerdo a los métodos empíricos y la ecuación de *Penman-Monteith FAO56*, empleados en el cálculo de  $K_p$ ,  $ETo$  diaria y  $ETo$  decenal, utilizando métodos no paramétricos.
- Encontrar la  $ETo$  diaria y  $ETo$  decenal, que se genera bajo invernadero en el periodo agosto 2021-enero 2022, en la Hcda. El Prado, de acuerdo con el método  $K_p$  que determinó la mejor bondad de ajuste.

# HIPÓTESIS

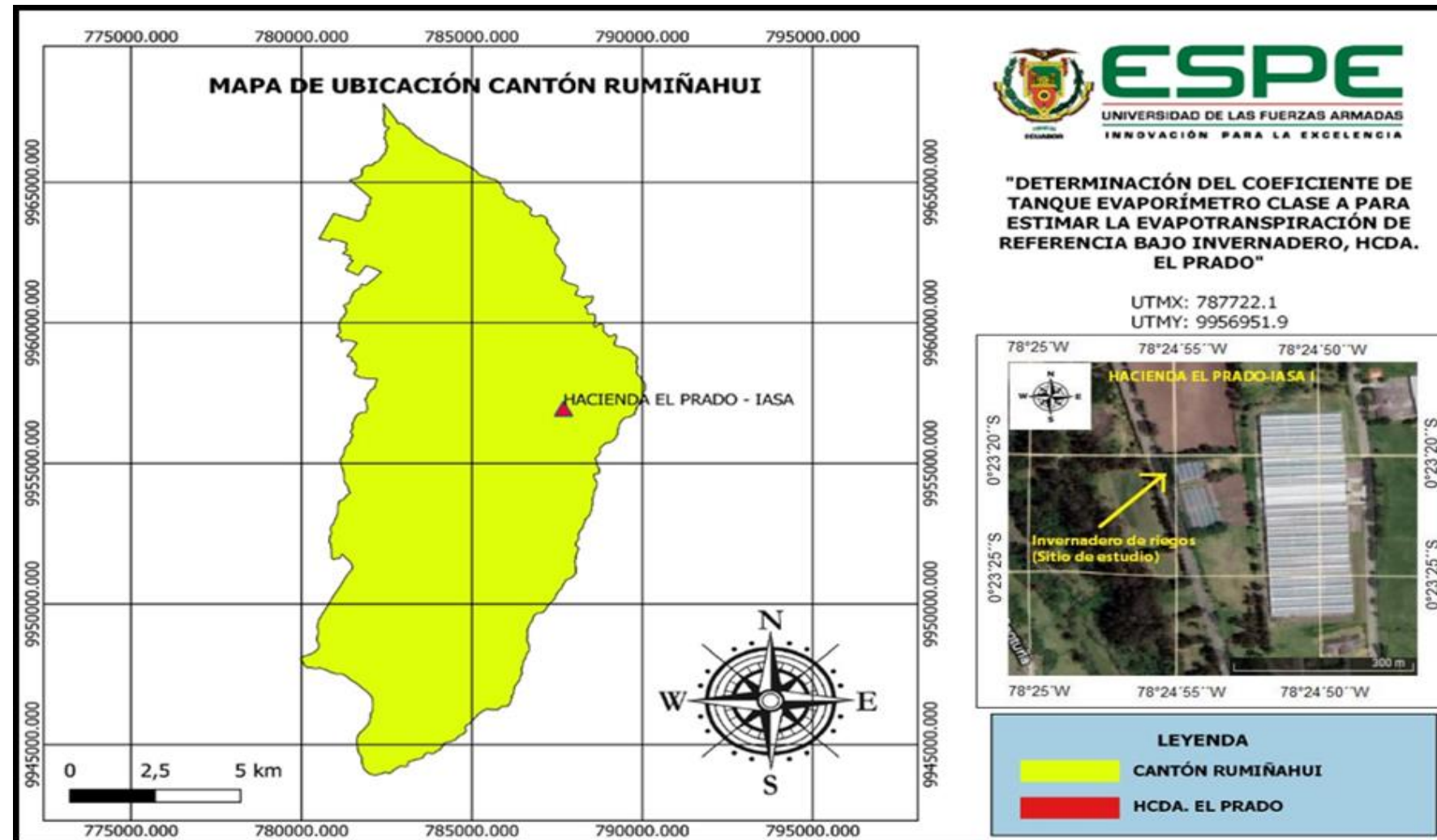
**H1:** Al menos un método empleado en el cálculo del coeficiente  $K_p$ , presentó un mejor ajuste para la estimación de la  $ET_o$  mediante el uso del  $T_{evap}$ . Clase A, bajo invernadero en la Hcda. El Prado.

**H0:** Todos los métodos empleados en el cálculo del coeficiente  $K_p$ , presentaron ajustes similares para la estimación de la  $ET_o$  mediante el uso del  $T_{evap}$ . Clase A, bajo invernadero en la Hcda. El Prado.



# METODOLOGÍA

## Mapa de ubicación y características del lugar de investigación



### Características del invernadero

Forma multitúnel con dimensiones de  $22.40\text{ m} \times 35.90\text{ m}$ , con un área bruta de  $804.16\text{ m}^2$  y área neta de  $672\text{ m}^2$ .

### Ubicación

- Provincia: Pichincha
- Cantón: Rumiñahui
- Parroquia: San Fernando
- Hacienda "El Prado"
- Altitud:  $2\ 733\text{ m.s.n.m}$
- Latitud:  $0^{\circ}23'20''\text{ S}$
- Longitud:  $78^{\circ}24'54''\text{ O}$

# METODOLOGÍA

## Métodos para estimar el coeficiente $K_p$

### Cálculo del coeficiente $K_p$ medido ( $K_{pm}$ )

Características del  $T_{evap}$ . Clase A

- ✓ Forma: circular
- ✓ Color: blanco
- ✓ Medidas: diámetro 120,7 cm y profundidad 25 cm
- ✓ Espesor del tanque: 3 mm
- ✓ Tipo de material: hierro galvanizado

$$K_p = \frac{ET_o}{E_v}$$

Donde:  $ET_o$ : evapotranspiración del cultivo de referencia [ $mm. día^{-1}$ ];  
 $E_v$ : lámina de agua evaporada en el  $T_{evap}$ . Clase A [ $mm. día^{-1}$ ]



# METODOLOGÍA

Cálculo del  
coeficiente  
 $K_p$  estimado  
( $K_{pe}$ )

***Kp Allen-Pruitt*** (Ortiz et al., 2018)

$$K_p = 0.108 - 0.000331xU_2 + 0.0422x\ln(F) + 0.1434x\ln(HRm) - 0.000631x(\ln(F))^2x\ln(HRm)$$

***Kp Cuenca*** (Sentelhas & Folegatti, 2003)

$$K_p = 0.475 - 2.4 \times 10^{-4}xU_2 + 5.16 \times 10^{-3}xHRm + 1.18 \times 10^{-3}xF - 1.6 \times 10^{-5}xHRm^2 - 1.01 \times 10^{-6}xF^2 - 8.0 \times 10^{-9}xHRm^2xU_2 - 1.0 \times 10^{-8}xHRm^2xF$$

***Kp Snyder*** (Vassilis et al., 2012)

$$K_p = 0.482 + 0.024x\ln(F) - 0.000376$$

***Kp Pereira*** (Ortiz et al., 2018)

$$K_p = 0.51206 - 0.000321xU_2 + 0.002889xHRm + 0.031886x\ln(F) - 0.000107xHRmx\ln(F)$$

***Kp FAO56*** (Sentelhas & Folegatti, 2003)

$$K_p = 0.108 - 0.0286xU_2 + 0.0422\ln(F) + 0.1434\ln(HRm) - 0.000631[\ln(F)]^2x\ln(HRm)$$

***Kp Rahguwanshi & Wallender*** (Ali, 2011)

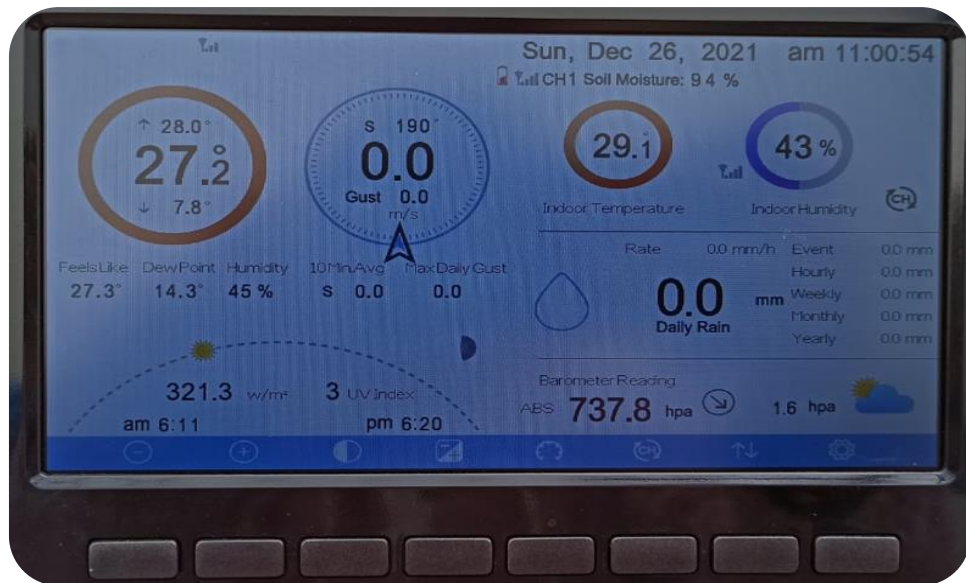
$$K_p = 0.5944 + 0.0242(X_1) - 0.0583(X_2) - 0.1333(X_3) - 0.2083(X_4) + 0.0812(X_5) + 0.1244(X_6)$$

$U_2$ : velocidad promedio del viento a 2 m de altura  $km.d^{-1}$ .  
 $F$ : distancia entre el tanque evaporímetro y el área con cultivo (m).  
 $HRm$ : la humedad relativa media (%).



# METODOLOGÍA

Actualmente, los datos sobre las variables climáticas se adquirieron mediante equipos electrónicos, con estaciones meteorológicas inalámbricas que vienen en un paquete completo de monitoreo local y remoto, fácil de leer en el día y la noche (Weather, 2016).



Las variables climáticas que se tomó en cuenta fueron la velocidad del viento ( $m \cdot s^{-1}$ ) y la humedad relativa (%) bajo invernadero mediante la estación agro-meteorológica inalámbrica *Ambient Weather WS-2000 Wi-Fi OSPREY*.

# METODOLOGÍA

El dato del agua evaporada del *Tevap. Clase A* se registró de manera diaria en el horario de las 9:00 am mediante la lectura de la regleta que se encuentra adherida a la pared interna del tanque evaporímetro; se realizó el llenado del tanque a 20 cm cuando el nivel del agua en el tanque llegaba a los 18.0 cm (Odar & Ramírez, 2014).



## Criterios de evaluación

**Error medio absoluto (MAE)**



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

**Coefficiente de determinación ( $R^2$ )**



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

**Raíz del error cuadrático medio (RMSE)**



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

# RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Serie de datos agrometeorológicos diarios bajo invernadero para el periodo agosto 2021-enero 2022.

Para el periodo agosto-octubre 2021, los datos recolectados fueron  $T_{min}$ ,  $T_{max}$ ,  $T_{med}$ ,  $Ev$ ,  $Rs$  y  $HR_{media}$ . Se utilizó la estación meteorológica *WS-2317 Weather Pro Center*, un piranómetro *CMP3*, Muñoz (2021).

Para el periodo noviembre 2021-enero 2022, los datos recolectados fueron  $T_{min}$ ,  $T_{max}$ ,  $T_{med}$ ,  $T_{prom}$ ,  $Ev$ ,  $Rs$  y  $HR_{max}$ ,  $HR_{min}$ ,  $HR_{media}$ . Se utilizó la estación inalámbrica *Ambient Weather WS-2000 Wi-Fi OSPREY*.

Esta información fue usada en la determinación de la  $ETo$  diaria y  $ETo$  decenal, mediante la ecuación de *PM-FAO56* (Ec. 1) y; para el cálculo del coeficiente  $Kp$  diario y  $Kp$  decenal con el uso de las ecuaciones *Allen-Pruitt*, *Cuenca*, *Snyder*, *Pereira* y *FAO56*.



Muñoz (2021)





# RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Coeficiente  $K_p$  medido diario y  $K_{pm}$  decenal obtenido con base a la información climatológica colectada bajo invernadero, para el periodo agosto 2021-enero 2022.

N°	Método directo ( $K_{pm}$ )	Prom	Max	Min
1	Kpm diario	0,74	0,97	0,31
2	Kpm decenal	0,73	0,84	0,64

Los datos reportados por Sentelhas & Folegatti (2003), encontraron un coeficiente  $K_{pm}$  en un rango 0,40 a 1,0; el estudio fue realizado en Brasil.

Jorge López & Dennett (2005), calcularon el  $K_p$  diario y  $K_p$  decenal, utilizaron el método de la ecuación de  $PM$  y el  $T_{evap}$  Clase A, encontraron valores de  $K_p$  medido para el primer periodo entre 0,60 a 0,75 y para el segundo periodo entre 0,60 a 0,80.

# RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Coeficiente  $K_p$  diario y  $K_p$  decenal, calculados con diferentes modelos empíricos a base de información climatológica colectada bajo invernadero, para el periodo agosto 2021-enero 2022.

## $K_p$ diario

N°	Métodos empíricos ( $K_{pe}$ )	Prom $\pm$ DE	Max	Min
1	Allen-Pruitt	0,71 $\pm$ 0,02	0,75	0,69
2	Cuenca	0,74 $\pm$ 0,02	0,79	0,71
3	Snyder	0,77 $\pm$ 0,03	0,86	0,73
4	Pereira	0,71 $\pm$ 0,02	0,77	0,68
5	FAO56	0,70 $\pm$ 0,02	0,74	0,68

Los datos descritos fueron similares a los obtenidos por Sentelhas & Folegatti (2003), quienes utilizaron los métodos empíricos (*Doorenbos y Pruitt, Cuenca, Snyder, Pereira, Raghuwanshi & Wallender y FAO56*) y reportan valores del coeficiente  $K_p$  en un rango de 0,60 a 0,90.

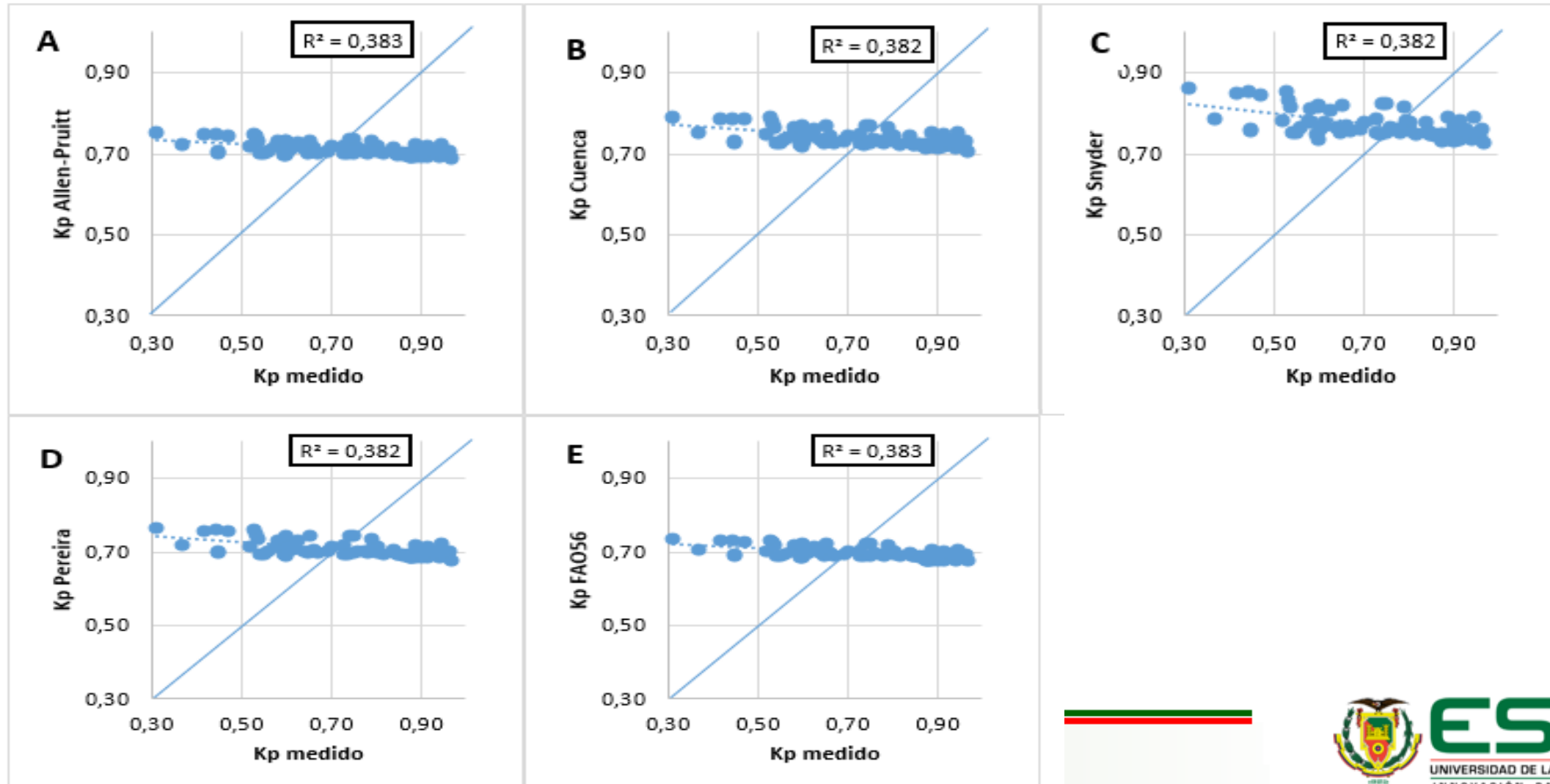
## $K_p$ decenal

N°	Métodos empíricos ( $K_{pe}$ )	Prom $\pm$ DE	Max	Min
1	Allen-Pruitt	0,71 $\pm$ 0,01	0,73	0,70
2	Cuenca	0,74 $\pm$ 0,02	0,77	0,72
3	Snyder	0,77 $\pm$ 0,03	0,81	0,74
4	Pereira	0,71 $\pm$ 0,02	0,74	0,69
5	FAO56	0,70 $\pm$ 0,01	0,72	0,68

Basándose en el estudio realizado a campo abierto por Villazón (2021), en su trabajo reportó información del coeficiente  $K_p$  mediante el método de *Allen-Pruitt* con un coeficiente  $K_p$  promedio entre 0,67 a 0,76 de manera decenal (cada 10 días) durante un año en dos zonas de Holguín-Cuba.

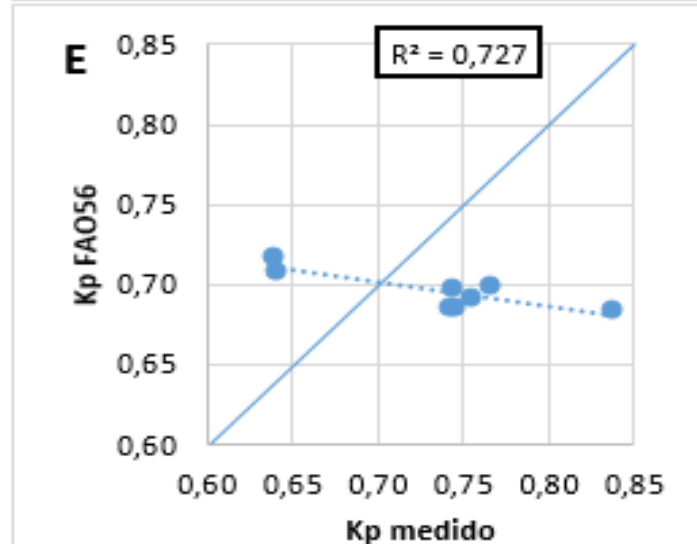
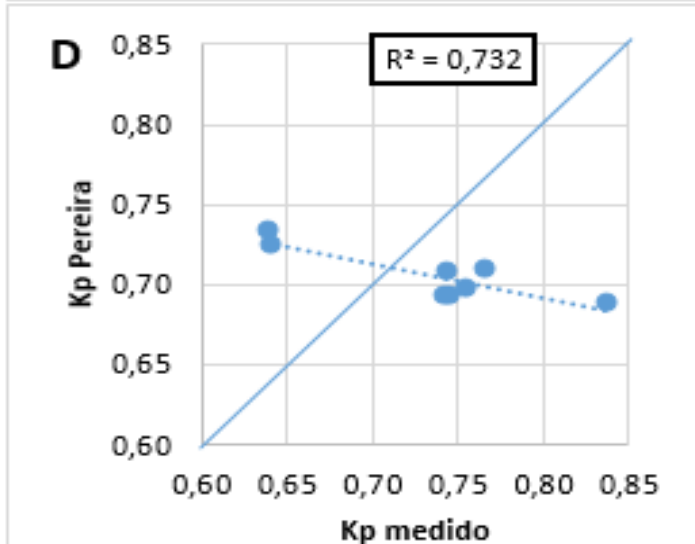
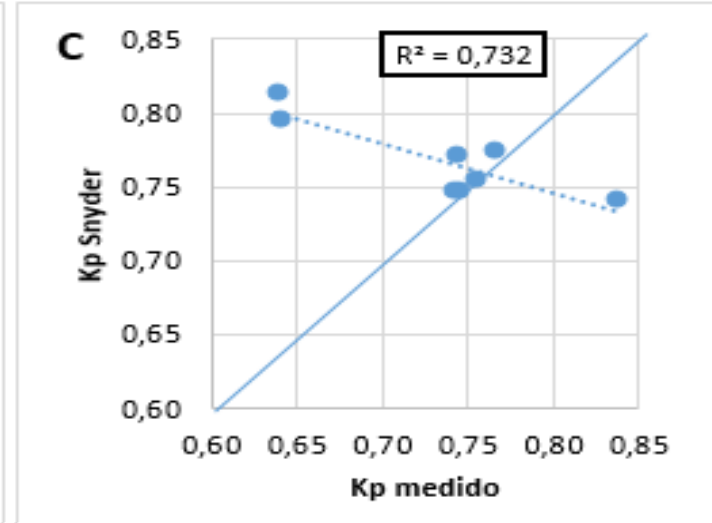
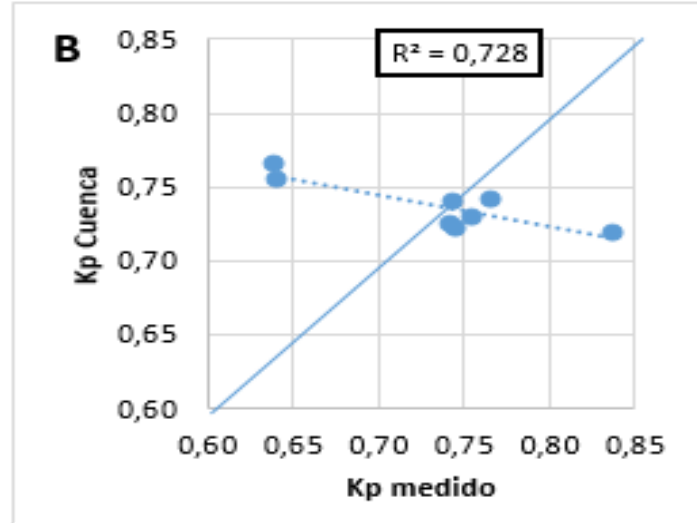
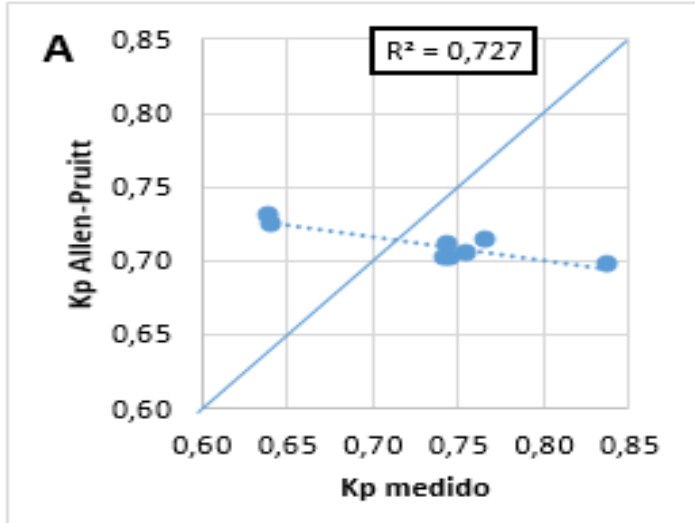
# RESULTADOS Y DISCUSIÓN

*Correlación entre los valores estimados y medidos del coeficiente Kp diario bajo invernadero, en el período agosto 2021-enero 2022.*



# RESULTADOS Y DISCUSIÓN

*Correlación entre los valores estimados y medidos del coeficiente Kp decenal bajo invernadero, en el período agosto 2021-enero 2022.*





# RESULTADOS Y DISCUSIÓN

**Análisis estadístico diario de criterios de evaluación, entre el coeficiente  $K_{pe}$  vs el coeficiente  $K_{pm}$ , bajo invernadero, localidad Hcda. El Prado, periodo agosto 2021-enero 2022**

Métodos del coeficiente $K_{pe}$ Vs. el coeficiente $K_{pm}$	Criterios de evaluación diario		
	MAE	$R^2$	RMSE
Allen/Pruitt-Kpm	0,156	0,383	0,178
Cuenca-Kpm	0,155	0,382	0,180
Snyder-Kpm	0,160	0,382	0,191
Pereira-Kpm	0,160	0,382	0,183
FAO/56-Kpm	0,159	0,383	0,180

Sentelhas & Folegatti (2003), realizaron un estudio concluyendo que de los métodos empíricos de *Doorenbos y Pruitt*, *Cuenca*, *Snyder*, *Pereira*, *Raghuwanshi & Wallender* y *FAO56*, los mejores métodos para la estimación del coeficiente  $K_p$  diario, fueron el método de *Cuenca* y el método de *Pereira* con un  $R^2$  de 0,927 y 0,937 y un MAE de 0,444 y 0,426 respectivamente.



Métodos de Cuenca y Allen-Pruitt



# RESULTADOS Y DISCUSIÓN

**Análisis estadístico decenal de criterios de evaluación, entre el coeficiente  $K_{pe}$  vs el coeficiente  $K_{pm}$ , bajo invernadero, localidad Hcda. El Prado, periodo agosto 2021-enero 2022**

Métodos del coeficiente	Criterios de evaluación decenal		
$K_{pe}$ Vs. el coeficiente $K_{pm}$	MAE	$R^2$	RMSE
Allen/Pruitt- $K_{pm}$	0,066	0,727	0,074
Cuenca- $K_{pm}$	0,056	0,728	0,075
Snyder- $K_{pm}$	0,060	0,732	0,090
Pereira- $K_{pm}$	0,072	0,732	0,079
FAO/56- $K_{pm}$	0,073	0,727	0,080



Bajo el criterio de  $R^2$  los métodos de mejor ajuste fueron los métodos de *Cuenca* y *Snyder* (0,732).  
MAE (0,056; 0,060) y; RMSE (0,075; 0,090).



# RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Determinación de *ETo* diaria y *ETo* decenal bajo invernadero, localidad Hcda. El Prado, periodo agosto 2021-enero 2022.

## *ETo* diaria (mm/día)

	Agos	Sept	Oct	Nov	Dic	Ene
Prom.	1,13	1,18	1,25	0,75	0,85	0,96
Max.	2,19	2,19	2,19	1,46	1,46	1,46
Min.	0,73	0,73	0,73	0,72	0,73	0,72



Se obtuvo valores promedios de *ETo* diaria en (mm/día) correspondientes a valores Prom. (1,02); Max. (2,19) y, Min. (0,72) bajo invernadero.

## *ETo* decenal (mm/día)

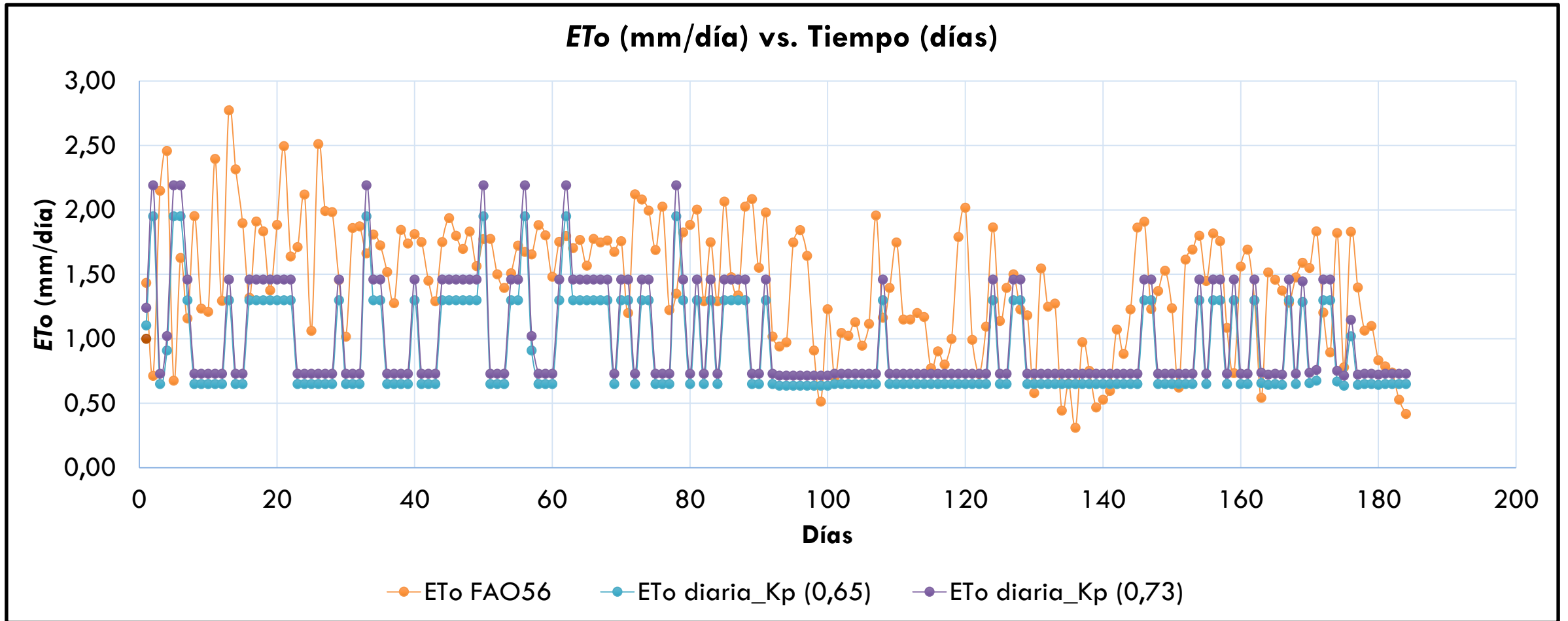
	Agos	Sept	Oct	Nov	Dic	Ene
Prom.	1,14	1,18	1,25	0,75	0,85	0,96
Max.	1,32	1,31	1,46	0,80	0,95	1,10
Min.	0,93	1,10	1,13	0,72	0,73	0,77



Se obtuvo valores promedios de *ETo* decenal en (mm/decenal) correspondientes a valores Prom. (1,02); Max. (1,46) y, Min (0,72) bajo invernadero.

# RESULTADOS Y DISCUSIÓN

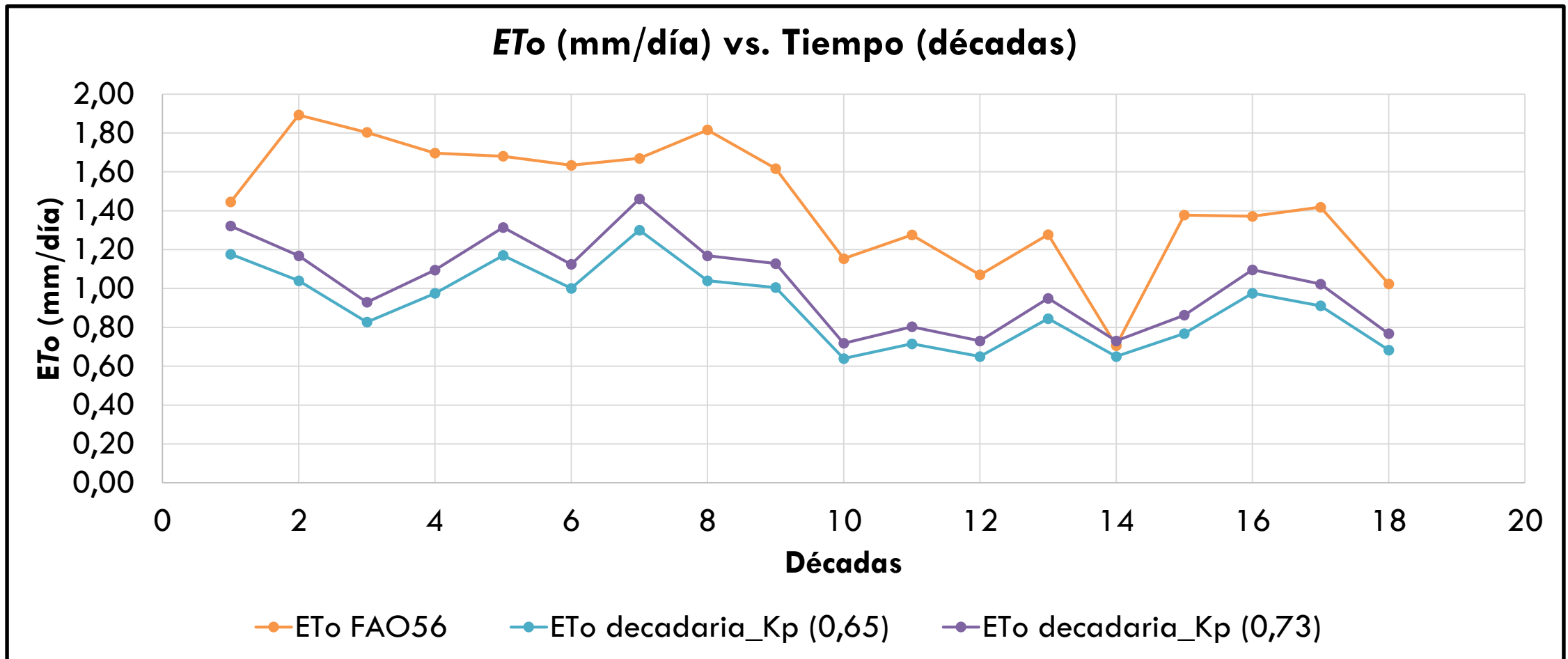
*Comparación decenal de la ETo FAO56 con ETo ( $K_p=0,65$ ) y ETo ( $K_p=0,73$ ) vs. tiempo, bajo invernadero, localidad Hcda. El Prado, para el periodo agosto 2021- enero 2022.*





# RESULTADOS Y DISCUSIÓN

*Comparación decenal de la ETo FAO56 con ETo ( $K_p=0,65$ ) y ETo ( $K_p=0,73$ ) vs. tiempo, bajo invernadero, localidad Hcda. El Prado, para el periodo agosto 2021- enero 2022.*



# CONCLUSIONES

- Se establecieron valores medidos para el coeficiente  $K_p$  diario y  $K_p$  decenal, con base en el conocimiento de la lámina de agua evaporada en el *Tevap. Clase A* y estimaciones de  $ETo$  calculada con la ecuación de *PM-FAO56*, obteniendo como valor promedio del coeficiente  $K_p$  diario=0.74 y coeficiente  $K_p$  decenal=0.73.
- Se logró estimar valores promedios de coeficientes  $K_p$  diarios y  $K_p$  decenales bajo invernadero, a través de los métodos empíricos de *Allen-Pruitt* ( $K_p=0.71$ ), *Cuenca* ( $K_p=0.74$ ), *Snyder* ( $K_p=0.77$ ), *Pereira* ( $K_p=0.71$ ) y *FAO56* ( $K_p=0.70$ ).
- Conforme a las correlaciones entre valores estimados y valores medidos del coeficiente  $K_p$ , se concluye que todos los métodos empíricos analizados en esta investigación como son *Allen-Pruitt*, *Cuenca*, *Snyder*, *Pereira* y *FAO56*, pueden ser usados en el cálculo del coeficiente  $K_p$  diario y  $K_p$  decenal bajo invernadero, para la localidad de la Hcda. El Prado, en el periodo agosto 2021-octubre 2022; ya que los resultados obtenidos de  $R^2$ , no mostraron diferencias significativas ni en el análisis diario y ni en el análisis decenal.
- De acuerdo a los estadísticos *MAE* y *RMSE*, se concluye que los métodos empíricos para la estimación del coeficiente  $K_p$  diario bajo invernadero, localidad Hcda. El Prado, en el periodo agosto 2021-enero 2022, corresponden a *Cuenca* y *Allen-Pruitt*. Estos métodos obtuvieron los menores valores, en comparación con los otros métodos analizados en esta investigación, cuyos valores corresponden a *MAE* (0,155; 0,156) y; *RMSE* (0,180; 0,178) respectivamente.

# CONCLUSIONES

- De acuerdo a los estadísticos *MAE* y *RMSE*, se concluye que los métodos empíricos para la estimación del coeficiente  $K_p$  decenal bajo invernadero, corresponden a *Snyder* y *Cuenca*. Estos métodos obtuvieron los menores valores, en comparación con los otros métodos analizados en esta investigación, cuyos valores corresponden a *MAE* (0,060; 0,056) y; *RMSE* (0,090; 0,075) respectivamente.
- Acorde a las correlaciones diarias y decenales entre valores estimados y medidos del coeficiente  $K_p$ , se observa que todos los métodos empíricos presentan sobrestimación y subestimación en el cálculo de los coeficientes  $K_p$ . En las correlaciones de valores decenales del coeficiente  $K_p$ , se observa que el método de *Snyder* presenta la mayor sobrestimación en el cálculo del coeficiente  $K_p$ .
- Se encontró el valor promedio diario y promedio decenal de *ETo*, bajo invernadero, en la localidad Hcda. El Prado, para el periodo agosto 2021- enero 2022, a través del método directo del *Tevap. Clase A* y con coeficiente  $K_p=0,73$ , cuyo valor corresponde a 1,02 mm.
- Conforme a las comparaciones gráficas, se concluye que los valores de *ETo* determinados a través del método directo del *Tevap. Clase A* y con  $K_p$  medido de 0,73, proporciona valores más cercanos a los valores de *ETo* determinados con la ecuación *PM-FAO56*
- La fórmula de *PM-FAO56* proporciona valores de la *ETo* diarios y decenales bajo invernadero, que sobrestiman a los valores de *ETo* diarios y decenales determinados a través del método *Tevap Clase A*, y coeficiente  $K_p$  teórico=0,65 y coeficiente  $K_p$  medido=0,73.

# RECOMENDACIONES

- Para la medición de la evaporación del agua en el tanque de manera diaria, se recomienda utilizar un tornillo micrométrico para obtener una mejor precisión en la lectura de la lámina de agua evaporada en el tanque evaporímetro Clase A.
- Realizar un estudio con el uso del método directo lisímetro de drenaje, debido a que algunos estudios mencionan que este método es muy útil para el cálculo del  $K_p$  y para la estimación de la evapotranspiración del cultivo de referencia ( $ET_o$ ).
- Realizar esta investigación a campo abierto para saber si se obtiene un coeficiente  $K_p$  igual o similar al realizado bajo invernadero para la estimación de  $ET_o$  con el uso del método directo del  $T_{evap}$ . Clase A.
- Se recomienda que para determinar el coeficiente  $K_p$  por diferentes métodos empíricos y, obtener un  $K_p$  medido ya sea fuera o bajo invernadero, se calcule mediante datos decenal o mensuales que son mucho más precisos que los datos diarios.
- Los valores del coeficiente  $K_p$  diarios y decenales obtenidos en esta investigación, deben ser contrastados nuevamente en futuras investigaciones, debido que al ser desarrollada bajo invernadero y por no existir investigaciones previas en este espacio, se deben generar más investigaciones para obtener valores más precisos y confiables de coeficiente  $K_p$ .

# AGRADECIMIENTOS



**Ing. Aguirre, María Soledad, Mgtr.**

**Ing. Arce Carriel, Marcelo Raúl, Mgtr.**

**Ing. Landázuri Abarca, Pablo Anibal, Mgtr.**